УДК 556.5; 504.455 *https://doi.org/10.35567/19994508-2026-2-32-62*

Оригинальная статья/Original paper

Особенности формирования концентраций и потоков метана в акватории карбонового полигона «Цимлянское водохранилище»

Е. В. Усова[1], Л. Ю. Дмитрик[1], Е. Л. Анпилова[1], Ю. А. Федоров[1, 2], Д. Н. Гарькуша[1, 2], М. А. Верещагин[1], Е. Р. Чернышенко[1]

chimanalit@inbox.ru

[1] *Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов, г. Ростов-на-Дону, Россия*
[2] *Институт наук о Земле Южного федерального университета, г. Ростов-на-Дону, Россия*

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Цимлянское водохранилище и другие искусственные водоемы рассматриваются современной наукой как антропогенные источники поступления климатически активных газов, в том числе метана, в атмосферу. Однако исследователи расходятся в оценках эмиссии CH_4 водохранилищами. Выявление закономерностей и основных факторов, определяющих пространственную и сезонную изменчивость эмиссии метана, его концентраций в воде и донных осадках является важнейшей задачей исследований в акватории карбонового полигона «Цимлянское водохранилище». **Методы.** Проведены комплексные экспедиционные исследования с отбором проб воды, донных отложений, потоков метана на границе «вода – атмосфера». Определение содержания метана выполнено газохроматографическим методом на газовом хроматографе с пламенно-ионизационным детектором и дозатором равновесного пара. Для количественного определения растворенного органического углерода применялся метод высокотемпературного каталитического окисления на анализаторе углерода. Вертикальное зондирование водной толщи для определения характеристик воды выполнено с помощью мультипараметрического зонда. **Результаты.** Получены данные о пространственной и временной изменчивости концентраций метана в воде, донных осадках и его эмиссионных потоков для Цимлянского водохранилища. Описаны взаимосвязи между некоторыми гидрохимическими показателями и концентрациями метана. Получены количественные оценки эмиссии CH_4 с водной поверхности водохранилища.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: искусственные водоемы, Цимлянское водохранилище, карбоновый полигон, метан, потоки, органический углерод

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Работа выполнена в рамках создания и функционирования карбонового полигона «Цимлянское водохранилище» М7.7/08-18-24.

© Усова Е. В., Дмитрик Л. Ю., Анпилова Е. Л, Федоров Ю. А., Гарькуша Д. Н., Верещагин М. А., Чернышенко Е. Р., 2026

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Усова Е. В., Дмитрик Л. Ю., Анпилова Е. Л, Федоров Ю. А., Гаркуша Д. Н., Верещагин М. А., Чернышенко Е. Р. Особенности формирования концентраций и потоков метана в акватории карбонового полигона «Цимлянское водохранилище» // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2026. № 2. С. 32–62. https://doi.org/10.35567/19994508-2026-2-32-62; EDN: GSCAZP

Special features of the methane concentrations and flows' formation in the "Tsymlyansk Reservoir" carbon range water area

Elena V. Usova[1], Leonid Yu. Dmitrik[1], Evgeniya L. Anpilova[1], Yuri A. Fedorov[1,2], Dmitry N. Garkusha[1,2], Michael A. Vereshchagin[1], Elena R. Chernyshenko[1]

chimanalit@inbox.ru

[1] *Russian Scientific Research Institute for Integrated Use and Protection of Water Resources, Rostov-on-Don, Russia*
[2] *Institute of Earth Sciences of the Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia*

ABSTRACT

Relevance. The Tsimlyansk reservoir and other artificial reservoirs are considered by modern science as anthropogenic sources of entry of climatically active gases, including methane into the atmosphere. However, researchers differ in their estimates of CH4 emissions from reservoirs. The identification of patterns and main factors determining the spatial and seasonal variability of methane emissions, its concentrations in water and bottom sediments in the studied reservoir is the most important task of conducting research in the water area of the carbon landfill "Tsimlyanskoe reservoir". **Methods.** Comprehensive expeditionary studies have been conducted with sampling of water, sediments, and methane fluxes at the water-atmosphere boundary. The methane content was determined by the gas chromatographic method on a gas chromatograph with a flame ionization detector and an equilibrium vapor dispenser. The method of high-temperature catalytic oxidation on a carbon analyzer was used to quantify dissolved organic carbon. Vertical probing of the water column to determine the characteristics of the water is performed using a multiparametric probe. **Results.** Data on spatial and temporal variability of methane concentrations in water, bottom sediments, and its emission fluxes in the Tsimlyansk reservoir have been obtained. The interrelationships between some hydro/chemical parameters and methane concentrations are described. Quantitative estimates of CH4 emissions from the reservoir's water surface have been obtained.

KEYWORDS: artificial reservoirs, Tsimlyansk reservoir, carbon landfill, methane, flows, organic carbon

FINANCING: The work was carried out within the framework of the creation and operation of the carbon landfill "Tsimlyanskoe reservoir" M7.7/08-18-24.

FOR CITATION: Usova E. V., Dmitrik L. Y., Anpilova E. L., Fedorov Y. A., Garkusha D. N., Vereshchagin M. A., Chernyshenko E. R. Special features of the methane concentra-

tions and flows' formation in the "Tsymlyansk Reservoir" carbon range water area. Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management. 2026. No. 2. P. 32–62, https://doi.org/10.35567/19994508-2026-2-32-62; EDN: GSCAZP

ВВЕДЕНИЕ

Одной из актуальных экологических проблем является глобальное изменение климата, связанное с увеличением концентраций в атмосфере Земли климатически активных (парниковых) газов (CO_2, CH_4, N_2O и др.), что обусловливает повышение температуры воздуха в тропосфере, таяние вечной мерзлоты, повышение уровня Мирового океана, увеличение частоты и интенсивности гидрометеорологических стихийных бедствий и т. д.

Снижение выбросов парниковых газов является критически важным аспектом в контексте противодействия последствиям климатических изменений. Исследования в области количественной оценки углеродного следа в процессе производства продукции активно развиваются [1–4]. Важным инструментом в этом направлении являются карбоновые полигоны – специализированные исследовательские площадки, предназначенные для проведения комплексных экспериментальных исследований углеродного цикла в природных экосистемах. На данных объектах осуществляются систематический мониторинг и количественная оценка потоков климатически активных газов на границе раздела «поверхность – атмосфера», проводится валидация современных методологических подходов к измерению эмиссии и поглощения парниковых газов, а также тестируются инновационные технологии, направленные на снижение выбросов и усиление процессов секвестрации углерода в природных системах.

В феврале 2021 г. Министерство науки и высшего образования Российской Федерации запустило пилотный проект по созданию на территории регионов России карбоновых полигонов для разработки и испытаний технологий контроля углеродного баланса. В настоящее время функционируют 19 полигонов, репрезентирующих ключевые биогеоценозы: лесные экосистемы, морские акватории, аграрные ландшафты и водно-болотные угодья[1].

В 2024 г. на базе Российского научно-исследовательского института комплексного использования и охраны водных ресурсов и Федерального научного центра агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения РАН начал функционировать первый межведомственный водный карбоновый полигон на пресноводном водоеме, в качестве объекта выбрано Цимлянское водохранилище.

1 Карбоновые полигоны Российской Федерации. [Электр. ресурс]. URL: https://carbon-polygons.ru/about/ (дата обращения: 02.04.2026).

Целью создания карбонового полигона являлось получение новых экспериментальных данных о пространственной и временной изменчивости потоков климатически активных (парниковых) газов (CO_2 и CH_4) между поверхностью пресноводного водоема и атмосферой в степной зоне юга европейской части России; изучение динамики баланса органического и неорганического углерода в водах водохранилища; установление чувствительности потоков CO_2 и CH_4 к изменению условий внешней среды с последующей разработкой комплекса мероприятий по контролю поглощения и эмиссии климатически активных газов.

Водохранилища являются важными источниками поступления в атмосферу метана (CH_4) – агрессивного парникового газа, «парниковый потенциал» которого в расчете на 100 лет в 28 раз сильнее, чем у углекислого газа, а в 20-летней перспективе – в 84 раза [5]. Этот газ образуется в водных объектах главным образом в результате протекания анаэробных процессов разложения органического вещества (ОВ) в воде и донных отложениях и поступает в атмосферу в результате пузырькового переноса и диффузии через водную толщу [6].

Особое внимание исследователей направлено на изучение водохранилищ – крупных резервуаров-накопителей автохтонного и аллохтонного органического вещества, обладающих высоким потенциалом к образованию метана и его эмиссии в атмосферу [7, 8].

Имеющиеся ориентировочные оценки вклада водохранилищ в глобальную эмиссию метана существенно разнятся, что, помимо отсутствия общепринятой методологии измерения выбросов парниковых газов, обусловлено как ограниченным числом данных, на которых базируются эти оценки, так и большей, чем в естественных водоемах и водотоках, вариативностью внутригодовых изменений величин их удельных потоков [9–12]. Значения удельных потоков CH_4 могут существенно отличаться (до нескольких порядков) как с различных водохранилищ, так и в пределах одного водоема в разные сезоны и на разных участках.

Цель проведенного исследования – выявление закономерностей и основных факторов, определяющих пространственную и сезонную изменчивость эмиссии метана с поверхности Цимлянского водохранилища, его концентраций в воде и донных осадках.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В период 2023–2024 гг. в различные гидроэкологические фазы проводились комплексные исследования эмиссии CH_4 с поверхности Цимлянского водохранилища на 18 станциях (рис. 1, табл. 1), расположенных на основных плесах-участках Цимлянского водохранилища: Калачевский, Чирский, Центральный и Приплотинный.



Рис. 1. Картосхема станций мониторинга парниковых газов в Цимлянском водохранилище в 2023–2024 гг.: I – Калачевский участок; II – Чирский участок; III – Центральный участок; IV – Приплотинный участок; V – границы участков

Fig. 1. Scematic map of the greenhouse gases monitoring stations at the Tsymlyansk Reservoir in 2023–2024: I is Kalachevskiy section; II is Chirsky section; III is Tsentralny section; IV is Priplotinny section; V is sections' boundaries

Отбор проб воды в поверхностном и придонном слоях для определения содержания гидрокарбонат-ионов, растворенного органического углерода (РОУ) и общего органического углерода (ООУ) выполнялся батометром Молчанова согласно ГОСТ Р 59024-2020 «Вода. Общие требования к отбору проб». Вертикальное зондирование водной толщи по параметрам – температура, растворенный кислород, водородный показатель (pH), окислительно-восстановительный потенциал (Eh) – проводилось мультипараметрическим зондом Aquaprobe® AP-7000. Метеорологические параметры (температура воздуха, скорость ветра, давление и влажность) на борту судна и на берегу в местах отбора проб измерялись беспроводной метеостанцией DAVIS Instruments Vantage Pro2 6152EU.

Отбор донных отложений осуществлялся ударной трубкой конструкции ГОИН согласно ПНД Ф 12.1:2:2.2:2.3:3.2-03 «Отбор проб почв, грунтов, донных отложений, илов, осадков сточных вод, шламов промышленных сточных вод, отходов производства и потребления».

Определение содержания метана в воде и донных отложениях выполнялось газохроматографическим методом с использованием анализа равно-

весного пара на газовом хроматографе «Хроматэк-Кристалл 5000.2», оснащенном дозатором равновесного пара и пламенно-ионизационным детектором, согласно аттестованным методикам[2,3].

Таблица 1. Местоположение станций отбора проб в Цимлянском водохранилище в 2024 г.
Table 1. Location of the water sampling stations at the Tsymlyansk Reservoir in 2024

Станция отбора на картосхеме	Месторасположение станций отбора проб воды и донных отложений	Координаты, с.ш. / в.д.
2	г. Волгодонск, приплотинный участок, вертикаль 20	47°33’38.9»N 42°09’14.8»E
3	г. Цимлянск, приплотинный участок, вертикаль 19	47°37’05.5»N 42°07’30.5»E
4	Выше г. Вологодонск, в районе Ростовской АЭС, вертикаль 69	47°38’26.7»N 42°13’57.3»E
5	Ниже впадения р. Россошь	47°50’59.0»N 42°22’49.8»E
6	Ст. Жуковская, приплотинный участок, вертикаль 3	47°44’30.4»N 42°25’04.2»E
7	Ст. Жуковская, приплотинный участок, вертикаль 24	47°39’17.6»N 42°27’10.5»E
8	Ниже х. Кривский	47°46’26.2»N 42°42’44.7»E
9	Ниже впадения р. Солоная	48°10’14.4»N 42°51’37.5»E
10	Центральный участок, х. Красноярский, вертикаль 28	47°54’46.9»N 42°57’55.7»E
11	Центральный участок, х. Красноярский, вертикаль 29	47°53’43.0»N 42°59’41.6»E
12	Ниже г. Ильмень-Суворовский	48°07’49.8»N 43°01’26.6»E
13	Чирский (верхний) участок ст. Нижний Чир, вертикаль 13	48°26’43.6»N 43°07’33.7»E
14	Чирский (верхний) участок, ст. Нижний Чир, вертикаль 30	48°21’46.2»N 43°10’10.0»E
15	Район впадения р. Мышкова, х. Шебалино	48°21’06.5»N 43°16’03.5»E
16	Калачевский участок, х. Логовский, вертикаль 14	48°26’24.8»N 43°20’33.9»E
17	Район впадения р. Донская Царица	48°30’25.6»N 43°27’22.5»E
18	Ниже г. Калач-на-Дону, район впадения Волго-Донского канала	48°37’00.8»N 43°31’17.8»E
19	Выше г. Калач-на-Дону	48°42’02.8»N 43°28’18.3»E

2 РД 52.24.511-2013. Массовая доля метана в донных отложениях. Методика измерений газохроматографическим методом с использованием анализа равновесного пара. Ростов-на-Дону: Гидрохимический институт, 2013. 19 с.

3 РД 52.24.512-2012. Объемная концентрация метана в водах. Методика измерений газохроматографическим методом с использованием анализа равновесного пара. Ростов-на-Дону: Гидрохимический институт, 2012. 23 с.

Определение содержания общего органического углерода (ООУ) и растворенного органического углерода (РОУ) осуществлялось методом высокотемпературного каталитического окисления углеродсодержащих соединений пробы на анализаторе общего углерода «Топаз NC» до оксида углерода с его последующим ИК-детектированием в соответствии с ГОСТ 31958-2012 «Методы определения содержания общего и растворенного органического углерода».

Измерение удельных потоков CH_4 с поверхности воды Цимлянского водохранилища проводилось методом плавучих камер [13–15], представляющих поликарбонатные емкости цилиндрической формы с открытым основанием на тяжелых деревянных поплавках (для устойчивости в ветреную погоду).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ полученных данных показал, что летом 2023 г. содержание CH_4 в поверхностном слое воды Цимлянского водохранилища изменялось от 3,2 до 55,6 мкл/л, среднее значение составило 12,5 мкл/л (рис. 2). Как правило, концентрации метана на большинстве станций не превышали 10 мкл/л, исключения составили станции, относящиеся к устьевым участкам притоков водохранилища (5, 9, 13, 15), и станция 19, расположенная в верхней русловой части, где гидрологический режим вод близок к речному [16].

В придонном слое воды в этот период концентрации метана варьировали от 1,8 до 167,4 мкл/л, а усредненный показатель равнялся 22 мкл/л (рис. 2). Наиболее высокие уровни содержания метана (40 и более мкл/л) зарегистрированы на станции 3, расположенной у Приплотинного участка, и на станциях 9, 13 и 15. На станциях 2 и 8 концентрации CH_4 не превышали 20 мкл/л, а на остальных были меньше 10 мкл/л.

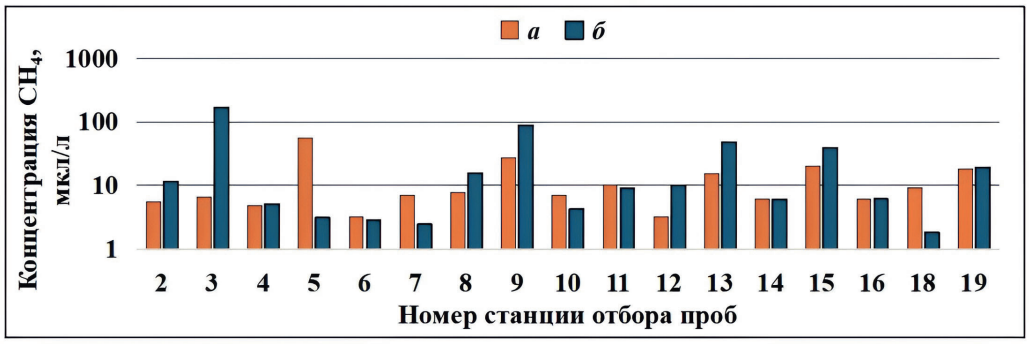


Рис. 2. Распределение концентрации метана в поверхностном (*а*) и придонном (*б*) слоях воды Цимлянского водохранилища, август 2023 г.

Fig. 2. The methane concentration distribution in surface (*a*) and near-bottom (*б*) water layers of the Tsymlyansk Reservoir, August 2023

Осенью 2023 г. диапазон концентраций CH_4 в верхнем слое воды составлял 1,6 – 20,7 мкл/л, в среднем 8,2 мкл/л (рис. 3). Содержание метана на станциях Приплотинного и Центрального плесов (кроме 9) не превышало 10 мкл/л, тогда как на Чирском и Калачевском участках отмечены концентрации выше 10 мкл/л. В придонной воде содержание метана варьировало в пределах от 2,1 до 20,7 мкл/л, среднее значение – 10,7 мкл/л, что незначительно превышает его концентрацию в поверхностном водном горизонте.

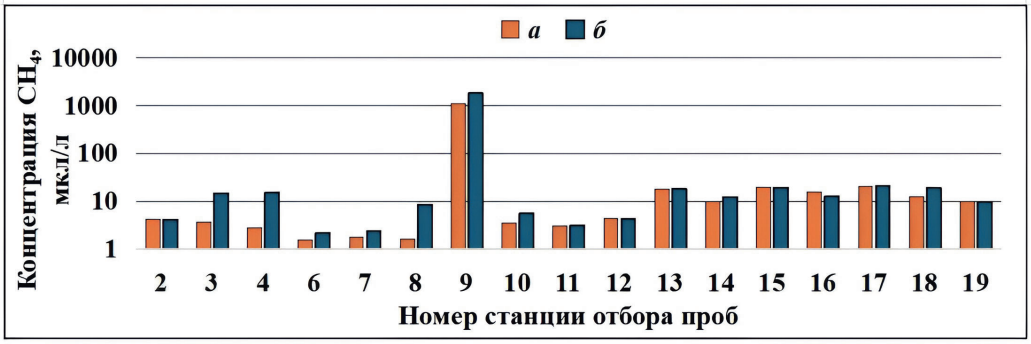


Рис. 3. Распределение концентрации метана в поверхностном (*а*) и придонном (*б*) слоях воды Цимлянского водохранилища, сентябрь 2023 г.

Fig. 3. The methane concentration distribution in surface (*a*) and near-bottom (*б*) water layers of the Tsymlyansk Reservoir, September 2023

Следует обратить внимание на данные, полученные на станции 9, где фиксировались экстремально высокие концентрации метана как в поверхностном, так и придонном слоях (1096 и 1796 мкл/л соответственно). Это связано с сильной эвтрофикацией и загрязненностью воды в этот период. Достоверно установить причины такого загрязнения не удалось, а при последующих отборах проб столь высокие значения не обнаруживались, поэтому результаты проб станции 9 осенью 2023 г. в дальнейших расчетах и при статистической обработке данных не учитывались.

В весенний период 2024 г. в поверхностном слое воды концентрации метана изменялись в интервале от 1,5 до 21,9 мкл/л, в среднем составили 5,6 мкл/л. Содержание метана выше 10 мкл/л обнаружено на станциях 9, 15, 18 и 19, по-видимому, вследствие их расположения в зонах выноса питающих водохранилище рек. Распределение растворенного метана в придонной воде Цимлянского водохранилища повторяет картину поверхностного слоя без значительных отличий в его концентрациях (рис. 4).

Летом 2024 г. в поверхностном слое воды Цимлянского водохранилища содержание метана изменялось в пределах от 2,1 до 56,0 мкл/л со средним значением 9,8 мкл/л (рис. 5). Концентрации растворенного метана, превышающие отметку в 10 мкл/л, зарегистрированы на станциях 2, 9, 13, 15.

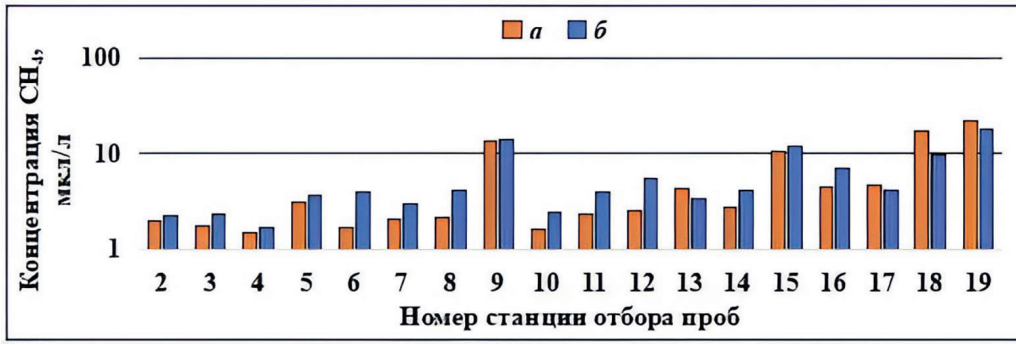


Рис. 4. Распределение концентрации метана в поверхностном (*а*) и придонном (*б*) слоях воды Цимлянского водохранилища, апрель–май 2024 г.

Fig. 4. The methane concentration distribution in surface (*a*) and near-bottom (*б*) water layers of the Tsymlyansk Reservoir, April-May 2023

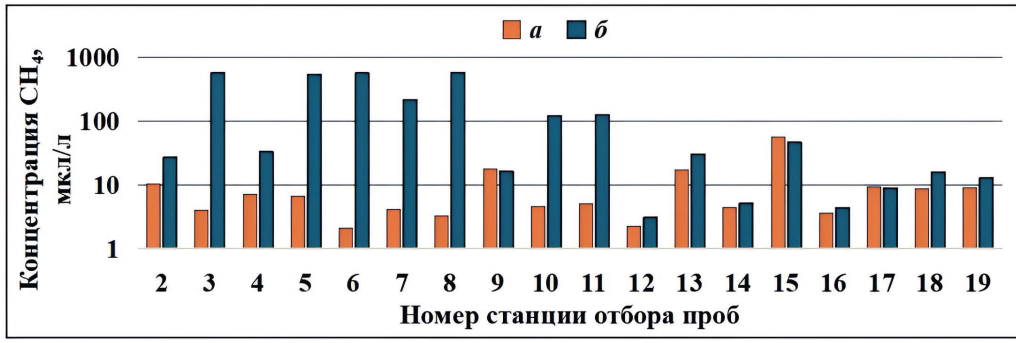


Рис. 5. Распределение концентраций метана в поверхностном (*а*) и придонном (*б*) слоях воды Цимлянского водохранилища, июль 2024 г.

Fig. 5. The methane concentration distribution in surface (*a*) and near-bottom (*б*) water layers of the Tsymlyansk Reservoir, July 2024

В придонной воде концентрации CH_4 изменялись в больших пределах – от 3,1 до 585,8 мкл/л, среднее значение равнялось 163,4 мкл/л (рис. 5). Высокие концентрации метана отмечены в Приплотинном и Центральном плесах, вверх по течению они снижались. Разница между содержанием CH_4 в поверхностном и придонном горизонтах воды Цимлянского водохранилища была обусловлена летней стратификацией водоема, установившейся на глубоководных Приплотинном и Центральном участках.

Концентрации метана в осенний период в поверхностном и придонном слоях нивелировались. Интервалы концентраций для поверхностного и придонного слоев составляли 2,3–25,8 мкл/л (среднее 7,8 мкл/л) и 2,5–35,9 мкл/л (среднее 10,1 мкл/л) соответственно (рис. 6). На мелководных участках наблюдалось возрастание содержания метана в обоих горизонтах. На станции 4 фиксировалось повышение концентрации метана в придонном слое воды, что, вероятно, обусловлено остаточным эффектом летней стратификации.

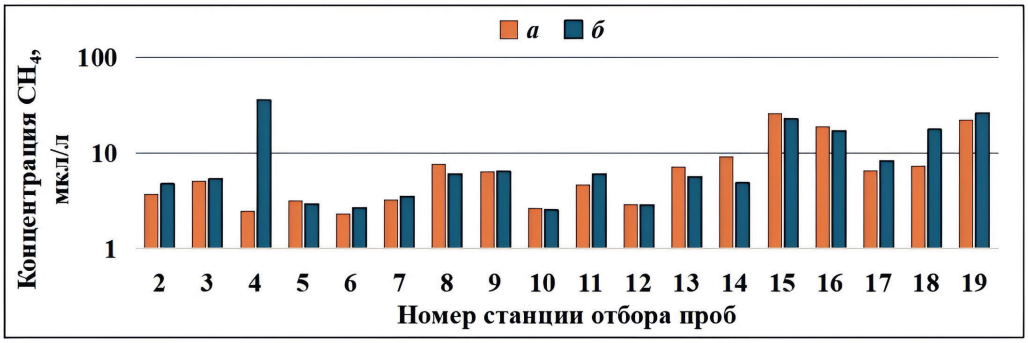


Рис. 6. Распределение концентраций метана в поверхностном (*а*) и придонном (*б*) слоях воды Цимлянского водохранилища, сентябрь – октябрь 2024 г.

Fig. 6. The methane concentration distribution in surface (*а*) and near-bottom (*б*) water layers of the Tsymlyansk Reservoir, September – October 2023

В рамках проведенной работы проанализирована сезонная изменчивость концентраций растворенного в воде метана в период 2023–2024 гг. (рис. 2–6). Весной 2024 г. и осенью 2023, 2024 гг. различие между концентрациями метана в поверхностном и придонном слоях воды, как правило, было минимально (в среднем в 1,1–2 раза), что связано с проведением исследований в гидрологические фазы осеннего и весеннего перемешивания вод в водохранилище. В эти периоды распределение концентраций CH_4 в поверхностном и придонном слоях происходило достаточно синхронно, причем в 71 % проб концентрации метана в придонном слое были выше, чем в поверхностном. Летом 2023 г. в конце периода стратификации только на 53 % станций концентрация метана в придонной воде была выше, чем в поверхностной, с отношением в 1,1–25,6 раза.

В летний период 2024 г. наблюдалось существенное различие между концентрацией метана в поверхностном и придонном слоях (в 52–272 раза) на глубоководных станциях Приплотинного участка водохранилища (станции 3, 5, 6, 7 и 8, с глубинами 9,5–18,5 м), которое было обусловлено стратификацией вод в период летней стагнации. С уменьшением глубины различие значений концентрации метана в поверхностном и придонном слоях на станциях Калачевского, Чирского и верхней части Центрального плесов не превышало двух раз.

В целом за период 2023–2024 гг. пространственное распределение концентраций метана в поверхностном и придонном горизонтах имело ярко выраженную сезонность. В периоды осеннего и весеннего перемешивания в водохранилище наблюдалось увеличение концентрации метана в обоих горизонтах воды по направлению от Приплотинного к Калачевскому участку. В летний период концентрации метана в придонном слое воды возрастали в обратном направлении, что обусловлено аномально высокими значениями содержания метана в период летней стратификации.

Концентрация метана в придонном слое воды в летний период имела тенденцию к увеличению по мере возрастания глубины – от мелководных участков к глубоководным, что обусловлено формированием устойчивых стратификационных условий, лимитирующих вертикальное перемешивание водных масс и способствующих аккумуляции метана в гиполимнионе. Детальные данные, полученные в ходе вертикального зондирования летом 2024 г. на глубоководных станциях Приплотинного и нижней части Центрального участков (станции 3–8 и 10), позволяют конкретизировать эти наблюдения. Установлено, что значения окислительно-восстановительного потенциала (Eh) в придонном слое варьировались от –290,2 до –152,5 мВ, что свидетельствовало о развитии восстановительных условий. Концентрация растворенного кислорода находилась в интервале от 0,03 мг/л (степень насыщения 0,3 %) до 2,3 мг/л (26,6 %), указывая на выраженный дефицит кислорода, при этом концентрация метана изменялась в широком диапазоне от 33,1 до 585,8 мкл/л (в среднем 377,7 мкл/л). Глубина водоема на исследуемых участках составляла 9,5–18,5 м, отрицательные значения Eh и гипоксические условия фиксировались в горизонте 2–5 м от дна. Показатели поверхностного слоя воды на тех же станциях были противоположны придонному: окислительно-восстановительный потенциал принимал положительные значения от +43,5 мВ до +168,3 мВ (в среднем +91,7 мВ), концентрации кислорода были выше – от 8,07 мг/л (100,2%) до 8,86 мг/л (113,1%) (в среднем 8,45 мг/л), а концентрации метана существенно ниже – от 2,1 до7,1 мкл/л (в среднем 4,54 мкл/л).

Таким образом, вертикальная стратификация водоема в летний период формирует контрастные геохимические зоны: придонный слой характеризуется восстановительными условиями, дефицитом кислорода и высокой концентрацией метана, тогда как поверхностный отличается окислительной обстановкой, насыщением кислородом и низкими концентрациями метана. Именно эти условия определяют интенсивность накопления метана в донных отложениях. На рис. 7–11 представлены данные о сезонном и пространственном распределении метана в поверхностном слое донных отложений (0–2 см) Цимлянского водохранилища.

В летний период 2023 г. концентрации метана в поверхностном слое седиментов изменялись в интервале 0,8–30,8 мкг/г влажного осадка (вл. о.), при среднем значении 9,0 мкг/г вл. о. (рис. 7). Наиболее высокие показатели содержания метана в донных отложениях фиксировались на глубоководных станциях 7, 6 и 4, находящихся вне зоны непосредственного влияния притоков водохранилища. Концентрации метана на этих станциях достигали 30,8, 26,5 и 20,9 мкг/г вл. о. соответственно. Показательно почти симбатное изменение содержания метана в донных осадках с глубинами на станциях со 2-й по 12-ю, что может свидетельствовать о более активных

процессах метаногенеза в донных отложениях на станциях, расположенных на удалении от речных стоков, и на больших глубинах.

В осенний период зафиксировано пространственно-неоднородное распределение метана в донных отложениях Цимлянского водохранилища. Диапазон концентраций составил от 0,1 до 85,7 мкг/г вл. о. (рис. 8), среднее значение – 13,4 мкг/г вл. о. (без учета станции 9). Несмотря на повышение среднего содержания метана относительно летнего сезона, на большей части исследуемых станций наблюдалось его снижение. Статистически значимое увеличение концентраций (в несколько раз относительно летних показателей) зарегистрировано только на станциях 3, 4, 15 и 18, наибольшие концентрации CH_4 в поверхностном горизонте донных отложений (0–2 см) характерны для нижней части Приплотинного участка, отличающейся максимальной глубиной. На других участках корреляция между глубиной водоема и содержанием метана не прослеживалась. Локальный максимум концентраций на станции 18 в горизонте 0–2 см, вероятно, обусловлен аккумуляцией метана, поступающего с водными массами из р. Дон, что указывает на влияние речного стока на формирование геохимического фона в данной зоне водохранилища.



Рис. 7. Изменение концентраций метана в поверхностном слое донных отложений с глубиной в Цимлянском водохранилище в августе 2023 г.: 1 – концентрации CH_4, мкг/г вл. о.; 2 – глубина, м

Fig. 7. Changes in methane concentrations in the surface layer of bottom sediments with depth in the Tsimlyansk reservoir, August 2023: 1 is CH_4 concentration, mkg/g; 2 is depth, m

Весной 2024 г. наблюдались минимальные за весь период исследований концентрации метана в поверхностном слое донных отложений. Диапазон значений составил 0,02–7,9 мкг/г вл. о., в среднем – 1,8 мкг/г вл. о. (рис. 9). Низкие показатели обусловлены комплексом гидрологических и биогеохимических факторов: недостаточным прогревом водной толщи после зимнего периода и высоким содержанием растворенного кислорода, формирующимся в результате весеннего конвективного перемешивания водных масс. Указанные условия препятствуют формированию устойчивых анаэробных

зон в придонных слоях, что подавляет активность метаногенных архей в донных отложениях. Пространственный анализ распределения метана выявил локальные участки повышенных концентраций, которые приурочены к зонам впадения притоков (станции 5, 14 и 15) и к верхней русловой части водохранилища (станция 19). При этом статистически достоверной корреляции между распределением метана в поверхностном слое донных осадков и глубиной водоема в весенний период не установлено.

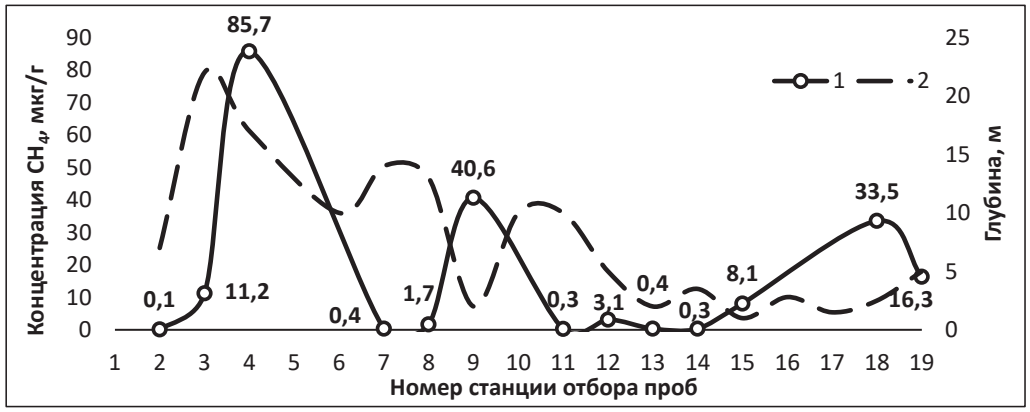


Рис. 8. Изменение концентраций метана в поверхностном слое донных отложений с глубиной в Цимлянском водохранилище, сентябрь 2023 г.: 1 – концентрации CH_4, мкг/г вл. о.; 2 – глубина, м

Fig. 8. Changes in methane concentrations in the surface layer of bottom sediments with depth in the Tsimlyansk reservoir, September 2023: 1 is CH_4 concentration, mkg/g; 2 is depth, m

Летом 2024 г. отмечено существенное увеличение концентраций метана в донных осадках относительно весеннего сезона. Диапазон варьирования составил от 0,02 до 26,7 мкг/г вл. о. со средним показателем в 7,9 мкг/г вл. о. (рис. 10). Для летнего сезона характерно восстановление субпараллельной зависимости между глубиной водоема и концентрациями метана в поверхностном слое донных отложений по продольному профилю водохранилища. Однако по сравнению с аналогичным периодом 2023 г. выраженность этой закономерности оказалась менее значительной, а зона ее распространения ограничилась станциями со 2-й по 10-ю. Максимальные концентрации CH_4 регистрировались на станциях, локализованных в Центральном плесе Цимлянского водохранилища.

В осенний период 2024 г. наблюдалось снижение концентраций метана в поверхностном слое донных отложений относительно летнего сезона, что связано с началом осеннего конвективного перемешивания водных масс. Диапазон значений содержания CH_4 – в пределах 0,02–17,3 мкг/г вл. о., средний показатель – 3,3 мкг/г вл. о. (рис. 11). В этот период нарушилась ранее наблюдавшаяся зависимость распределения метана от глубины водоема.



Рис. 9. Изменение концентраций метана в поверхностном слое донных отложений с глубиной в Цимлянском водохранилище в апреле – мае 2024 г.: 1 – концентрации CH_4, мкг/г вл. о.; 2 – глубина, м

Fig. 9. Changes in methane concentrations in the surface layer of bottom sediments with depth in the Tsimlyansk reservoir, April – May 2024: I is CH_4 concentration, mkg/g; 2 is depth, m

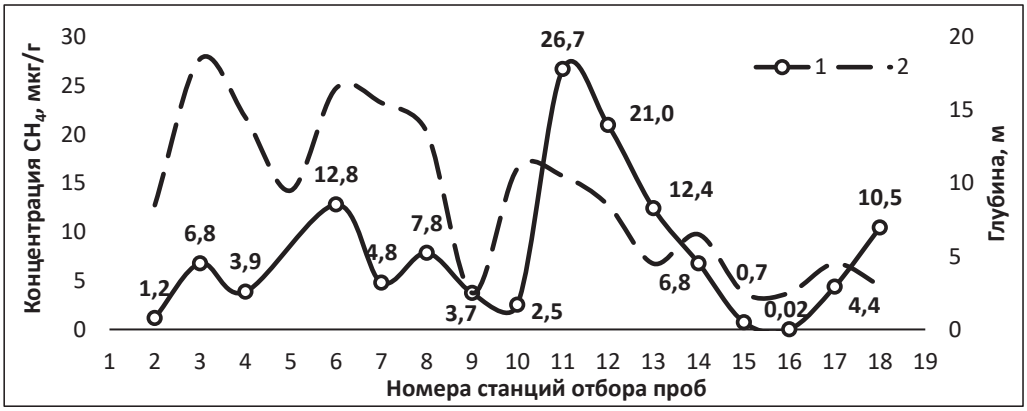


Рис. 10. Изменение концентраций метана в поверхностном слое донных отложений с глубиной в Цимлянском водохранилище в июле 2024 г.: 1 – концентрации CH_4, мкг/г вл. о.; 2 – глубина, м

Fig. 10. Changes in methane concentrations in the surface layer of bottom sediments with depth in the Tsimlyansk reservoir, July 2024: 1 is CH_4 concentration, mkg/g; 2 is depth, m

Максимальные концентрации CH_4 регистрировались на Приплотинном участке водохранилища (станция 6), что может указывать на локальные особенности биогеохимических процессов в данной зоне.

Сопоставление сезонной динамики содержания метана в Цимлянском водохранилище позволило выявить четкую связь между гидрологической структурой водной толщи и распределением метана в поверхностном слое донных отложений (0–2 см). В периоды летней стратификации вод фиксируется субпараллельное распределение концентраций метана с глу-

биной по продольному профилю водоема. Данная закономерность обусловлена формированием устойчивой термической и химической стратификации, способствующей накоплению метана в придонных слоях и его последующей аккумуляции в донных отложениях. В периоды весеннего и осеннего перемешивания водных масс, сопровождающиеся разрушением стратификационных барьеров и насыщением водной толщи кислородом, эта зависимость нарушается. Конвективное перемешивание приводит к снижению градиентов концентраций и перераспределению метана по акватории.

Обобщение данных за 2023–2024 гг. показало, что концентрации CH_4 в верхнем слое донных отложений Цимлянского водохранилища варьировали в диапазоне от 0,02 до 85,7 мкг/г влажного осадка (в среднем 6,22 мкг/г, n = 92). Максимальные концентрации CH_4 в отложениях зафиксированы в летние периоды 2023–2024 гг. и осенью 2023 г., минимальные – весной 2024 г.



Рис. 11. Изменение концентраций метана в поверхностном слое донных отложений с глубиной в Цимлянском водохранилище в сентябре – октябре 2024 г.: 1 – концентрации CH_4, мкг/г вл. о.; 2 – глубина, м

Fig. 11. Changes in methane concentrations in the surface layer of bottom sediments with depth in the Tsimlyansk reservoir, Septemer – October 2024: 1 is CH_4 concentration, mkg/g; 2 is depth, m

Анализ распределения метана в водной толще и донных отложениях Цимлянского водохранилища создает необходимую основу для интерпретации данных по его эмиссии в атмосферу. Обработка массива данных, полученных методом плавучих камер при измерении удельных потоков метана (F_{CH4}) на границе «вода – атмосфера» показала, что летом 2023 г. величина общего удельного потока метана в Цимлянском водохранилище варьировала в интервале 0,001–0,164 мг CH_4/(м^2 час) со средним значением 0,018 мг CH_4/(м^2 час). Это самое низкое среднее значение удельного потока метана за весь период наблюдений (рис. 12). На большинстве станций показатель F_{CH4} не превышал 0,01 мг CH_4/(м^2 час). Повышенные величины

потока зафиксированы на станциях 5, 9, 15 и 19, расположенных вблизи устьев рек, питающих водохранилище, при глубинах менее 7 м.

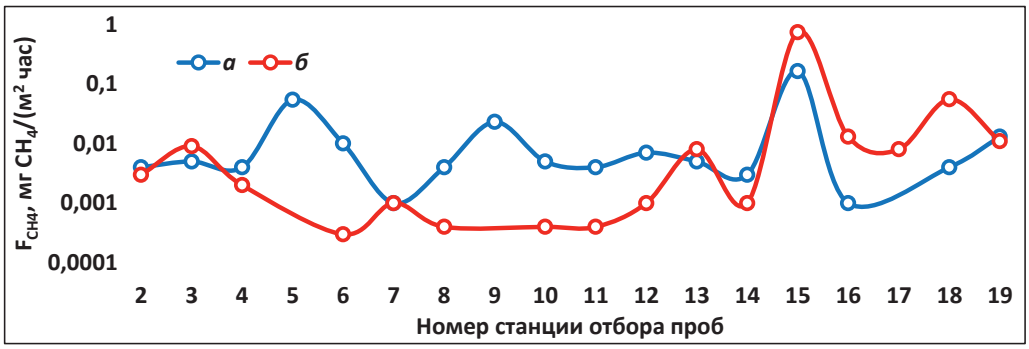


Рис. 12. Распределение удельных потоков метана на границе «вода – атмосфера» Цимлянского водохранилища в августе (*а*) и сентябре (*б*) 2023 г.

Fig. 12. The methane specific flows distribution at the "water – atmosphere" boundary, the Tsymlyansk Reservoir, August (*a*) and September (*б*) 2023

Осенью 2023 г. диапазон изменений значений удельного потока CH_4 составлял 0,0003–0,74 мг CH_4/(м² час) при среднем значении 0,053 мг CH_4/(м² час) (рис. 12). Примечательно, что рост среднего показателя относительно летнего периода сопровождался разнонаправленной динамикой на отдельных участках: на большинстве пунктов отбора проб зафиксировано снижение или лишь незначительное увеличение F_{CH4}. Исключением стали станции 15 и 18, где отмечено многократное возрастание удельного потока метана. Обе станции расположены в верхней части водохранилища – зоне активного влияния речных притоков, при этом глубины на данных участках составляют менее 5 м.

Весной 2024 г. значения общего удельного потока метана на границе «вода – атмосфера» Цимлянского водохранилища варьировали в интервале 0,008–3,44 мг CH_4/(м² час) со средним показателем 0,35 мг CH_4/(м² час) (рис. 13). Пространственное распределение потоков метана характеризовалось выраженной неоднородностью: на глубоководных станциях Приплотинного участка (4, 6) величина F_{CH4} была ниже 0,01 мг CH_4/(м² час). Высокие значения общего удельного потока метана зафиксированы на мелководных приустьевых станциях (15, 18), где они составили 3,44 и 1,80 мг CH_4/(м² час) соответственно. В весенний период 2024 г. показатели F_{CH4} возрастали в направлении от Приплотинного к Калачевскому участку водохранилища.

В фазу летней стратификации воды 2024 г. зафиксированы значительные показатели удельных потоков метана с поверхности Цимлянского водохранилища в диапазоне от 0,04 до 27,4 мг CH_4/(м² час), средний уровень F_{CH4} составлял 3,7 мг CH_4/(м² час) – это максимальное значение за весь период проведенных исследований (рис. 13).

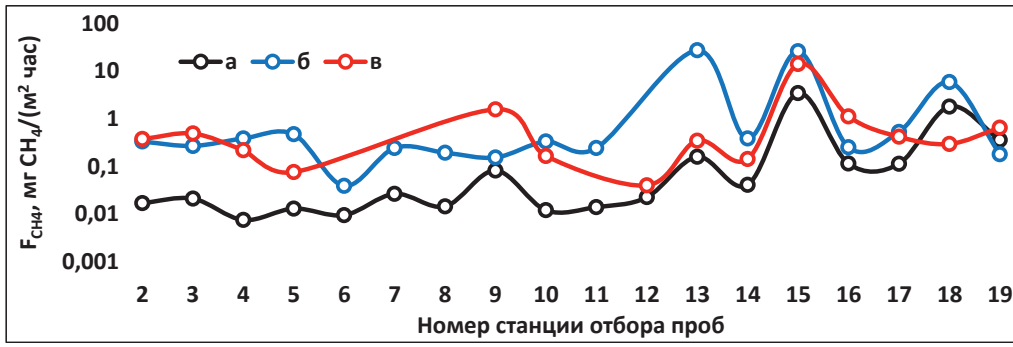


Рис. 13. Распределение удельных потоков метана на границе «вода – атмосфера» Цимлянского водохранилища в апреле – мае (*а*), июле (*б*) и сентябре – октябре (*в*) 2024 г.

Fig. 13. The methane specific flows distribution at the "water – atmosphere" boundary, the Tsymlyansk Reservoir, April – May (*a*), July (*б*) and September – October (*в*) 2024

Пространственное распределение потоков метана в Цимлянском водохранилище характеризовалось отчетливой закономерностью: наблюдалось постепенное увеличение значений в направлении от Приплотинного участка – наиболее глубокого района водохранилища – к Калачевскому, отличающемуся меньшей глубиной. Наиболее высокие значения F_{CH4} фиксировались в приустьевых участках притоков водохранилища на станциях 13, 15, 18. Разница в интенсивности эмиссии метана между глубоководными и мелководными участками водохранилища объясняется комплексом условий, складывающихся в мелководной зоне: здесь быстрее прогревается вода, интенсивнее перемешиваются водные массы и короче путь диффузии метана от донных отложений до границы «вода – атмосфера». Осенью 2024 г. F_{CH4} изменялся от 0,04 до 14,09 мг CH_4/(м² час), а его средний показатель составил 1,4 мг CH_4/(м² час) (рис. 13). Высокие значения удельного потока метана фиксировались, как и в предыдущие периоды, на мелководных и приустьевых станциях водохранилища (9, 15, 16).

В период 2023–2024 гг. отмечены значительные колебания общего удельного потока метана в атмосферу с водной поверхности Цимлянского водохранилища: диапазон значений составил 0,0003–27,8 мг CH_4/(м² час), в среднем 1,1 мг CH_4/(м² час). Статистический анализ данных показал, что подавляющее большинство измерений (92 %) характеризовались значениями F_{CH4} менее 1 мг CH_4/(м² час). Сезонный и пространственный анализ распределения удельных потоков метана выявил ряд значимых закономерностей. В летний период 2023 г. 71 % измеренных значений F_{CH4} был ниже уровня 0,01 мг CH_4/(м² час), а осенью 2023 г. доля таких показателей возросла до 75 %. При этом в оба сезона не было зафиксировано ни одного случая превышения порога 1 мг CH_4/(м² час). Пространственное распределение потоков продемонстрировало устойчивую приуроченность макси-

мальных значений F_{CH4} к определенным участкам водохранилища: преимущественно к мелководным зонам – Чирскому и Калачевскому участкам, а также к устьевым районам притоков (реки Мышкова, Солоная и Чир) и верхней русловой части водохранилища, где гидрологический режим вод близок к речному.

По результатам ориентировочного расчета, суммарная эмиссия CH_4 с водной поверхности водохранилища за период с весны по осень 2024 г., рассчитанная на основе средних значений удельного потока, составила 13 278,6 т CH_4 или 9958,95 т в пересчете на углерод.

Поскольку интенсивность эмиссии метана с поверхности водоема тесно связана с гидрохимическими характеристиками водной среды, возникла необходимость детальной оценки их сезонной динамики и пространственного распределения. Соответствующие данные, включающие диапазоны и средние значения ключевых гидрохимических показателей в поверхностном и придонном слоях воды Цимлянского водохранилища за 2023–2024 гг., представлены в табл. 2.

Таблица 2. Диапазоны и средние значения концентраций гидрохимических показателей в поверхностном и придонном слоях воды Цимлянского водохранилища

Table 2. Ranges and average values of the hydro/chemical indicators' concentrations in the surface and near-bottom layers of the Tsymlyansk Reservoir water

Показатель	Горизонт воды	Лето 2023 г.	Осень 2023 г.	Весна 2024 г.	Лето 2024 г.	Осень 2024 г.
pH	Поверхностный	8,05–9,38 8,86	8,08–8,89 8,57	8,13–9,02 8,53	7,51–8,60 8,36	8,10–8,62 8,40
	Придонный	8,00–8,95 8,42	8,04–8,90 8,43	8,00–8,78 8,32	7,45–8,46 7,88	7,96–8,46 8,31
t воды, °C	Поверхностный	23,2–31,6 26,7	18,5–24,2 20,4	10,6–23,55 17,1	24,6–28,1 26,0	13,1–21,0 17,8
	Придонный	21,4–28,0 24,6	18,7–20,4 19,3	6,2–20,0 13,9	17,8–27,5 24,0	13,6–20,5 17,4
O_2, мг/дм^3	Поверхностный	5,94–12,58 9,70	2,18–11,12 8,09	7,19–12,70 10,03	2,84–9,23 8,13	6,70–10,50 9,27
	Придонный	5,30–8,98 6,70	2,07–11,20 7,89	7,01–11,55 9,28	0,03–8,86 4,13	6,36–11,19 9,09
HCO_3^-, мг/дм^3	Поверхностный	160,2–292,9 197,1	175,4–300,5 229,1	184,6–300,5 244,5	175,4–303,6 232,9	196,8–270,0 231,6
	Придонный	151,0–303,6 199,7	175,4–297,5 221,5	190,7–308,2 247,0	190,7–306,6 237,5	196,8–270,0 232,1
Растворенный органический углерод, мг/дм^3	Поверхностный	–	–	7,53–37,35 19,22	17,34–36,50 23,46	4,14–13,21 8,98
	Придонный	–	–	7,90–25,54 18,07	20,17–37,34 23,88	3,72–22,08 9,39
Общий органический углерод, мг/дм^3	Поверхностный	–	–	9,00–50,33 26,35	18,60–41,31 24,21	6,85–17,22 11,43
	Придонный	–	–	13,36–50,63 28,59	19,12–37,19 24,19	7,35–16,89 11,33

Примечание: в числителе приведены диапазоны концентраций, в знаменателе – средние значения; (–) – нет данных.

Корреляционный анализ концентраций CH_4 и водородного показателя (pH) в воде Цимлянского водохранилища выявил статистически значимые обратные (отрицательные) зависимости: для поверхностного слоя воды в летний период 2024 г. коэффициент корреляции $r = -0,59$ ($n = 18$, $p < 0,01$), что соответствует умеренной обратной связи; для придонного слоя воды летом 2024 г. $r = -0,70$ ($n = 18$, $p < 0,01$), что указывает на сильную обратную связь; для общего массива данных по придонному слою за весь период наблюдений $r = -0,59$ ($n = 83$, $p < 0,001$), что также отражает умеренную обратную зависимость (рис. 14).

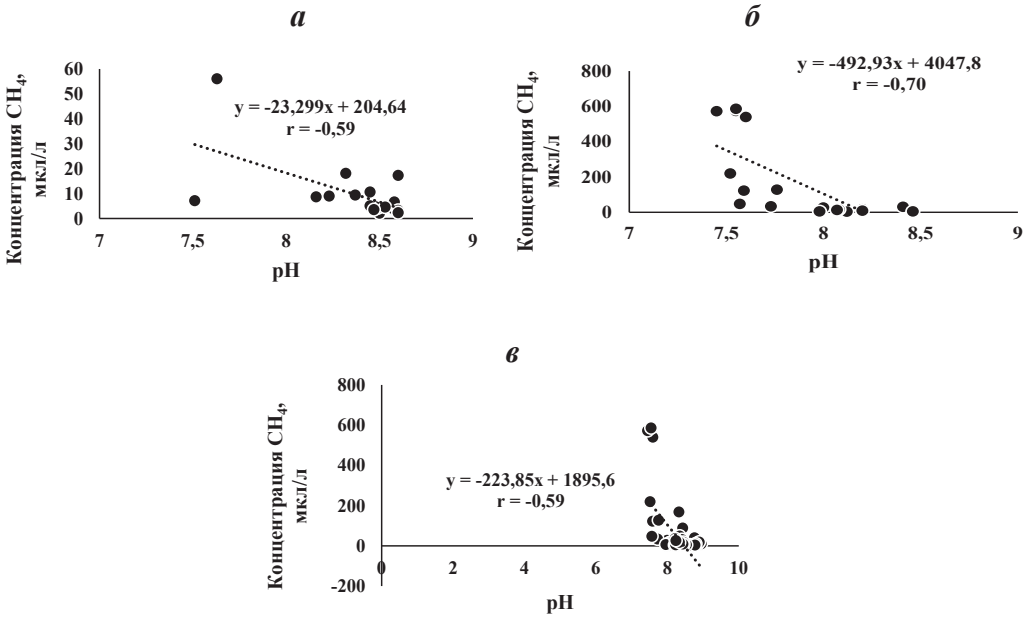


Рис. 14. Зависимость между концентрацией CH_4 и pH в поверхностном и придонном слоях воды на станциях отбора проб в Цимлянском водохранилище в различные периоды экспедиционных исследований в период 2023–2024 гг.: *а* – лето 2024 г., поверхностный слой; *б* – лето 2024 г., придонный слой; *в* – придонный слой за период 2023–2024 гг.

Fig. 14. Dependence between CH_4 concentration and pH in the surface and near-bottom water layers at the sampling stations at the Tsymlyansk Reservoir during different periods of expedition studies in the 2023-2024 period: *a* is summer 2024, surface layer; *б* is summer 2024, near-bottom layer; *в* is near-bottom layer over the 2023–2024 period

Выявленная обратная зависимость между концентрациями метана и pH в водной толще Цимлянского водохранилища имеет различную природу в поверхностном и придонном слоях, что обусловлено спецификой протекающих в них биогеохимических процессов. Для поверхностного слоя воды летом 2024 г. (рис. 14*а*) наблюдаемая закономерность, вероятно, обусловлена косвенными факторами, связанными с сезонной стратификацией. В этот период интенсифицируется фотосинтез фитопланктона, что приводит к активному поглощению углекислого газа из водной толщи, повы-

шению pH вследствие снижения концентрации CO_2 и сдвига карбонатного равновесия [18], насыщению воды кислородом, который служит субстратом для деятельности метанотрофных микроорганизмов, окисляющих CH_4. Таким образом, рост pH в поверхностных водах сопровождается снижением концентраций метана за счет его микробного окисления в аэробных условиях.

В гиполимнионе (придонном слое, рис. 14*б*) механизм формирования обратной зависимости принципиально иной. Здесь она отражает процессы интенсивного анаэробного разложения органического вещества в верхних слоях донных отложений, сопровождающиеся потреблением растворенного кислорода в водной толще, выделением CO_2 и CH_4 в результате микробной деструкции органики, снижением pH из-за накопления углекислоты и органических кислот, образующихся на промежуточных стадиях разложения [14, 18].

Аналогичная закономерность прослеживается и для общего массива данных по придонному слою за весь период исследований (рис. 14*в*), что подтверждает устойчивость выявленной зависимости. Стабильность обратной корреляции между CH_4 и pH в придонных слоях указывает на доминирующую роль анаэробных процессов деструкции органического вещества как ключевого фактора, регулирующего кислотно-щелочной баланс и метановый цикл в глубоководных зонах водохранилища.

Результаты сопоставления концентраций растворенного метана и кислорода в водной толще Цимлянского водохранилища за 2024 г. выявили статистически значимые обратные зависимости между этими показателями (рис. 15): в поверхностном горизонте воды весной $r = –0{,}50$ ($n = 18$; $p < 0{,}05$) и летом $r = –0{,}76$ ($n = 18$; $p < 0{,}01$), в придонной воде в летний период $r = –0{,}73$ ($n = 17$; $p < 0{,}01$).

Для обобщенных данных всех экспедиций в придонном слое воды прослеживалась аналогичная зависимость ($r = –0{,}65$; $n = 113$; $p < 0{,}01$). Как было отмечено выше, именно анаэробные условия среды являлись определяющим фактором в процессах метаногенеза, а их нарушение приводило к уменьшению концентрации метана в воде.

Весной 2024 г. статистически значимая обратная зависимость между концентрациями метана и O_2 была выявлена исключительно в поверхностном горизонте водной толщи. Данный факт, вероятно, обусловлен особенностями гидродинамического режима в период весеннего перемешивания: интенсивная турбулентность и конвекционные потоки активизируют биогеохимические процессы преимущественно в верхних слоях водоема. При сопоставимых средних значениях большинства гидрохимических показателей для поверхностного и придонного слоев (табл. 2) отчетливо проявляется существенное различие лишь по температурному параметру.

По-видимому, пониженная температура придонных вод ограничивает скорость биохимических реакций, в т. ч. активность микробных сообществ, участвующих в циклах метана и кислорода. Это сдерживает развитие как процессов метаногенеза в анаэробных условиях, так и окисления метана метанотрофами, требующего присутствия кислорода. Таким образом, температурный фактор выступает одним из ключевых регуляторов пространственной дифференциации биогеохимических процессов в водоеме в весенний период.

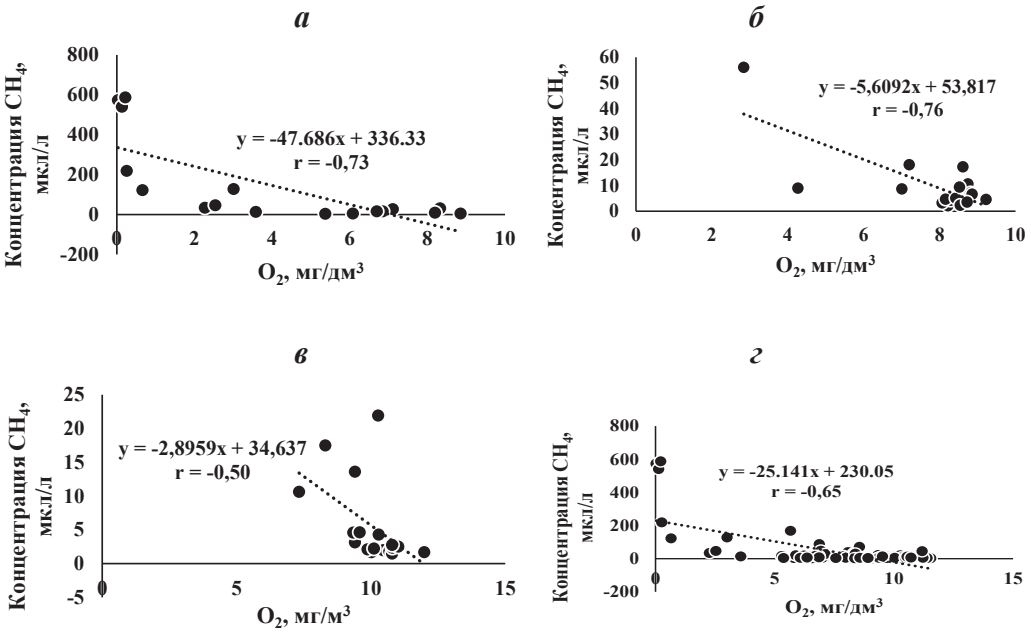


Рис. 15. Зависимость между концентрацией CH_4 и O_2 в поверхностном и придонном слоях воды на станциях отбора проб в Цимлянском водохранилище в различные периоды экспедиционных исследований в 2023–2024 гг.: *а* – весна 2024 г., поверхностный слой; *б* – лето 2024 г., поверхностный слой; *в* – лето 2024 г., придонный слой; *г* – придонный слой за период 2023–2024 гг.

Fig. 15. Dependence between CH_4 and O_2 concentrations in the surface and near-bottom water layers at the sampling stations at the Tsymlyansk Reservoir during different periods of expedition studies in the 2023–2024 period: *a* is spring 2024, surface layer; *б* is summer 2024, surface layer; *в* is near-bottom layer, summer 2024; *г* is near-bottom layer over the 2023–2024 period

Неменьший интерес вызывает и отсутствие обратной зависимости между концентрациями метана и кислорода летом 2023 г. Это явление, вероятно, связано с бурным развитием синезеленых водорослей, сопровождающимся интенсивным фотосинтезом, что приводит к увеличению концентрации кислорода и окислению метана в воде. На это указывал минимальный удельный поток метана с поверхности воды летом 2023 г. при сопоставимых концентрациях CH_4 в донных осадках в летние периоды 2023 и 2024 гг.

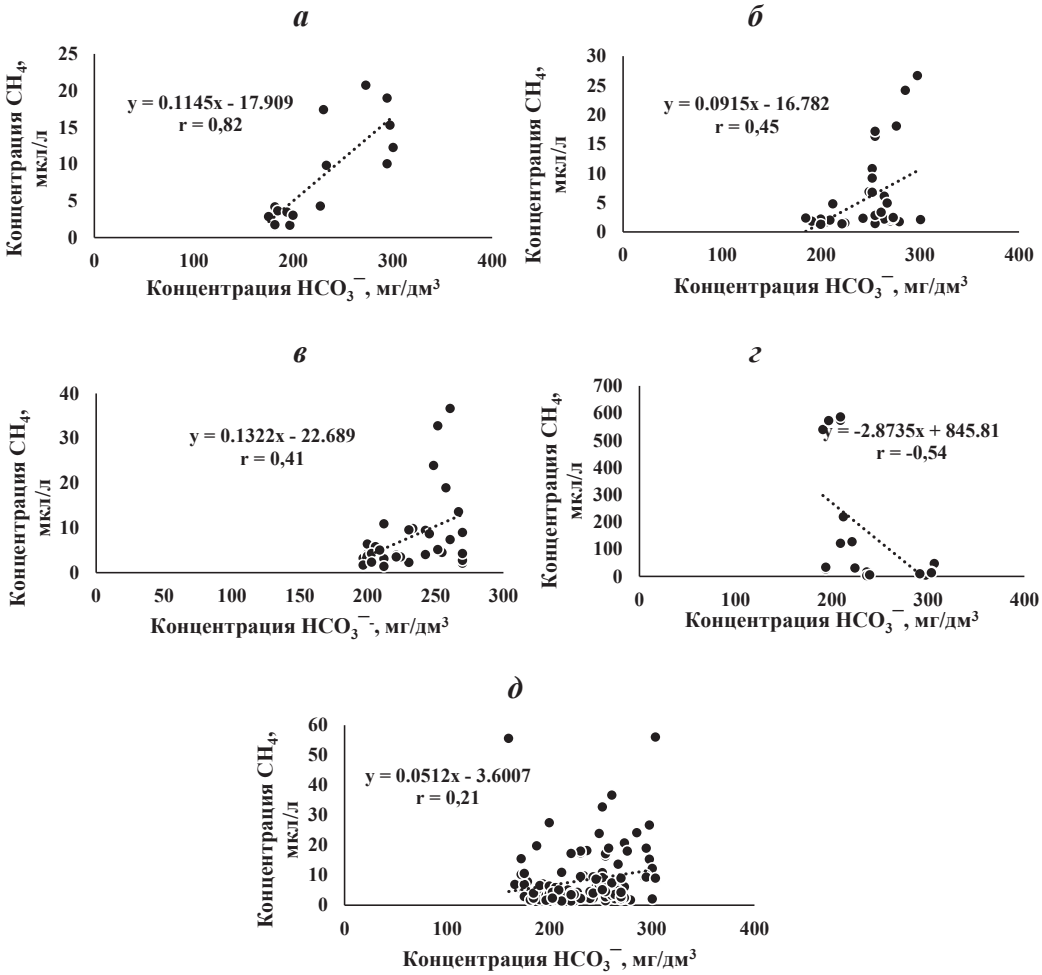


Рис. 16. Зависимость между концентрациями CH_4 и HCO_3^- в поверхностном и придонном слоях воды на станциях отбора проб в Цимлянском водохранилище в различные периоды 2023–2024 гг.: *а* – осень 2023 г., поверхностный слой; *б* – весна 2024 г., поверхностный слой; *в* – осень 2024 г., поверхностный слой; *г* – лето 2024 г., придонный слой; *д* – поверхностный слой за период 2023–2024 гг.

Fig. 16. Dependence between CH_4 and HCO_3^- concentrations in the surface and near-bottom water layers at the sampling stations at the Tsymlyansk Reservoir during different periods of expedition studies in the 2023–2024 period: *а* is autumn 2024, surface layer; *б* is spring 2024, surface layer; *в* surface layer, autumn 2024; *г* is near-bottom layer, *д* surface layer over the 2023–2024 period

Дополнительным подтверждением данной гипотезы служат значимые различия между средними значениями концентрации кислорода и pH летом 2023 г., когда оба показателя были достоверно выше, чем в 2024 г., что согласуется с усиленным потреблением CO_2 фитопланктоном и сдвигом карбонатного равновесия в щелочную область (pH > 8,4) (табл. 2).

Выявлены значимые закономерности взаимосвязи между концентрациями гидрокарбонат-ионов (HCO_3^-) и метана в водной толще Цимлянского водохранилища, демонстрирующие сезонную и вертикальную дифференциацию биогеохимических процессов (рис. 16).

В поверхностном слое воды весной и осенью 2023–2024 гг. зафиксированы достоверные прямые зависимости между содержанием гидрокарбонат-ионов и метана. Эта закономерность отражает процесс аэробного окисления CH_4, вследствие чего выделяется углекислый газ, который при растворении образует гидрокарбонат-ионы. Несмотря на то, что вклад HCO_3^-, образующихся при окислении метана, в общий пул гидрокарбонатов водохранилища относительно невелик, статистический анализ массива данных позволяет выявить и подтвердить эту закономерность на графиках.

Летом 2024 г. в придонной воде во время стратификации установились анаэробные условия, что привело к активизации метаногенеза, и, как следствие, увеличению концентрации CH_4, понижению pH до среднего значения 7,88, снижению доли гидрокарбонатов в воде в соответствии с карбонатным равновесием [19]. Понижение pH обусловлено накоплением органического углерода, в т. ч. органических кислот – промежуточных продуктов анаэробной деструкции органического вещества. В условиях дефицита растворенного кислорода подавляется аэробное окисление метана, что способствует его аккумуляции в водной толще. Одновременно сдвиг карбонатного равновесия при пониженном pH снижает долю гидрокарбонат-ионов в системе неорганического углерода (табл. 2).

Корреляционный анализ взаимосвязей между концентрациями метана, с одной стороны, и показателями растворенного (РОУ) и общего органического углерода (ООУ), с другой, показал наличие статистически значимых прямых зависимостей в поверхностном слое воды как для каждого сезона, так и для общего массива данных в 2024 г. (рис. 17). Такая связь обусловлена биогеохимической природой метана как продукта деструкции более сложных органических соединений.

Максимальная концентрация общего органического углерода в исследуемых горизонтах воды была зафиксирована весной (табл. 2), при этом доля РОУ в поверхностном слое составила 73 % от содержания ООУ, а в придонном – 63 %. Относительно невысокое соотношение РОУ/ООУ весной, в сравнении с другими сезонами, вероятно, обусловлено максимальным наполнением водохранилища. После таяния снега и льда с речным и поверхностным стоком в водоем попадает большое количество органических веществ, их постепенное осаждение в донные отложения запускает процессы микробного окисления и деструкции до более простых соединений.

В летний период наблюдались самые высокие коэффициенты корреляции между концентрациями метана и ООУ, РОУ в поверхностной воде.

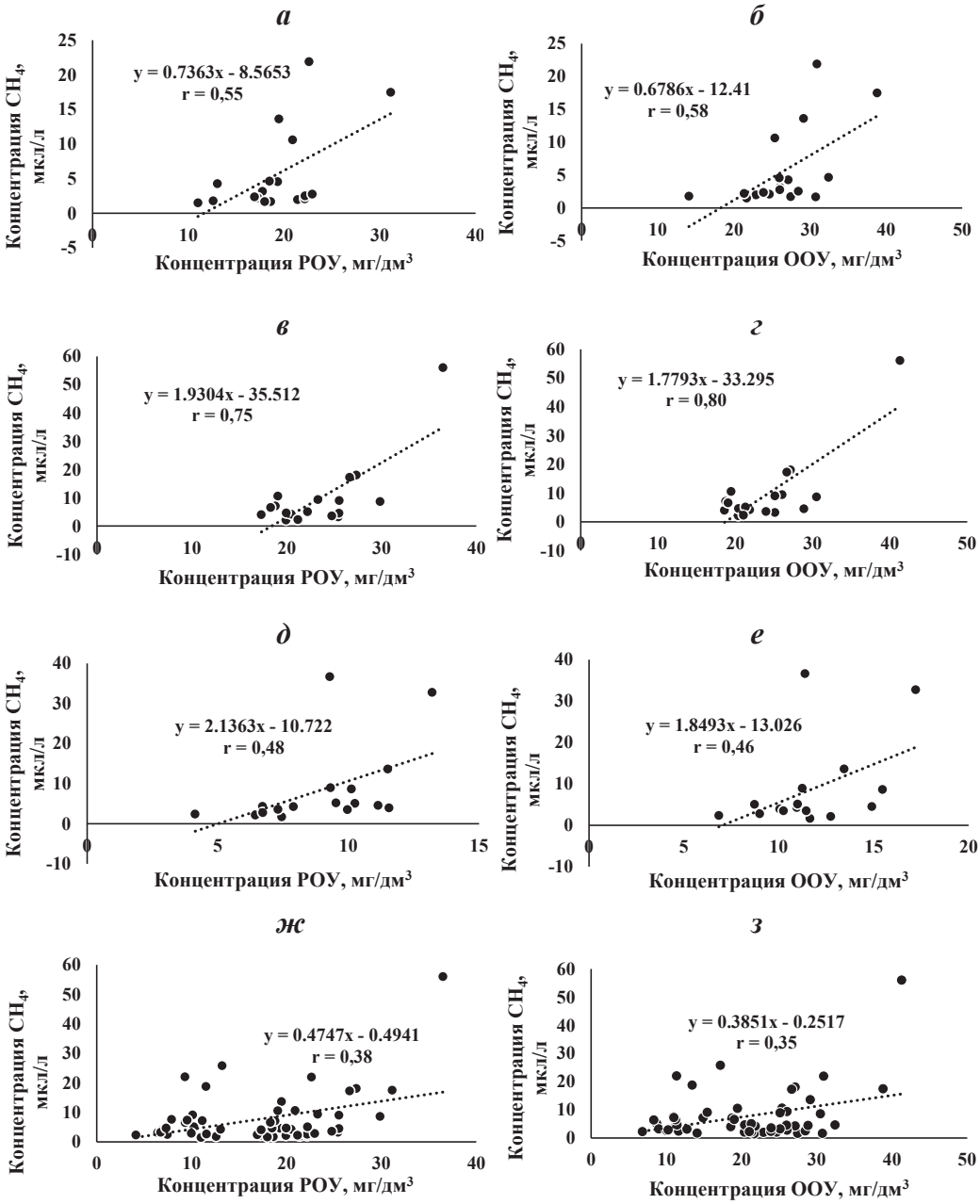


Рис. 17. Зависимость концентрации CH_4 от РОУ и ООУ- в поверхностном слое воды на станциях отбора проб в Цимлянском водохранилище в различные периоды экспедиционных исследований 2024 г.: *а, б* – весна; *в, г* – лето; *д, е* – осень; *ж, з* – поверхностный слой за 2024 г.

Fig. 17. Dependence between CH_4 and POU (dissolved organic carbon) and OOU (total organic carbon) concentrations in the surface water layer at the sampling stations at the Tsymlyansk Reservoir during different periods of expedition studies in 2024 *a, б* is spring; *в, г* is summer; *д, е* is autumn; *ж, з* is surface layer over 2024

При этом зафиксировано незначительное снижение концентрации общего органического углерода в сравнении с весенним периодом и существенное увеличение доли его растворенных форм до 97 и 99 % в поверхностной и придонной воде соответственно. Такая динамика объясняется интенсификацией биогеохимических процессов. Так, увеличение температуры воды по всему вертикальному профилю активизирует процессы жизнедеятельности микробных сообществ (поставщиков автохтонного РОУ в водоем), осаждение большей части нерастворимых органических соединений создает условия для их анаэробного разложения, в условиях стратификации вод содержание кислорода в придонной воде снижается до минимальных значений, что стимулирует метаногенез. Высокие значения концентраций CH_4 были отмечены не только в донных отложениях, но и в придонной воде, которая в этот период выступала важным источником метана [20, 21].

Осенью наблюдалось двукратное уменьшение концентрации обеих форм органического углерода в сравнении с летним периодом: доля РОУ в поверхностной воде составила 78,6 %, в придонной – 82,9 %. Снижение концентрации органического углерода к осеннему периоду закономерно и обусловлено комплексом протекающих в водохранилище биогеохимических процессов. Нарушение термической и кислородной стратификации водохранилища приводило к прекращению метаногенеза и, как следствие, к снижению его концентраций. Совокупность вышеописанных процессов выражалась в уменьшении коэффициентов корреляции обеих форм органического углерода с метаном осенью (рис. 17*д,* 17*е*).

Таким образом, поступающее весной в водохранилище органическое вещество является важным источником метана для водохранилища, который может образовываться не только в донных отложениях, но и в анаэробных микрозонах взвешенных частиц [22, 23], об этом свидетельствуют более высокие коэффициенты корреляции между CH_4 и ООУ в весенний и летний периоды.

Осенью корреляция метана от обеих форм органического углерода снижалась, что может быть следствием затухания микробиологических процессов и поступления этого газа из других источников, например донных отложений.

ВЫВОДЫ

Концентрация метана в воде Цимлянского водохранилища в 2023–2024 гг. изменялась в диапазоне от 1,5 до 585,8 мкл/л со средним значением 26,4 мкл/л. В большинстве случаев более высокими значениями CH_4 характеризовалась придонная вода, а максимальная амплитуда его содержания между дном и поверхностью зафиксирована на глубоководных При-

плотинном и Центральном плесах в период летней стратификации. Зонами повышенных концентраций метана являлись притоки рек, питающих водохранилище и его наиболее глубокие участки.

Содержание CH_4 в верхнем (0–2 см) слое донных отложений Цимлянского водохранилища варьировало в диапазоне от 0,02 до 85,7 мкг/г влажного осадка (в среднем 6,22 мкг/г). Результаты исследования пространственно-временного распределения метана в седиментах Цимлянского водохранилища выявили отчетливую сезонную и пространственную неоднородность его концентраций. Повышенные уровни содержания CH_4 стабильно наблюдались в седиментах Приплотинного и Калачевского участков на протяжении всего периода исследования, тогда как для Чирского и Центрального участков аналогичные показатели отмечались исключительно в летний период 2024 г.

Анализ сезонной изменчивости показал, что максимальные концентрации метана приходились на летние сезоны 2023 и 2024 гг., а также на осенний период 2023 г., что прямо соотносится с фазами устойчивой термической стратификации водной толщи и сопутствующей активизацией анаэробных биогеохимических процессов. Минимальные уровни содержания CH_4, напротив, были зарегистрированы весной 2024 г. и обусловлены комплексом факторов – пониженной температурой воды, замедляющей микробную активность, и интенсивным вертикальным перемешиванием водной массы, препятствующим формированию стабильных анаэробных условий, необходимых для активного протекания метаногенеза.

Значение общего удельного потока CH_4 в атмосферу с поверхности Цимлянского водохранилища варьировало в пределах 0,0003–27,8 мг $CH_4/(м^2$ час) (в среднем 1,1 мг $CH_4/(м^2$ час), при этом 92 % значений были ниже 1 мг $CH_4/(м^2$ час), а самыми высокими показателями F_{CH4} характеризовались мелководные Чирской и Калачевский участки, подверженные влиянию притоков (реки Мышкова, Солоная и Чир) и верхней русловой части водохранилища. Таким образом, зоны вблизи речных устьев выступают ключевыми участками эмиссии метана, что обусловлено поступлением с речным стоком лабильного органического вещества – субстрата для микробной продукции метана, а также мелководностью таких участков (< 7 м), сокращающей путь диффузии метана от донных отложений к поверхности, и усилением метаногенеза в донных осадках из-за повышенного привноса органики.

Ориентировочная эмиссия CH_4 с водной поверхности Цимлянского водохранилища за период с весны по осень 2024 г., рассчитанная на основе средних значений удельного потока, составила 13 278,6 т CH_4 или 9958,95 т в пересчете на углерод.

Обобщая вышеизложенное, можно утверждать, что интенсивность продукции метана в Цимлянском водохранилище имеет ярко выражен-

ную сезонность. Весной происходит насыщение воды органическим веществом и запускаются процессы его химического и биологического разложения. К лету, на фоне повышения температуры воды, в глубоководных зонах формируется термическая стратификация, что приводит к максимальной интенсификации биогеохимических процессов: фиксируется снижение водородного показателя и концентрации растворенного кислорода, а также рост доли растворенного органического углерода. В конце летнего периода нарушение стратификации способствует выносу и окислению углеродсодержащих продуктов распада ОВ, включая метан, из придонных слоев в верхние горизонты. Осенью концентрация общего органического углерода (ООУ) снижается относительно летних значений, а показатели pH и O_2 возвращаются к уровням, характерным для весеннего периода, что свидетельствует о затухании активного метаногенеза в водной толще.

Таким образом, сезонная динамика и пространственное распределение концентраций CH_4, O_2, HCO_3^- и pH отражают смену доминирующих биогеохимических процессов в водной толще Цимлянского водохранилища: от аэробного окисления метана весной и осенью до анаэробного метаногенеза в придонных слоях летом.

Полученные результаты о пространственно-временных закономерностях формирования концентраций и потоков метана в Цимлянском водохранилище позволят, с одной стороны, установить потенциал Цимлянского водохранилища к генерации CH_4 в воде и донных отложениях и интенсивность его миграции в водную толщу и атмосферу, с другой – оценить буферную способность водохранилища препятствовать высвобождению в атмосферу данного газа, что имеет важное практическое значение как для прогнозирования неблагоприятных экологических ситуаций, связанных с ухудшением химического и газового состава вод, так и для оценки региональных потоков метана в атмосферу с поверхности водных ландшафтов степной зоны России. Анализ результатов исследований открывает перспективы для разработки мероприятий, направленных на достижение Цимлянским водохранилищем углеродной нейтральности. Дальнейшее проведение исследований на карбоновом полигоне «Цимлянское водохранилище» поможет разработать рекомендации по организации и ведению мониторинга эмиссии CH_4 в атмосферу с последующей адаптацией и применением для других крупных пресноводных объектов, расположенных в степной зоне России.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

CONFLICT OF INTERESTS
The authors declare no relevant conflict of interests.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамов В. И., Власов А. В., Перфильев Д. О. Углеродный след: методы оценки, сравнение методик и перспективы расчетов в России // Креативная экономика. 2024. Т. 18. № 8. С. 2101–2124. https://doi.org/10.18334/ce.18.8.121475
2. Mikhailov D., Shazhaev I., Chumanskaya V. The prospects of AI and IoT technology development eff ect on the carbon market regulation // BIO Web of Conferences. 2022. P. 00083. https://doi.org/10.1051/bioconf/20225200083
3. Henderson P., Hu J., Romoff J., Brunskill E., Jurafsky D., Pineau J. Towards the systematic reporting of the energy and carbon footprints of machine learning //The Journal of Machine Learning Research. 2020. No. 21 (1). P. 10039–10081.
4. Kumar P., Sahu N. C., Ansari M. A., Kumar S. Climate change and rice production in India: role of ecological and carbon footprint // Journal of Agribusiness in Developing and Emerging Economies. 2021. No. 13 (2). P. 260–278.
5. Глаголев М. В., Сабреков А. Ф. Ответ А. В. Смагину: II. Углеродный баланс России // Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата. 2014. Т. 5. № 2. С. 50–70.
6. Елистратов В. В., Масликов В. И., Сидоренко Г. И., Молодцов Д. В. Выбросы парниковых газов с водохранилищ ГЭС: Анализ опыта исследований и организация проведения экспериментов в России // Альтернативная энергетика и экология. 2014. № 11 (151). С. 146–159.
7. Федоров Ю. А., Гарькуша Д. Н., Косолапов А. Е., Усова Е. В., Анпилова Е. Л., Верещагин М. А., Беляев А. И. Искусственные водоемы как очаги метаногенеза (на примере Цимлянского водохранилища) // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2024. № 3. С. 68–82. https://doi.org/10.35567/19994508-2024-3-68-82. EDN CXWKWU
8. Гречушникова М. Г., Репина И. А., Казанцев В. С., Усова Е. В., Верещагин М. А., Анпилова Е. Л. Первые результаты изучения пространственно-временной изменчивости содержания и эмиссии метана в Цимлянском водохранилище // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2024. № 2. С. 80–100. https://doi.org/10.35567/19994508-2024-2-80-100
9. Wallenius A. J., Martins Pa. D., Slomp C. P., Jetten M. S. M. Anthropogenic and Environmental Constraints on the Microbial Methane Cycle in Coastal Sediments // Front. Microbiol. 2021. Vol. 12. Article 631621.
10. Ciais P., Sabine C., Bala G., Bopp L., Brovkin V., Canadell J., Chhabra A., DeFries R., Galloway J., Heimann M., Jones C., Le Quere C., Myneni R. B., Piao S., Thornton P. Carbon and other biogeochemical cycles // Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. MA: Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, 2013. P. 465–570.
11. Conrad R. Contribution of hydrogen to methane production and control of hydrogen concentrations in methanogenic soils and sediments // FEMS Microbiology Ecology. 1999. Vol. 28. No. 3. P. 193–202.
12. Lan X., Thoning K. W., Dlugokencky E. J. Trends in globally-averaged CH4, N2O, and SF6 determined from NOAA Global Monitoring Laboratory measurements. Version 2023-12. URL: https://doi.org/10.15138/P8XG-AA10
13. Bastviken D., Cole J., Pace M., Tranvik L. Methane emissions from lakes: Dependence of lake characteristics, two regional assessments, and a global estimate // Global Biogeochem. Cycles. 2004. Vol. 18. GB4009. https://doi.org/10.1029/2004GB002238
14. Федоров Ю. А., Тамбиева Н. С., Гарькуша Д. Н., Хорошевская В. О. Метан в водных экосистемах. 2-е изд. Ростов на Дону; М., 2007. 330 с.
15. Гарькуша Д. Н., Федоров Ю. А., Тамбиева Н. С. Расчет элементов баланса метана в водных экосистемах Азовского моря и Мирового океана на основе эмпирических формул // Метеорология и гидрология. 2016. № 6. С. 48–58.

16. Гидрометеорологический режим озер и водохранилищ СССР. Цимлянское, водораздельные и Манычские водохранилища / под ред. В. А. Знаменского и В. М. Гейтенко. Л.: Гидрометеоиздат, 1977. 204 с.
17. Федоров Ю. А., Предеина Л. М. Кислород и pH в зоне смешения вод в Таганрогском заливе // В кн.: Закономерности океанографических и биологических процессов в Азовском море. Апатиты: Кольский научный центр, 2000. С. 88–99.
18. Страхов Н. М. Основы теории литогенеза. Т. II. М.: Изд-во АН СССР, 1960, 574 с.
19. Никаноров А. М., Иваник В. М. Словарь-справочник по гидрохимии и качеству вод суши (понятия и определения). Ростов-на-Дону: Институт водных проблем РАН, 2014. 548 с.
20. Ильинский В. В. Углеводородокисляющие микроорганизмы в прибрежных и открытых водах Можайского водохранилища: активность и вклад в процессы естественного очищения в летний период / В. В. Ильинский, О. В. Поршнева, М. Н. Семененко // Водные ресурсы. 1998. Т. 25. № 3. С. 335–338.
21. Гарькуша Д. Н., Федоров Ю. А., Тамбиева Н. С. Пространственно-временные закономерности распределения содержания метана в водохранилищах // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2014. № 1. С. 450–455.
22. Cynar F. J., Yayanos A. A. Enrichment and characterization of methanogenic bacterium from the oxic upper layer of the ocean // Current Microbiology. 1991. Vol. 23. P. 89–96.
23. Bianchi M., Marty D., Teyssie J. L., Fowler S. W. Strictly aerobic and anaerobic bacteria associated with sinking particulate matter and zooplankton fecal pellets // Marine ecology progress series. 1992. Vol. 88. P. 55–60.

REFERENCES

1. Abramov V. I., Vlasov A. V., Perfiliev D. O. Carbon footprint: assessment methods, comparison of methods and prospects of calculations in Russia. *Creative Economy.* 2024. Vol. 18. No. 8. P. 2101–2124. https://doi.org/10.18334/ce.18.8.121475
2. Mikhailov D., Shazhaev I., Chumanskaya V. Th e prospects of AI and IoT technology development effect on the carbon market regulation. *BIO Web of Conferences*. 2022. P. 00083. https://doi.org/10.1051/bioconf/20225200083
3. Henderson P., Hu J., Romoff J., Brunskill E., Jurafsky D., Pineau J. Towards the systematic reporting of the energy and carbon footprints of machine learning. *The Journal of Machine Learning Research*. 2020. No. 21 (1). P. 10039–10081.
4. Kumar P., Sahu N. C., Ansari M. A., Kumar S. Climate change and rice production in India: role of ecological and carbon footprint. *Journal of Agribusiness in Developing and Emerging Economies*. 2021. No. 13 (2). P. 260–278.
5. Glagolev M. V., Sabrekov A. F. Response to A. V. Smain: II. Carbon balance of Russia. *Environment dynamics and global climate change*. 2014. Vol. 5. No. 2. P. 50–70.
6. Elistratov V. V., Масликов В. И., Sidorenko G. I., Molodtsov D. V. Greenhouse gases emissions from hydro power stations' reservoirs: Analysis of the studies' experience and organization of experiments in Russia. *Alternative power industry and ecology*. 2014. No. 11 (151). P. 146–159.
7. Fedorov Y. A., Garkusha D. N., Kosolapov A. E., Usova E. V., Anpilova E. L., Vereshchagin M. A., Belayev A. I. Artificial water bodies as methane genesis centers (with the Tsymlyansk Reservoir as an example). *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2024. No. 3. P. 68–82. https://doi.org/10.35567/19994508-2024-3-68-82. EDN CXWKWU
8. Grechushnikova M. G., Repina I. A., Kazantsev V. S., Usova E. V., Vereshchagin M. A., Anpilova E. L. First results of studying of spatial/temporal variability of the methane content and emission in the Tsimlyansk reservoir. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2024. No. 2. P. 80–100. https://doi.org/10.35567/19994508-2024-2-80-100

9. Wallenius A. J., Martins Pa. D., Slomp C. P., Jetten M. S. M. Anthropogenic and Environmental Constraints on the Microbial Methane Cycle in Coastal Sediments. *Frontiers in Microbiology.* 2021. Vol. 12. Article 631621.
10. Ciais P., Sabine C., Bala G., Bopp L., Brovkin V., Canadell J., Chhabra A., DeFries R., Galloway J., Heimann M., Jones C., Le Quere C., Myneni R. B., Piao S., Thornton P. Carbon and other biogeochemical cycles. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. MA: Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, 2013. P. 465–570.
11. Conrad R. Contribution of hydrogen to methane production and control of hydrogen concentrations in methanogenic soils and sediments. *FEMS Microbiology Ecology*. 1999. Vol. 28. No. 3. P. 193–202.
12. Lan X., Thoning K. W., Dlugokencky E. J.: Trends in globally-averaged CH4, N2O, and SF6 determined from NOAA Global Monitoring Laboratory measurements. Version 2023-12. https://doi.org/10.15138/P8XG-AA10
13. Bastviken D., Cole J., Pace M., Tranvik L. Methane emissions from lakes: Dependence of lake characteristics, two regional assessments, and a global estimate. *Global Biogeochemical Cycles*. 2004. Vol. 18. GB4009. https://doi.org/10.1029/2004GB002238
14. Fedorov Y. A., Tambieva N. S., Garkusha D. N., Khoroshevskaya V. O. Methane in aquatic ecosystems. 2nd issue. Rostov-on-Don; M., 2007. 330 p.
15. Garkusha D. N., Fedorov Y. A., Tambieva N. S. Calculation of the methane balance elements in aquatic ecosystems of the Azov Sea and Global Ocean based on empiric formulas. *Meteorology and hydrology*. 2016. No. 6. P. 48–58.
16. Hydro/meteorological regime of lakes and reservoirs of the USSR. Tsymlyansk, Watershed and Manych reservoirs / edited by V. A. Znamenskiy and V. M. Geytenko. L.: Gidrometeoizdat, 1977. 204 p.
17. Fedorov Y. A., Predeina L. M. Oxygen and pH in the water mixture zone in the Taganrog Bay. *In the book: Laws of oceanographic and biological processes in the Azov Sea*. Apatity: Cola Scientific Center, 2000. P. 88–99.
18. Strakhov N. M. Basic foundations of the lythogenesis. Vol. II. M.: USSR Academy of Sciences Publishing House, 1960, 574 p.
19. Nikanorov A. M., Ivanik V. M. Reference book on hydrochemistry and inland waters quality (notions and definitions). Rostov-on-Don: RAS Institute of Water Problems, 2014. 548 p.
20. Ilyinsky V. V. Carbon-oxidizing microorganisms in offshore and open waters of the Mozhaisk Reservoir: activities and contribution in the natural purification processes during the summer / V. V. Ilyinsky, O. V. Porshneva, M. N. Semenenko. *Water resources*. 1998. Vol. 25, No. 3. P 335–338.
21. Garkusha D. N., Fedorov Y. A., Tambieva N. S. Spatial/temporal laws of the methane content distribution in reservoirs. *Geopolitics and eco/geo/dynamics of regions*. 2014. No. 1. P. 450–455.
22. Cynar F. J., Yayanos A. A. Enrichment and characterization of methanogenic bacterium from the oxic upper layer of the ocean. *Current Microbiology.* 1991. Vol. 23. P. 89–96.
23. Bianchi M., Marty D., Teyssie J. L., Fowler S. W. Strictly aerobic and anaerobic bacteria associated with sinking particulate matter and zooplankton fecal pellets. *Marine ecology progress series.* 1992. Vol. 88. P. 55–60.

Сведения об авторах:

Усова Елена Валентиновна, заведующая отделом исследования качества вод и аналитической деятельности, ФБГУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов», Россия, 344037, г. Ростов-на-Дону, ул. Ченцова, здание 10а; https://orcid.org/0009-0003-5800-3706; e-mail: chimanalit@inbox.ru

Дмитрик Леонид Юрьевич, ведущий специалист, отдел исследования качества вод и аналитической деятельности, ФБГУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного ис-

пользования и охраны водных ресурсов» (ФБГУ РосНИИВХ), Россия, 344037, г. Ростов-на-Дону, ул. Ченцова, здание 10а; https://orcid.org/0000-0002-6314-1383; e-mail: dimikarmy13@ya.ru

Анпилова Евгения Леонидовна, канд. хим. наук, старший научный сотрудник, отдел исследования качества вод и аналитической деятельности, ФБГУ РосНИИВХ, Россия, 344037, г. Ростов-на-Дону, ул. Ченцова, здание 10а; https://orcid.org/0009-0009-2196-809X; e-mail: anpilova.jane@gmail.com

Федоров Юрий Александрович, д-р геогр. наук, профессор, заведующий кафедрой физической географии, экологии и охраны природы, Институт наук о Земле, Южный федеральный университет, Россия, 344090, г. Ростов-на-Дону, ул. Р. Зорге, 40; https://orcid.org/0000-0001-7411-3030; e-mail: fedorov@sfedu.ru

Гарькуша Дмитрий Николаевич, канд. геогр. наук, доцент кафедры физической географии, экологии и охраны природы, Институт наук о Земле. Южный федеральный университет, Россия, 344090, г. Ростов-на-Дону, ул. Р. Зорге, 40; https://orcid.org/0000-0001-5026-2103; e-mail: gardim@sfedu.ru

Верещагин Михаил Алексеевич, гидрохимик 1-й категории, отдел исследования качества вод и аналитической деятельности, ФБГУ РосНИИВХ, Россия, 344037, г. Ростов-на-Дону, ул. Ченцова, здание 10а; https://orcid.org/0009-0004-9841-7644; e-mail: zigr57@gmail.com

Чернышенко Елена Романовна, гидрохимик, отдел исследования качества вод и аналитической деятельности, ФБГУ РосНИИВХ, Россия, 344037, г. Ростов-на-Дону, ул. Ченцова, здание 10а; https://orcid.org/0009-0003-5107-4683; e-mail: elenachernyshenko210@gmail.com

About the authors:

Elena V. Usova, Head, Department of Water Quality Research and Analytical Activities, “RosNIIVKh”, ul. Chentsova, 10a, Rostov-on-Don, 344037, Russia; https://orcid.org/0009-0003-5800-3706; e-mail: chimanalit@inbox.ru

Leonid Y. Dmitrik, Leading Specialist, Department of Water Quality Research and Analytical Activities, “RosNIIVKh”, ul. Chentsova, 10a, Rostov-on-Don, 344037, Russia; https://orcid.org/0000-0002-6314-1383; e-mail: dimikarmy13@ya.ru

Evgeniya L. Anpilova, Candidate of Chemical Sciences, Senior Researcher, Department of Water Quality Research and Analytical Activities, RosNIIVKh, ul. Chentsova, 10a, Rostov-on-Don, 344037, Russia; https://orcid.org/0009-0009-2196-809X; e-mail: anpilova.jane@gmail.com

Yuri A. Fedorov, Doctor of Geography, Professor, Head of the Department of Physical Geography, Ecology and Nature Conservation at the Institute of Earth Sciences of the Southern Federal University, ul. R. Sorge, 40, Rostov-on-Don, 344090, Russia; https://orcid.org/0000-0001-7411-3030; e-mail: fedorov@sfedu.ru

Dmitry N. Garkusha, PhD in Geography, Associate Professor of the Department of Physical Geography, Ecology and Nature Conservation at the Institute of Earth Sciences of the Southern Federal University, ul. R. Sorge, 40, Rostov-on-Don, 344090, Russia; https://orcid.org/0000-0001-5026-2103; e-mail: gardim@sfedu.ru

Mikhail A. Vereshchagin, Hydro/chemist of the 1st category, Department of Water Quality Research and Analytical Activities, RosNIIVKh, ul. Chentsova, 10a, Rostov-on-Don, 344037, Russia; https://orcid.org/0009-0004-9841-7644; e-mail: zigr57@gmail.com

Elena R. Chernyshenko, Hydro/chemist, Department of Water Quality Research and Analytical Activities of FSBI RosNIIVKh, ul. Chentsova, 10a, Rostov-on-Don, 344037, Russia; https://orcid.org/0009-0003-5107-4683; e-mail: elenachernyshenko210@gmail.com

Поступила в редакцию / Received 13.03.2026.
Поступила после рецензирования / Revised 20.03.2026.
Принята к публикации / Accepted 6.04.2026.