

**Валентина Петровна Зерницкая¹, Борис Павлович Власов²,
Евгений Александрович Кухарик³, Нина Юрьевна Суховило⁴, Анна Михайловна Кухарик⁵**

¹д-р геогр. наук, доц., гл. науч. сотрудник лаб. современной геодинамики и палеогеографии
Института природопользования Национальной академии наук Беларуси

²д-р геогр. наук, проф., гл. науч. сотрудник науч.-исслед. лаб. озераведения
Белорусского государственного университета

³канд. геол.-минерал. наук, доц., зав. лаб. современной геодинамики и палеогеографии
Института природопользования Национальной академии наук Беларуси

⁴канд. геогр. наук, зав. науч.-исслед. лаб. озераведения
Белорусского государственного университета

⁵инженер лаб. биогеохимии и агроэкологии Института природопользования
Национальной академии наук Беларуси

Valentina Zernitskaya¹, Boris Vlasov², Evgeniy Kukharik³, Nina Sukhovilo⁴, Anna Kukharik⁵

¹Doctor of Geographical Sciences, Associate Professor, Chief Researcher
of the Laboratory of Modern Geodynamics and Paleogeography of the Institute for Nature Management
of National Academy of Sciences of Belarus

²Doctor of Geographical Sciences, Professor, Chief Researcher of the Laboratory of Lake Research
of Belarusian State University

³Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Associate Professor,
Head of the Laboratory of Modern Geodynamics and Paleogeography
of Institute for Nature Management of National Academy of Sciences of Belarus

⁴Candidate of Geographical Sciences, Head of the Laboratory of Lake Research
of Belarusian State University

⁵Research Engineer of the Laboratory of Biogeochemistry and Agroecology
of the Institute for Nature Management of National Academy of Sciences of Belarus
e-mail: ¹valzern@gmail.com

О СОВРЕМЕННОМ СОСТОЯНИИ ИССЛЕДОВАНИЙ ГАЗОВОГО СОСТАВА ВОД И ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ОЗЕР*

Проанализирован фактический материал о современном состоянии изученности газового режима вод и донных отложений озер в различных регионах мира. Рассмотрена динамика выбросов метана и диоксида углерода с поверхности континентальных водоемов и их воздействие на глобальные биогеохимические циклы, приведены количественные оценки эмиссии, полученные разными авторами. Показано, что вследствие антропогенных изменений природной среды происходит трансформация особенностей формирования и динамики газового состава озерных экосистем. Выяснено, что для оперативной оценки объемов выбросов парниковых газов в атмосферу в настоящее время широко применяются методы дистанционного зондирования в сочетании с технологиями моделирования. Сделан вывод, что, несмотря на существенный интерес к рассматриваемой в статье проблематике, специальные исследования по территории Беларуси практически отсутствуют. Это обуславливает необходимость постановки научно-исследовательских работ с целью выявления особенностей формирования и динамики газового состава водоемов страны и определения их вклада в эмиссию парниковых газов.

Ключевые слова: озеро, газовый состав, озерные воды, донные отложения, метан, диоксид углерода, эмиссия.

The Current State of the Gas Composition Research of Lake Water and Bottom Sediments

The article contains analysis of extensive factual material on the research of the gas regime of waters and bottom sediments of lake reservoirs in various regions of the world. The dynamics of methane and carbon dioxide emissions from the surface of continental water bodies and their impact on global biogeochemical cycles are considered. Quantitative estimates of emissions of these gases obtained by different authors are given. It is shown that due to anthropogenic changes of the natural environment, there are also changes

*Исследование выполнено в рамках НИР «Изучение особенностей накопления и распределения газов в воде и донных отложениях разнотипных озер Беларуси и их роль в формировании экологического состояния водоемов» ГПНИ «Природные ресурсы и окружающая среда» на 2021–2025 гг.

in formation and dynamics of the gas composition of lake ecosystems. It was found that remote sensing methods in combination with modeling technologies are currently widely used for the prompt assessment of greenhouse gas emissions into the atmosphere. It is concluded that despite significant interest in the issues discussed special studies on the territory of Belarus are practically absent. This necessitates the organization of research work in order to identify the features of formation and dynamics of the gas composition in the reservoirs all around the country and determine their contribution to greenhouse gas emissions.

Key words: lake, gas composition, lake water, bottom sediments, methane, carbon dioxide, emission.

Введение

Пресноводные озера, хотя и покрывают небольшую часть поверхности Земли, оказывают значительное влияние на погоду и климат в регионах, а также играют важную роль в глобальном углеродном цикле посредством эмиссии углекислого газа и метана в атмосферу. В связи с этим изучение процессов, происходящих в озерных водоемах и обеспечивающих формирование и динамику их газового состава, является весьма актуальной.

Исследования накопления и распределения газов в озерах, направленные на предотвращение последствий природно-антропогенного влияния, проводятся в различных университетах и научных учреждениях мира. Наиболее значимые научные результаты получены в Институте водных проблем РАН, Институте географии РАН, МГУ имени М. В. Ломоносова, Линчепингском университете и Центре исследований климатических воздействий (Швеция), Швейцарском федеральном институте водных исследований и технологий и Институте биогеохимии и динамики загрязнителей (Швейцария), Жешувском университете (Польша), Нанкинском институте географии и лимнологии Китайской академии наук, Университете Витовта Великого (Литва), Университете Северной Каролины (США) и др. В то же время интерес к выявлению особенностей формирования газового режима озер обусловлен и тем, что выбросы метана (CH_4) и углекислого газа (CO_2) в атмосферу непосредственно влияют на происходящее потепление климата [1–3].

Цель статьи – анализ отечественного и международного опыта изучения особенностей формирования и динамики газового состава озер.

Материалы и методы исследования

Проведенное исследование базируется на анализе зарубежных и отечественных опубликованных источников, включающих монографические издания, статьи из научных периодических изданий, материалов конференций и совещаний разного уровня, касающихся вопроса формирования и динамики газового состава озерных водоемов в связи с определением эмиссии парниковых газов в атмосферу.

Результаты и их обсуждение

Метан. В Шестом оценочном докладе МГЭИК (AR6) подробно рассмотрена динамика выбросов метана и диоксида углерода из озер и их воздействие на глобальные биогеохимические циклы. Анализ данных об эмиссии газов из озер показывает, что они являются значимыми источниками поступления метана в атмосферу, особенно в условиях тундры или влажных тропических лесов. Здесь метан образуется и выделяется путем диффузии и в виде пузырьков. Глобальный вклад озер в эмиссию метана возрастает главным образом за счет эвтрофикации континентальных водоемов. Это приводит к изменению состава атмосферы и ее разогреву. Учитывая, что метан является более сильным парниковым газом по сравнению с CO_2 , его вклад в повышение температуры воздуха на планете весьма существенен. Так, общее выделение метана из озер мира (включая прибрежные мангровые леса и приливные зоны) оценивается примерно в 9–22 Тг/год при среднем значении около 13 Тг/год, или 13 млн т/год. По данным [4], влияние антропогенных изменений природной среды

и климатических факторов может увеличивать эти значения, особенно за счет усиления разложения органического вещества и таяния многолетней мерзлоты. Это подтверждается материалами мониторинговых наблюдений. Согласно предварительным данным Службы по контролю за изменением климата программы «Коперник», в 2020 г. концентрация метана в атмосфере достигла максимальных значений за всю историю спутниковых наблюдений, проводимых с 2003 г. Эксперты Глобального углеродного проекта [5] отмечают, что в 2017 г. концентрация метана в воздухе увеличилась на 9 % по сравнению с 2000–2006 гг., и называют сельское хозяйство и переработку отходов основными источниками эмиссии метана [6].

Известно, что при эмиссии CO_2 он остается в атмосфере в течение 300 лет, в то время как CH_4 – чуть более 10 лет. Сокращая объемы выброса метана, можно оперативно замедлить темпы происходящих климатических изменений. Стратегия Европейского союза по сокращению выбросов метана [7] ставит целью снизить его эмиссию в Европе на 35–37 % к 2030 г. по сравнению с 2005 г. посредством совершенствования законодательного регулирования в области учета и измерения всех выбросов метана, связанных с энергетикой, использования спутниковых данных для обнаружения суперизлучателей метана, а также путем создания Международной обсерватории выбросов метана. Стратегия ставит задачу повышения качества контроля и учета выбросов метана главным образом с помощью сервисов Службы мониторинга атмосферы (CAMS). В США реализуется программа REMEDY, в рамках которой разрабатываются технологии снижения выбросов метана в нефтегазовой и угольной промышленности. 45 стран, на долю которых приходится 3/4 мировых выбросов метана, поддержали Глобальную инициативу по метану [8], направленную на снижение объемов его выбросов в этих промышленных отраслях.

В последние годы во всем мире активно развиваются методы и технологии изучения и учета источников поступления метана в атмосферу с использованием дистанционного зондирования Земли [9–15]. Среди основных методов дистанционного зондирования для оценки выбросов CH_4 выделяются следующие: определение спектральных индексов на основе оптических данных, радиолокационные методы для мониторинга пузырьковой эмиссии метана и комбинированные методы с привлечением моделирования. Например, инструмент для мониторинга тропосферы TROPOMI позволяет обнаружить суперэмиттеров метана, после чего информация о подозрительных локациях передается спутниковой системе для получения детального изображения местности и определения инфраструктуры, ответственной за выбросы. Европейский технологический стартап Kayros использует данные спутника Sentinel-5P, а также материалы дистанционных съемок и технологии искусственного интеллекта для глобального мониторинга уровня метана на разработанной платформе Methane Watch.

Большое число исследований посвящено количественной оценке эмиссии парниковых газов. Они проводятся по всему земному шару и охватывают регионы с различными геологическими и климатическими особенностями и уровнем хозяйственной освоенности. Эмиссия метана на единицу площади озера варьируется в зависимости от климатического пояса, что связано с различиями в температуре воздуха, характеристиках снежного покрова и длительности сезона активной эмиссии. В более теплых экваториальных, тропических и субтропических регионах Земли показатели эмиссии на 1 м^2 значительно выше, поскольку высокая температура воздуха стимулирует биогеохимические процессы, увеличивая концентрацию и диффузию метана. В умеренных широтах, например, в бореальных и суббореальных регионах, показатели ниже из-за короткого сезона активной эмиссии и низких температур воздуха зимой, что снижает активность биоты.

В полярных и тундровых регионах, где вода замерзает на длительное время и биотическая активность минимальна, эмиссия на единицу площади очень низка, особенно зимой. В течение короткого сезона активной эмиссии показатели увеличиваются, но в среднем остаются ниже, чем у тропических водоемов. В целом можно сказать, что на единицу площади озера сумма выбросов метана значительно возрастает с переходом от холодных к теплым климатическим поясам, что обусловлено климатическими условиями, поддерживающими более интенсивные биохимические процессы.

Рассмотрим некоторые количественные оценки поступления метана в атмосферу из озер и водохранилищ, расположенных в различных природно-климатических условиях. Для озер бассейна р. Амазонки поток метана составляет 0–34 мг/м²/сут. [16] и 27–230 мг/м²/сут. [16; 17]. Оценки потока метана из озер Канады и США показывают, что его величина изменяется в пределах 0,006–46 мг/м²/сут. [18]. Согласно [19], в озерах штата Северная Каролина (США) интенсивность выделения метана в атмосферу лежит в пределах 39–425 мг/сут., а годовая эмиссия составляет 1,3 моль/м² за счет диффузии и сопоставима с величиной пузырьковой эмиссии. Таким образом, за один год выделяется примерно 2,6 моль/м² метана, или 41,6 г/м². В озерах штата Аляска (США) диапазоны эмиссий метана варьируются в зависимости от типа водоема и его размеров. Показано, что небольшие озера имеют более высокие уровни эмиссии на единицу площади водной поверхности, чем крупные водоемы. Например, эмиссия метана для термокарстовых озер в районе г. Фэрбанкса составляет около 4–135 г/м²/год [20]. Такие большие различия подчеркивают важность учета размера озер и их трофности при оценке региональных эмиссий парниковых газов. На территории бывшего СССР насчитывается 2,8 млн озер с общей площадью водного зеркала около 490 тыс. км². В соответствии с данными [21] скорость выделения метана составляет 23 ± 23 мг/м²/сут., а общая эмиссия метана в атмосферу составляет примерно $1,1 \pm 1,1$ Тг/год. В термокарстовых водоемах Северной Сибири годовая эмиссия метана в среднем оценивается в $127,8 \pm 24,0$ г/м²/год [22].

Эмпирические зависимости концентрации и эмиссии метана от различных морфометрических и гидробиологических характеристик озер изучались на примере водоемов штата Аляска (США), Канады и других регионов. На примере озер Канады было показано, что в среднем за день в донных осадках производится около 3,3 ммоль/м² CH₄, из которых примерно 33 % уходит в атмосферу в виде пузырьковой эмиссии. Значительная часть вариации связана с характеристиками бассейна (например, рельефом). Озера с более равнинными (плоскогорья и равнины) водосборами демонстрируют более высокие доли пузырьковой эмиссии, что связано с особенностями гидрогеохимических условий [23].

Анализ эмиссии метана и углекислого газа из трех эвтрофных водохранилищ на юго-востоке Польши в 2009–2011 гг. и 2018–2019 гг. показал, что потоки CH₄ и CO₂ существенно различаются: для CH₄ они варьируют в вдхр. Жешув от 0 до 1817,0 ммоль·м⁻²·сут.⁻¹, в вдхр. Мазярня – от 0 до 758,18 ммоль·м⁻²·сут.⁻¹, а в вдхр. Нелиш – от 0 до 2513,48 ммоль·м⁻²·сут.⁻¹; для CO₂ – в вдхр. Жешув они варьируют от 6,06 до 621,69 ммоль·м⁻²·сут.⁻¹, в вдхр. Мазярня – от –10,96 до 138,33 ммоль·м⁻²·сут.⁻¹, а в вдхр. Нелиш – от –4,63 до 495,35 ммоль·м⁻²·сут.⁻¹. Среди наиболее важных факторов, влияющих на формирование потоков CH₄ и CO₂, исследователи называют температуру воды, содержание органических веществ, pH воды и донных отложений, а также возраст водохранилища [24]. По данным изучения выбросов метана и углекислого газа из вдхр. Валье-де-Браво (Мексика), расположенного в тропическом регионе, выбросы метана колеблются от 23,25 до 1220,80 ммоль·м⁻²·сут., а выбросы CO₂ – от –60,11 до 254,99 ммоль·м⁻²·сут. Основной вклад в эмиссию

происходит во время осеннего перемешивания. Также было установлено, что запасы парниковых газов в условиях термической стратификации составили 58 % от их совокупных годовых выбросов [25].

Накопление и систематизация данных по содержанию метана в разнообразных водоемах и водотоках суши [26–31] показали, что этот газ постоянно присутствует в воде и донных отложениях, а его уровень отражает интенсивность и направленность продукционно-деструкционных процессов, а следовательно, степень эвтрофирования и загрязнения органическими веществами водных объектов. Концентрация метана в воде водохранилищ занимает промежуточное положение между величинами его содержания в воде озер и равнинных рек с приуроченностью наибольшего количества значений к интервалу 5,0 – 40,0 мкл/л. Характерно снижение концентрации газа в воде при удалении от прибрежной зоны к открытой акватории с минимальными концентрациями в поверхностном слое воды центральной глубоководной части котловины. Максимальные концентрации метана в воде и донных отложениях приурочены к участкам, испытывающим сильное антропогенное воздействие. Сезонные изменения концентраций метана, как правило, характеризуются возрастанием от весны к лету и снижением в осенне-зимний период. По данным [32], на озерах Севера России, а также на Горьковском и Можайском водохранилищах обнаружено, что придонный слой водоемов насыщен растворенным метаном. В ночное время регулярно наблюдалось увеличение концентрации метана и в воздухе, что связано с его эмиссией из озера. Увеличение объема поступления метана в атмосферу ночью совпадает с конвективными периодами в водоемах. Эти процессы могут увеличить скорость переноса и, следовательно, усилить диффузионный поток метана. В соответствии с изложенными выше фактами анализ содержания растворенных газов в водах и донных отложениях водохранилищ дает возможность считать их важным региональным источником поступления метана в атмосферу.

В работе [33] проанализированы результаты изучения распределения концентраций метана в воде открытой акватории и северной оконечности оз. Байкал, а также в истоке р. Ангары в сентябре 2016 и 2019 гг. Для выявления корреляционных связей наряду с метаном также определялись различные гидрохимические показатели (температура, pH, концентрации O_2 , взвешенных веществ, C_{org} , N_{org} , P_{org} , минеральных соединений азота и фосфора). Концентрация метана в воде оз. Байкал варьировала в 2016 г. в пределах 0,44–3,41 мкл/дм³ (в среднем 0,80 мкл/дм³), в 2019 г. – 0,20 – 5,19 мкл/дм³ (в среднем 1,22 мкл/дм³). Максимальная концентрация метана отмечена в водной массе наиболее глубоководной центральной части котловины озера, минимальная – в южной. Для мелководных участков минимальные концентрации метана отмечались в прибрежной зоне зал. Лиственничный, максимальные – в северной части озера, куда впадает большое количество рек, а также в пределах Селенгинского мелководья. Для большинства как глубоководных, так и мелководных станций наблюдения отмечался пик подповерхностного максимума концентраций метана на глубинах 25–50 м (зона термоклина), после чего его концентрации, как правило, снижались, достигая минимальных значений либо в промежуточной водной толще, либо в придонных слоях. Мелководные участки, помимо более высоких концентраций метана по сравнению с глубоководными, отличались также и большей контрастностью его распределения по вертикали водной толщи. Анализ корреляционных зависимостей между исследуемыми гидрохимическими показателями выявил наличие значимых прямых связей концентраций метана с концентрациями C_{org} и N_{org} и обратных – с концентрациями O_2 .

На территории Республики Беларусь специальные работы по оценке эмиссии метана из торфяных месторождений в атмосферу начаты в 2010 г. и проводились

в рамках белорусско-немецко-британского проекта «Восстановление торфяников Беларуси и применение концепции их устойчивого управления – снижение воздействия на климат с эффектом для экономики и биоразнообразия». Целью работы была оценка годового баланса эмиссий метана с осушенного и повторно заболоченного торфяного месторождения с различным уровнем залегания грунтовых вод, различным составом произрастающей растительности и землепользованием исследуемой территории. Результаты полевых измерений эмиссии метана в течение года камерно-статическим методом на осушенной и повторно заболоченной части торфяного месторождения низинного типа «Выгонощанское» представлены в работе [34]. Установлено, что наибольшие суммарные эмиссии метана наблюдались с торфяника с повышенным уровнем грунтовых вод и доминирующим видом *Phalaris arundinacea* (канареечник тростниковидный), на котором не осуществлялось кошение биомассы. Они составили 142,03 кг/га/год CH_4 , при кошении биомассы эмиссии метана уменьшились примерно на 30 %.

На территориях с глубоким залеганием грунтовых вод определяющим фактором для эмиссий метана является наличие шунтирующих видов. Так, на площадке с доминирующим видом *Juncus effusus* (ситник развесистый) суммарные эмиссии метана составили 17,40 кг/га/год, а на площадке без шунтирующих видов наблюдалось суммарное поглощение метана – 0,33 кг/га/год CH_4 . В целом уровень эмиссии метана зависел от температурных факторов, уровня грунтовых вод и наличия видов растений с аэренхимой. При этом наибольшие значения эмиссии метана наблюдались с мая по июль.

Результаты проведенных наблюдений позволили сделать вывод, что при высоких температурах окружающей среды и почвы эмиссии метана выше, чем при низких температурах. Уровень эмиссии метана также зависит от произрастающей на исследуемой территории растительности. Наибольшее суммарное поступление метана наблюдалось с торфяника с повышенным уровнем грунтовых вод с доминирующим видом *Phalaris arundinacea*, на котором не осуществлялось кошение биомассы. Утверждается, что для большего понимания процессов баланса углерода в атмосфере необходимо дальнейшее более детальное и длительное измерение потоков метана, как и других парниковых газов.

Кислород. Кислородный режим является важной физико-химической характеристикой биологических систем и находится в тесной взаимосвязи с антропогенным воздействием на водные экосистемы [35]. Изучение кислородного режима озер Южного Приаралья [36] показало, что содержание кислорода по станциям озер и каналов очень вариабельно, зависит от множества факторов и определяется сезоном года. В период весенней и осенней гомотермии и полного перемешивания водной массы растворенный кислород распределен в толще воды равномерно. Концентрация его в это время составляет 5,7–12,62 мг O_2 /л, что не превышает 100 % насыщения. Летом содержание кислорода в поверхностном слое озер колеблется от 8,0 до 10,2 мг O_2 /л, что соответствует 99,0 – 121 % насыщения. Снижение концентрации кислорода в природных слоях может достигать нулевых значений.

При выполнении рыбоводных работ особое внимание уделяется изучению кислородного режима водоемов, т. к. наличие в воде растворенного кислорода – обязательное условие для существования большинства водных организмов. Потребность в кислороде у отдельных видов рыб различна. Так, для нормальной жизнедеятельности лососевых концентрация кислорода должна быть 8–11 мг/л, а для карповых – 5,8 мг/л, при концентрациях ниже 3,0 мг/л возникает угроза гибели рыб. В воде открытых водоемов содержание кислорода не должно быть менее 4 мг/л, в противном

случае могут начаться анаэробные процессы распада органического вещества и «загнивания» воды [37].

Особое место среди водоемов гумидной зоны умеренного пояса занимают озера с кислой реакцией среды, отличающиеся слабой активностью биогеохимических процессов (ацидотрофные озера). Изучению гидрохимического режима ацидотрофных озер Беларуси посвящено исследование [38]. Показано, что в восьми ацидотрофных озерах по сравнению с концом 1970-х – началом 1980-х гг. повысился уровень минерализации воды и концентрации аммоний-иона, а также снизились значения содержания кислорода, растворенного в водной массе, и прозрачность. В озерах Свитязь и Белое (Лунинецкий р-н) летом у дна формируется сероводородная зона. Это свидетельствует об ухудшении экологического состояния ацидотрофных озер. Так, в оз. Свитязь, где в гипolimнии также отсутствует растворенный кислород, вода начинает приобретать запах сероводорода с глубины 9 м. Следует отметить, что с момента первого полевого обследования кислородный режим ацидотрофных озер ухудшился: в большинстве водоемов появилась отсутствовавшая ранее кислородная стратификация, а в озерах Свитязь и Белое (Лунинецкий р-н) в гипolimнии сформировалась сероводородная зона, что свидетельствует об их неблагоприятном экологическом состоянии.

Диоксид углерода. Этот газ содержится в воде в основном в виде растворенных молекул CO_2 , и лишь малая часть его (около 1 %) при взаимодействии с водой образует угольную кислоту. Концентрация диоксида углерода в природных водах колеблется от нескольких десятых долей до 3–4 мг/дм³, изредка достигая 10–20 мг/дм³. Обычно весной и летом содержание диоксида углерода в водоеме понижается, а в конце зимы достигает максимума. Диоксид углерода имеет большое значение для растительных организмов, в то же время повышенные концентрации CO_2 угнетающе действуют на животные организмы. При высоких концентрациях CO_2 воды становятся агрессивными по отношению к металлам и бетону [39–41].

Неуклонный рост концентрации CO_2 в атмосфере Земли представляет глобальную экологическую проблему и является одной из причин климатических изменений [41]. Анализ потоков углерода исторически сосредоточен на изучении наземных и океанических экосистем [42; 43]. Однако наличие массовых дисбалансов в пределах континентальных балансов [44] стимулировало исследование роли озер как возможных неучтенных составляющих углеродного бюджета [45]. Предпринятые попытки оценить ежегодную эмиссию CO_2 озерами мира показали, что озерная вода в большинстве случаев перенасыщена углекислым газом [46]. Тем не менее роль пресноводных экосистем в балансе диоксида углерода остается недостаточно ясной, а результаты, полученные в разных регионах земного шара, часто противоречивы. Так, отсутствуют четкие представления о внутриэкосистемных факторах, обуславливающих направление и величину углеродного баланса (эмиссия/сток) в течение всего вегетационного сезона [47–49]. Это дает основания утверждать, что роль пресноводных экосистем в мировом углеродном цикле может быть существенной и озера должны учитываться в региональных бюджетах углерода, особенно в озерных ландшафтах.

Анализ литературных источников, связанных с изучением газового состава вод и донных отложений озер Беларуси, показал, что комплексные исследования в этом направлении не проводились. В работе М. В. Мартыновой с соавторами [50] отражена информация о газовом составе илов оз. Нарочь в свете влияния на него зоопланктона. В результате выполненного исследования установлено, что основной газ в верхнем слое илов малого плеса оз. Нарочь – азот (N_2), а пространственное распределение азота, углерода и метана регулируется разными причинами. Обнаружены высокие корреляции CH_4 с температурой среды, содержанием и численностью моллюсков

в карбонатных илах. Эти связи объясняются колебаниями плотности пространственного распределения моллюсков, а также их жизнедеятельностью (например, концентрирование органического вещества некоторыми видами моллюсков при фильтрации ими воды), усиливающей метанообразование. Концентрация CO_2 значимо коррелирует только с содержанием органики в илах. Общий механизм пространственного распределения газов в илах не выявлен: концентрация CO_2 связана с распределением органического вещества, содержание N_2 – с содержанием в илах легкодоступных форм азота и, возможно, MnO_2 , а содержание CH_4 – с численностью моллюсков. Влияние макрозообентоса сказывается только на пространственном распределении в илах метана. Основной структурообразующий фактор рассмотренной системы малого плеса оз. Нарочь – температура среды.

Предварительные результаты измерений содержания метана в донных отложениях озер Белорусского Поозерья отражены в работе [51]. Исследование газовой выделений проводилось в декабре 2018 г. на озерах Ушачской группы (Долгое, Вечелье, Березовское, Кривое). При отборе проб с поверхности озера использовался метод закрытых плавающих камер. Модифицированный метод закрытых донных камер, суть которого заключается в наращивании эффективной длины камеры посредством соединения стандартных открытых с противоположных сторон специальных модулей, применялся для отбора проб с поверхности дна. Отбор проб в обоих случаях осуществлялся в вакуумированные колбочки через каждые 10 мин. Измерения содержания газов (CH_4 , CO_2 , N_2O) выполнялись в лабораторных условиях на газовом хроматографе. В результате проведенных исследований установлено, что концентрации парниковых газов в донных отложениях озер с глубиной возрастают и достигают достаточно больших значений – на порядок выше, чем на поверхности. Можно предположить, что микробиогенный газ, образующийся в верхнем пятисантиметровом слое, подпитывается эндогенными источниками.

В работе [52], посвященной оценке углеродного баланса за вегетационный сезон (май–сентябрь) на примере оз. Нарочь впервые получены содержания CO_2 прямыми инструментальными измерениями на основе инфракрасной спектроскопии с использованием закрытых камер. Проведенные исследования показывают, что в наиболее активный этап вегетационного периода экосистема озера поглощает углекислый газ из атмосферы. По полученным скоростям обменных процессов газов с атмосферой в виде стока оз. Нарочь сходно с оз. Байкал: $5,5 - 8,6 \text{ гCO}_2/\text{м}^2$ за сезон (май–сентябрь) в оз. Нарочь и $6,5 - 7,0 \text{ гCO}_2/\text{м}^2/\text{год}$ в период открытой воды в оз. Байкал [53].

В целом полученные данные об обменных процессах углекислого газа с атмосферой в оз. Нарочь согласуются с рядом исследований, проведенных на других озерных водоемах. Кроме того, в настоящее время не выявлено четких критериев предсказания потока CO_2 в озерах разного типа. Направление потока в слаботрофном озере, таком как Нарочь, должно быть сдвинуто в сторону эмиссии CO_2 . Однако полученные данные показывают, что суммарный поток озера сдвинут в сторону стока углекислого газа из атмосферы. Такие противоречия могут быть обусловлены различиями в методологии проводимых измерений. На оз. Нарочь ежегодно проводятся комплексные гидробиологические исследования, что позволило сравнить сезонный ход потока диоксида углерода с гидробиологическими параметрами, среди которых наиболее интересны продукционно-деструкционные процессы. Отмечено наличие общего направления сезонных изменений и в продукционно-деструкционных параметрах (аэробная деструкция и величина фотосинтеза), и в потоке диоксида углерода.

В начале сезона показатели продукции и деструкции имеют наименьшие значения, увеличиваясь к середине и концу сезона. Суммарный сток углерода из атмо-

сферы через поверхность оз. Нарочь в форме диоксида углерода составил 128,6 т, из них через литораль из атмосферы в воду поступило 26,3 т, а через пелагиаль – 102,3 т.

Заклучение

Выполненный анализ состояния изученности газового состава озерных водоемов в различных регионах мира показал, что к настоящему времени накоплен обширный фактический материал по особенностям формирования и динамики газового состава континентальных водоемов, расположенных в различных природных условиях. Получены оригинальные данные по эмиссии парниковых газов в атмосферу с применением как классических методов полевых измерений, так и новейших технологий, базирующихся на данных дистанционного зондирования Земли и компьютерного моделирования. В настоящее время организованы и проводятся мониторинговые наблюдения за эмиссией метана и диоксида углерода с целью учета и контроля суперэмиттеров и определения вклада озерных водоемов в общее поступление этих газов в атмосферу. Показано, что для территории Беларуси результаты подобных исследований практически отсутствуют, опубликованные оценки газового режима вод и донных отложений озер страны касаются единичных замеров на отдельных водоемах. Это обуславливает необходимость постановки специальных исследований с целью изучения процессов формирования и динамики газового состава вод и донных отложений в разнотипных озерах Беларуси и определения эмиссии метана и диоксида углерода в атмосферу.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бажин, Н. М. Метан в окружающей среде : аналит. обзор / М. Н. Бажин. – Новосибирск : ГПНТБ СО РАН, 2010. – 56 с.
2. Beaulieu, J. J. Eutrophication will increase methane emissions from lakes and impoundments during the 21st century / J. J. Beaulieu, T. DelSontro, J. A. Downing // Nature Communications. – 2019. – Vol. 10. – Article number: 1375. – DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09100-5>.
3. Methane in Lakes: Variability in Stable Carbon Isotopic Composition and the Potential Importance of Groundwater Input / J. Schenk, H. O. Sawakuchi, A. K. Sieczko [et al.] // Frontiers in Earth Science. – 2021. – Vol. 9. – P. 1–15. – <https://doi.org/10.3389/feart.2021.722215>.
4. Global Carbon and other Biogeochemical Cycles and Feedbacks / J. G. Canadell, P. M. S. Monteiro, M. H. Costa [et al.] // Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. – Cambridge ; New York : Cambridge University Press, 2021. – P. 673–816. – <https://doi.org/10.1017/9781009157896.007>.
5. Global Carbon Budget 2022 / P. Friedlingstein, M. O’Sullivan, M. W. Jones [et al.] // Earth System Science Data. – 2022. – Vol. 14 (11). – P. 4811–4900. – <https://doi.org/10.5194/essd-14-4811-2022>.
6. Взгляд на метан : отчет Международного наблюдательного центра за выбросами метана за 2021 год : Программа по окружающей среде ООН [сайт]. – URL: <https://www.unep.org/ru/resources/doklad/vzglyad-na-metan-otchet-mezhdunarodnogo-nablyudatel'nogo-centra-za-vybrosami-metana> (дата обращения: 07.07.2025).
7. Европейская комиссия принимает Стратегию ЕС по метану в рамках Европейского зеленого соглашения : Climate & Clear Air Coalition [сайт]. – URL: <https://www.ccacoalition.org/ru/news/european-commission-adopts-eu-methane-strategy-part-european-green-deal> (дата обращения: 07.07.2025).
8. Глобальная инициатива по метану (GMI) : Climate & Clear Air Coalition [сайт]. – URL: <https://www.ccacoalition.org/ru/partners/global-methane-initiative-gmi> (дата обращения: 07.07.2025).
9. Remote sensing methodology for the estimation of methane emissions from Chinese lakes / F. Breda, M. Cremonini, J. Gao [et al.] // 2008 International Workshop on Earth Observation and

- Remote Sensing Applications (EORSA 2008). – P. 1–6. – <https://doi.org/10.1109/EORSA.2008.4620289>.
10. Freshwater Methane Emissions Offset the Continental Carbon Sink / D. Bastviken, L. J. Tranvik, J. A. Downing [et al.] // *Science*. – 2011. – Vol. 331 (6013). – P. 1–50. – <https://doi.org/10.1126/science.1196808>.
11. Quantification of Diffusive Methane Emissions from a Large Eutrophic Lake with Satellite Imagery / H. Duan, Q. Xiao, T. Qi [et al.] // *Environmental Science & Technology*. – 2023. – Vol. 57 (36). – P. 13520–13529. – <https://doi.org/10.1021/acs.est.3c05631>.
12. Synthetic aperture radar (SAR) backscatter response from methane ebullition bubbles trapped by thermokarst lake ice / M. Engram, K. Walter Anthony, F. J. Meyer, G. Grosse // *Canadian Journal of Remote Sensing*. – 2013. – Vol. 38 (6). – P. 667–682. – <https://doi.org/10.5589/m12-054>.
13. Jaywant, S. Remote Sensing Techniques for Water Quality Monitoring: A Review / S. A. Jaywant, K. M. Arif // *Sensors*. – 2024. – Vol. 24. – P. 1–31. – <https://doi.org/10.3390/s24248041>.
14. LAKE 2.0: a model for temperature, methane, carbon dioxide and oxygen dynamics in lakes / V. Stepanenko, I. Mammarella, A. Ojala [et al.] // *Geoscientific Model Development*. – 2016. – Vol. 9 (5). – P. 1977–2006. – <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1977-2016>.
15. Tan, Z. Modeling methane emissions from arctic lakes: Model development and site-level study / Z. Tan, Q. Zhuang, K. Walter Anthony // *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*. – 2015. – Vol. 7 (2). – P. 459–483. – <https://doi.org/10.1002/2014MS000344>.
16. Tropospheric methane from an Amazonian floodplain lake / P. M. Crill, K. B. Bartlett, J. O. Wilson [et al.] // *Journal of Geophysical Research*. – 1988. – Vol. 93 (D2). – P. 1564–1570. – <https://doi.org/10.1029/JD093iD02p01564>.
17. Methane flux from the central Amazonian floodplain / K. B. Bartlett, P. M. Crill, D. I. Sebacher [et al.] // *Journal of Geophysical Research*. – 1988. – Vol. 93 (D2). – P. 1571–1582. – <https://doi.org/10.1029/JD093iD02p01571>.
18. Zhang, Y. Transient projections of permafrost distribution in Canada during the 21st century under scenarios of climate change / Y. Zhang, W. Chen, D. W. Riseborough // *Global and Planetary Change*. – 2008. – Vol. 60 (3/4). – P. 443–456. – <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2007.05.003>.
19. Chanton, J. P. Gas transport from methane-saturated, tidal freshwater and wetland sediments / J. P. Chanton, C. S. Martens, C. A. Kelley // *Limnology and Oceanography*. – 1989. – Vol. 34 (5). – P. 807–819. – <https://doi.org/10.4319/lo.1989.34.5.0807>.
20. Remote sensing northern lake methane ebullition / M. Engram, K. M. Walter Anthony, T. Sachs [et al.] // *Nature Climate Change*. – 2020. – Vol. 10. – P. 511–517. – <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0762-8>.
21. Miller, L. G. Methane efflux from the pelagic regions of four lakes / L. G. Miller, R. S. Oremland // *Global Biogeochemical Cycles*. – 1988. – Vol. 2 (3). – P. 269–277. – <https://doi.org/10.1029/GB002i003p00269>.
22. Methane bubbling from Siberian thaw lakes as a positive feedback to climate warming / K. M. Walter, S. A. Zimov, J. P. Chanton [et al.] // *Nature*. – 2006. – Vol. 441. – P. 71–75. – <https://doi.org/10.1038/nature05040>.
23. Kim, J. A simple approach to quantifying whole-lake methane ebullition and sedimentary methane production, and its application to the Canadian Lake Pulse dataset / J. Kim, S. D. Thottathil, Y. T. Prairie // *Limnology and Oceanography*. – 2025. – Vol. 70 (2). – P. 393–410. – <https://doi.org/10.1002/lno.12767>.
24. Gruca-Rokosz, R. Quantitative Fluxes of the Greenhouse Gases CH₄ and CO₂ from the Surfaces of Selected Polish Reservoirs / R. Gruca-Rokosz // *Atmosphere*. – 2020. – Vol. 11 (3). – P. 1–15. – <https://doi.org/10.3390/atmos11030286>.
25. Limnological dynamics of methane (CH₄) and carbon dioxide (CO₂) emissions from a tropical hypertrophic reservoir lake / O. Gerardo-Nieto, M. Merino-Ibarra, S. Sánchez-Carrillo [et al.] // *Journal of Water and Climate Change*. – 2024. – Vol. 15 (5). – P. 2364–2378. – <https://doi.org/10.2166/wcc.2024.723>.

26. Гарькуша, Д. Н. Метан в устьевой области реки Дон / Д. Н. Гарькуша, Ю. А. Федоров. – Ростов н/Д. : Ростиздат, 2010. – 181 с.
27. Гарькуша, Д. Н. Метан в воде и донных отложениях устьевой области Северной Двины (Белое море) / Д. Н. Гарькуша, Ю. А. Федоров, М. И. Хромов // Океанология. – 2010. – Т. 50, № 4. – С. 534–547.
28. Федоров, Ю. А. Первые данные о распределении содержания биогенного метана в воде и донных отложениях оз. Байкал / Ю. А. Федоров, А. М. Никаноров, Н. С. Тамбиева // Доклады Российской академии наук. – 1997. – Т. 353, № 3. – С. 394–397.
29. Федоров, Ю. А. Влияние природных и антропогенных факторов и процессов на распределение концентрации метана в воде и донных отложениях Ладожского озера / Ю. А. Федоров, Н. С. Тамбиева, Д. Н. Гарькуша // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. – 2006. – № 5. – С. 412–424.
30. Федоров, Ю. А. Метан как показатель экологического состояния пресноводных водоемов (на примере озер Валдай и Ужин) / Ю. А. Федоров, Н. С. Тамбиева, Д. Н. Гарькуша // Метеорология и гидрология. – 2004. – № 6. – С. 88–96.
31. Метан в водных экосистемах / Ю. А. Федоров, Н. С. Тамбиева, Д. Н. Гарькуша, В. О. Хорошевская. – 2-е изд., перераб. и доп. – Ростов н/Д. : Ростиздат, 2007. – 330 с.
32. Эмиссия метана из северных озер и водохранилищ по данным наблюдений / А. И. Репина, А. Ю. Артамонов, М. Г. Гречушникова [и др.] // Тез. докл. Всерос. науч. конф. «Фундаментальные проблемы экологии России», Иркутск – пос. Листвянка (оз. Байкал), 25 июня – 1 июля 2017 г. – Иркутск : Изд-во Ин-та географии им. В. Б. Сочавы СО РАН, 2017. – С. 157.
33. Распределение метана в водах озера Байкал / Д. Н. Гарькуша, Ю. А. Федоров, Н. С. Тамбиева [и др.] // Водные ресурсы. – 2023. – Т. 50, № 3. – С. 308–323. – <https://doi.org/10.31857/S0321059623020098>.
34. Эмиссии метана на торфяном месторождении низинного типа «Выгонощанское» при различном уровне грунтовых вод / Т. Д. Ярмошук, В. А. Ракович, М. Минке, А. Тиле // Природопользование. – 2013. – Вып. 24. – С. 43–51.
35. Kenrick, F. B. Supersaturation of gases in liquids / F. B. Kenrick, K. L. Wismer, K. S. Wyatt // The Journal of Physical Chemistry. – 1924. – Vol. 28 (12). – P. 1308–1315. – <https://doi.org/10.1021/j150246a010>.
36. Качество поверхностных вод низовьев Амударьи в условиях антропогенного преобразования пресноводного стока / Ч. А. Абдиров, Л. Г. Константинова, Е. К. Курбанбаев, Г. Г. Константинова. – Ташкент : Фан, 1996. – 112 с.
37. Бахиева, Л. А. Газовый режим в озерах Южного Приаралья в новых условиях существования / А. Л. Бахиева // Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe (East European Scientific Journal). – 2016. – Nr 8 (5). – P. 10–11.
38. Гидрохимический режим кислототрофных озер Беларуси в условиях климатических изменений и антропогенной нагрузки / Н. Ю. Суховило, А. И. Мороз, А. А. Новик, Д. Б. Власова // Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология. – 2023. – № 2. – С. 58–69.
39. Вредные химические вещества. Неорганические соединения элементов I–IV групп / А. Л. Бандман, Г. А. Гудзовский, Л. С. Дубейковская [и др.]; под ред. В. А. Филовой, Б. А. Ивина, В. А. Филовой. – Л. : Химия, 1988. – 512 с.
40. Справочник по гидрохимии / А. М. Никаноров, М. Г. Тарасов, Ю. А. Федоров [и др.]; под ред. А. М. Никанорова. – Л. : Гидрометеиздат, 1989. – 390 с.
41. Evolution of natural and anthropogenic fluxes of atmospheric CO₂ from 1957 to 2003 / C. D. Keeling, S. C. Piper, T. P. Whorf, R. F. Keeling // Tellus B. – 2010. – Vol. 63 (1). – P. 1–22. – <https://doi.org/10.1111/j.1600-0889.2010.00507.x>.
42. The Global Carbon Cycle: A Test of Our Knowledge of Earth as a System / P. Falkowski, R. J. Scholes, E. Boyle [et al.] // Science. – 2000. – Vol. 290 (5490). – P. 291–296. – <https://doi.org/10.1126/science.290.5490.291>.
43. Watson, A. J. Carbon dioxide fluxes in the global ocean // A. J. Watson, J. C. Orr // Ocean biogeochemistry: the role of the ocean carbon cycle in global change. Global Change – The IGBP Series / M. J. R. Fasham (ed.) [et al.]. – Berlin : Springer-Verlag, 2003. – P. 123–143. – https://doi.org/10.1007/978-3-642-55844-3_6.

44. A Large Terrestrial Carbon Sink in North America Implied by Atmospheric and Oceanic Carbon Dioxide Data and Models / S. Fan, M. Gloor, J. Mahlman [et al.] // *Science*. – 1998. – Vol. 282 (5388). – P. 442–446. – <https://doi.org/10.1126/science.282.5388.442>.
45. Climate change and lakes: Estimating sensitivities of water and carbon budgets / J. A. Cardille, S. R. Carpenter, J. A. Foley [et al.] // *Journal of Geophysical Research. Biogeosciences*. – 2009. – Vol. 114 (G3). – P. 1–11. – <https://doi.org/10.1029/2008JG000891>.
46. Carbon Dioxide Supersaturation in the Surface Waters of Lakes / J. J. Cole, N. F. Caraco, G. W. Kling, T. K. Kratz // *Science*. – 1994. – Vol. 265 (5178). – P. 1568–1570. – <https://doi.org/10.1126/science.265.5178.1568>.
47. Balmer, M. B. Carbon dioxide concentrations in eutrophic lakes: undersaturation implies atmospheric uptake / M. B. Balmer, J. A. Downing // *Inland Waters*. – 2011. – Vol. 1 (2). – P. 125–132. – <https://doi.org/10.5268/IW-1.2.366>.
48. Anas, M. U. M. Carbon budgets of boreal lakes: state of knowledge, challenges, and implications / M. U. M. Anas, K. A. Scott, B. Wissel // *Environmental Reviews*. – 2015. – Vol. 23 (3). – P. 275–287. – <https://doi.org/10.1139/er-2014-0074>.
49. Observed variability of Lake Superior pCO₂ / N. Atilla, G. A. McKinley, V. Bennington [et al.] // *Limnology and Oceanography*. – 2011. – Vol. 56 (3). – P. 775–786. – <https://doi.org/10.4319/lo.2011.56.3.0775>.
50. Мартынова, М. В. О газовом составе илов оз. Нарочь (в свете влияния на него зообентоса) / М. В. Мартынова, Т. В. Жукова, Э. П. Жуков // *Водные ресурсы*. – 1999. – Т. 26, № 4. – С. 478–483.
51. Предварительные результаты измерений содержания метана в донных отложениях озер Белорусского Поозерья / А. М. Павлюченко, С. И. Зуй, Б. П. Власов [и др.] // *Проблемы геологии Беларуси и смежных территорий : материалы междунар. науч. конф., посвящ. 100-летию со дня рождения акад. НАН Беларуси Александра Семеновича Махнача, Минск, 21–22 нояб. 2018 г. / Ин-т природопользования НАН Беларуси ; редкол.: А. А. Махнач [и др.]. – Мн. : СтройМедиаПроект, 2018. – С. 244–247.*
52. Сезонный баланс потоков CO₂ через поверхность озера Нарочь (Беларусь) на основе ИК спектроскопии с использованием закрытых камер / З. А. Ничипорович, Б. В. Адамович, А. М. Павлюченко [и др.] // *Журнал прикладной спектроскопии*. – 2020. – Т. 87, № 1. – С. 78–83.
53. Estimation of CO₂ fluxes in the «atmosphere–water» system in the south Lake Baikal littoral with the floating chamber method / V. M. Domysheva, D. A. Pestunov, M. V. Sakirko [et al.] // *Atmospheric and Oceanic Optics*. – 2015. – Vol. 28. – P. 543–550. – <https://doi.org/10.1134/S1024856015060044>.

REFERENCES

1. Bazhin, N. M. Metan v okruzhayushchei srede : analit. obzor / M. N. Bazhin. – Novosibirsk : GPNTB SO RAN, 2010. – 56 s.
2. Beaulieu, J. J. Eutrophication will increase methane emissions from lakes and impoundments during the 21st century / J. J. Beaulieu, T. DelSontro, J. A. Downing // *Nature Communications*. – 2019. – Vol. 10. – Article number: 1375. – DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09100-5>.
3. Methane in Lakes: Variability in Stable Carbon Isotopic Composition and the Potential Importance of Groundwater Input / J. Schenk, H. O. Sawakuchi, A. K. Sieczko [et al.] // *Frontiers in Earth Science*. – 2021. – Vol. 9. – P. 1–15. – <https://doi.org/10.3389/feart.2021.722215>.
4. Global Carbon and other Biogeochemical Cycles and Feedbacks / J. G. Canadell, P. M. S. Monteiro, M. H. Costa [et al.] // *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. – Cambridge ; New York : Cambridge University Press, 2021. – P. 673–816. – <https://doi.org/10.1017/9781009157896.007>.
5. Global Carbon Budget 2022 / P. Friedlingstein, M. O’Sullivan, M. W. Jones [et al.] // *Earth System Science Data*. – 2022. – Vol. 14 (11). – P. 4811–4900. – <https://doi.org/10.5194/essd-14-4811-2022>.
6. Vzgljad na metan : otchet Mezhdunarodnogo nablyudatel’nogo tsentra za vybrosami metana za 2021 god : Programma po okruzhayushchei srede OON [sait]. – URL:

<https://www.unep.org/ru/-resources/doklad/vzglyad-na-metan-otchet-mezhdunarodnogo-nablyudatel-nogo-centra-za-vybrosami-metana> (data obrashcheniya: 07.07.2025).

7. Evropeiskaya komissiya prinimaet Strategiyu ES po metanu v ramkakh Evropeiskogo zelenogo soglasheniya : Climate & Clear Air Coalition [sait]. – URL: <https://www.ccacoalition.org/ru/news/european-commission-adopts-eu-methane-strategy-part-european-green-deal> (data obrashcheniya: 07.07.2025).

8. Global'naya initsiativa po metanu (GMI) : Climate & Clear Air Coalition [sait]. – URL: <https://www.ccacoalition.org/ru/partners/global-methane-initiative-gmi> (data obrashcheniya: 07.07.2025).

9. Remote sensing methodology for the estimation of methane emissions from Chinese lakes / F. Breda, M. Cremonini, J. Gao [et al.] // 2008 International Workshop on Earth Observation and Remote Sensing Applications (EORSA 2008). – P. 1–6. – <https://doi.org/10.1109/EORSA.2008.4620289>.

10. Freshwater Methane Emissions Offset the Continental Carbon Sink / D. Bastviken, L. J. Tranvik, J. A. Downing [et al.] // Science. – 2011. – Vol. 331 (6013). – P. 1–50. – <https://doi.org/10.1126/science.1196808>.

11. Quantification of Diffusive Methane Emissions from a Large Eutrophic Lake with Satellite Imagery / H. Duan, Q. Xiao, T. Qi [et al.] // Environmental Science & Technology. – 2023. – Vol. 57 (36). – P. 13520–13529. – <https://doi.org/10.1021/acs.est.3c05631>.

12. Synthetic aperture radar (SAR) backscatter response from methane ebullition bubbles trapped by thermokarst lake ice / M. Engram, K. Walter Anthony, F. J. Meyer, G. Grosse // Canadian Journal of Remote Sensing. – 2013. – Vol. 38 (6). – P. 667–682. – <https://doi.org/10.5589/m12-054>.

13. Jaywant, S. Remote Sensing Techniques for Water Quality Monitoring: A Review / S. A. Jaywant, K. M. Arif // Sensors. – 2024. – Vol. 24. – P. 1–31. – <https://doi.org/10.3390/s24248041>.

14. LAKE 2.0: a model for temperature, methane, carbon dioxide and oxygen dynamics in lakes / V. Stepanenko, I. Mammarella, A. Ojala [et al.] // Geoscientific Model Development. – 2016. – Vol. 9 (5). – P. 1977–2006. – <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1977-2016>.

15. Tan, Z. Modeling methane emissions from arctic lakes: Model development and site-level study / Z. Tan, Q. Zhuang, K. Walter Anthony // Journal of Advances in Modeling Earth Systems. – 2015. – Vol. 7 (2). – P. 459–483. – <https://doi.org/10.1002/2014MS000344>.

16. Tropospheric methane from an Amazonian floodplain lake / P. M. Crill, K. B. Bartlett, J. O. Wilson [et al.] // Journal of Geophysical Research. – 1988. – Vol. 93 (D2). – P. 1564–1570. – <https://doi.org/10.1029/JD093iD02p01564>.

17. Methane flux from the central Amazonian floodplain / K. B. Bartlett, P. M. Crill, D. I. Sebacher [et al.] // Journal of Geophysical Research. – 1988. – Vol. 93 (D2). – P. 1571–1582. – <https://doi.org/10.1029/JD093iD02p01571>.

18. Zhang, Y. Transient projections of permafrost distribution in Canada during the 21st century under scenarios of climate change / Y. Zhang, W. Chen, D. W. Riseborough // Global and Planetary Change. – 2008. – Vol. 60 (3/4). – P. 443–456. – <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2007.05.003>.

19. Chanton, J. P. Gas transport from methane-saturated, tidal freshwater and wetland sediments / J. P. Chanton, C. S. Martens, C. A. Kelley // Limnology and Oceanography. – 1989. – Vol. 34 (5). – P. 807–819. – <https://doi.org/10.4319/lo.1989.34.5.0807>.

20. Remote sensing northern lake methane ebullition / M. Engram, K. M. Walter Anthony, T. Sachs [et al.] // Nature Climate Change. – 2020. – Vol. 10. – P. 511–517. – <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0762-8>.

21. Miller, L. G. Methane efflux from the pelagic regions of four lakes / L. G. Miller, R. S. Oremland // Global Biogeochemical Cycles. – 1988. – Vol. 2 (3). – P. 269–277. – <https://doi.org/10.1029/GB002i003p00269>.

22. Methane bubbling from Siberian thaw lakes as a positive feedback to climate warming / K. M. Walter, S. A. Zimov, J. P. Chanton [et al.] // Nature. – 2006. – Vol. 441. – P. 71–75. – <https://doi.org/10.1038/nature05040>.

23. Kim, J. A simple approach to quantifying whole-lake methane ebullition and sedimentary methane production, and its application to the Canadian Lake Pulse dataset / J. Kim, S. D. Thottathil, Y. T. Prairie // *Limnology and Oceanography*. – 2025. – Vol. 70 (2). – P. 393–410. – <https://doi.org/10.1002/lno.12767>.
24. Gruca-Rokosz, R. Quantitative Fluxes of the Greenhouse Gases CH₄ and CO₂ from the Surfaces of Selected Polish Reservoirs / R. Gruca-Rokosz // *Atmosphere*. – 2020. – Vol. 11 (3). – P. 1–15. – <https://doi.org/10.3390/atmos11030286>.
25. Limnological dynamics of methane (CH₄) and carbon dioxide (CO₂) emissions from a tropical hypertrophic reservoir lake / O. Gerardo-Nieto, M. Merino-Ibarra, S. Sánchez-Carrillo [et al.] // *Journal of Water and Climate Change*. – 2024. – Vol. 15 (5). – P. 2364–2378. – <https://doi.org/10.2166/wcc.2024.723>.
26. Gar’kusha, D. N. Metan v ust’evoi oblasti reki Don / D. N. Gar’kusha, Yu. A. Fedorov. – Rostov n/D. : Rostizdat, 2010. – 181 s.
27. Gar’kusha, D. N. Metan v vode i donnykh otlozheniyakh ust’evoi oblasti Severnoi Dviny (Beloe more) / D. N. Gar’kusha, Yu. A. Fedorov, M. I. Khromov // *Okeanologiya*. – 2010. – T. 50, № 4. – S. 534–547.
28. Fedorov, Yu. A. Pervye dannye o raspredelenii sodержaniya biogennogo metana v vode i donnykh otlozheniyakh oz. Baikal / Yu. A. Fedorov, A. M. Nikanorov, N. S. Tambieva // *Doklady Rossiiskoi akademii nauk*. – 1997. – T. 353, № 3. – S. 394–397.
29. Fedorov, Yu. A. Vliyanie prirodnykh i antropogennykh faktorov i protsessov na raspredelenie kontsentratsii metana v vode i donnykh otlozheniyakh Ladozhskogo ozera / Yu. A. Fedorov, N. S. Tambieva, D. N. Gar’kusha // *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya. Gidrogeologiya. Geokriologiya*. – 2006. – № 5. – S. 412–424.
30. Fedorov, Yu. A. Metan kak pokazatel’ ekologicheskogo sostoyaniya presnovodnykh vodoemov (na primere ozer Valdai i Uzhin) / Yu. A. Fedorov, N. S. Tambieva, D. N. Gar’kusha // *Meteorologiya i gidrologiya*. – 2004. – № 6. – S. 88–96.
31. Metan v vodnykh ekosistemakh / Yu. A. Fedorov, N. S. Tambieva, D. N. Gar’kusha, V. O. Khoroshevskaya. – 2-e izd., pererab. i dop. – Rostov n/D. : Rostizdat, 2007. – 330 s.
32. Emissiya metana iz severnykh ozer i vodokhranilishch po dannym nablyudenii / A. I. Repina, A. Yu. Artamonov, M. G. Grechushnikova [i dr.] // *Tez. dokl. Vseros. nauch. konf. «Fundamental’nye problemy ekologii Rossii»*, Irkutsk – pos. Listvyanka (oz. Baikal), 25 iyunya – 1 iyulya 2017 g. – Irkutsk : Izd-vo In-ta geografii im. V. B. Sochavy SO RAN, 2017. – S. 157.
33. Raspredelenie metana v vodakh ozera Baikal / D. N. Gar’kusha, Yu. A. Fedorov, N. S. Tambieva [i dr.] // *Vodnye resursy*. – 2023. – T. 50, № 3. – S. 308–323. – <https://doi.org/10.31857/S0321059623020098>.
34. Emissii metana na torfyanom mestorozhdenii nizinnogo tipa «Vygonoshchanskoe» pri razlichnom urovne gruntovykh vod / T. D. Yarmoshuk, V. A. Rakovich, M. Minke, A. Tile // *Prirodopol’zovanie*. – 2013. – Vyp. 24. – S. 43–51.
35. Kenrick, F. B. Supersaturation of gases in liquids / F. B. Kenrick, K. L. Wismer, K. S. Wyatt // *The Journal of Physical Chemistry*. – 1924. – Vol. 28 (12). – P. 1308–1315. – <https://doi.org/10.1021/j150246a010>.
36. Kachestvo poverkhnostnykh vod nizov’ev Amudar’i v usloviyakh antropogennogo preobrazovaniya presnovodnogo stoka / Ch. A. Abdirov, L. G. Konstantinova, E. K. Kurbanbaev, G. G. Konstantinova. – Tashkent : Fan, 1996. – 112 s.
37. Bakhieva, L. A. Gazovyi rezhim v ozerakh Yuzhnogo Priaral’ya v novykh usloviyakh sushchestvovaniya / A. L. Bakhieva // *Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe (East European Scientific Journal)*. – 2016. – Nr 8 (5). – P. 10–11.
38. Gidrokhimicheskii rezhim atsidotrofnyykh ozer Belarusi v usloviyakh klimaticheskikh izmenenii i antropogennoi nagruzki / N. Yu. Sukhovilo, A. I. Moroz, A. A. Novik, D. B. Vlasova // *Zhurnal Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Geografiya. Geologiya*. – 2023. – № 2. – S. 58–69.
39. Vrednye khimicheskie veshchestva. Neorganicheskie soedineniya elementov I–IV grupp / A. L. Bandman, G. A. Gudzovskii, L. S. Dubeikovskaya [i dr.] ; pod red. V. A. Filova, B. A. Ivina, V. A. Filova. – L. : Khimiya, 1988. – 512 s.

40. Spravochnik po gidrokhimii / A. M. Nikanorov, M. G. Tarasov, Yu. A. Fedorov [i dr.] ; pod red. A. M. Nikanorova. – L. : Gidrometeoizdat, 1989. – 390 s.
41. Evolution of natural and anthropogenic fluxes of atmospheric CO₂ from 1957 to 2003 / C. D. Keeling, S. C. Piper, T. P. Whorf, R. F. Keeling // *Tellus B.* – 2010. – Vol. 63 (1). – P. 1–22. – <https://doi.org/10.1111/j.1600-0889.2010.00507.x>.
42. The Global Carbon Cycle: A Test of Our Knowledge of Earth as a System / P. Falkowski, R. J. Scholes, E. Boyle [et al.] // *Science.* – 2000. – Vol. 290 (5490). – P. 291–296. – <https://doi.org/10.1126/science.290.5490.291>.
43. Watson, A. J. Carbon dioxide fluxes in the global ocean // A. J. Watson, J. C. Orr // *Ocean biogeochemistry: the role of the ocean carbon cycle in global change. Global Change – The IGBP Series / M. J. R. Fasham (ed.) [et al.]*. – Berlin : Springer-Verlag, 2003. – P. 123–143. – https://doi.org/10.1007/978-3-642-55844-3_6.
44. A Large Terrestrial Carbon Sink in North America Implied by Atmospheric and Oceanic Carbon Dioxide Data and Models / S. Fan, M. Gloor, J. Mahlman [et al.] // *Science.* – 1998. – Vol. 282 (5388). – P. 442–446. – <https://doi.org/10.1126/science.282.5388.442>.
45. Climate change and lakes: Estimating sensitivities of water and carbon budgets / J. A. Cardille, S. R. Carpenter, J. A. Foley [et al.] // *Journal of Geophysical Research. Biogeosciences.* – 2009. – Vol. 114 (G3). – P. 1–11. – <https://doi.org/10.1029/2008JG000891>.
46. Carbon Dioxide Supersaturation in the Surface Waters of Lakes / J. J. Cole, N. F. Caraco, G. W. Kling, T. K. Kratz // *Science.* – 1994. – Vol. 265 (5178). – P. 1568–1570. – <https://doi.org/10.1126/science.265.5178.1568>.
47. Balmer, M. B. Carbon dioxide concentrations in eutrophic lakes: undersaturation implies atmospheric uptake / M. B. Balmer, J. A. Downing // *Inland Waters.* – 2011. – Vol. 1 (2). – P. 125–132. – <https://doi.org/10.5268/IW-1.2.366>.
48. Anas, M. U. M. Carbon budgets of boreal lakes: state of knowledge, challenges, and implications / M. U. M. Anas, K. A. Scott, B. Wissel // *Environmental Reviews.* – 2015. – Vol. 23 (3). – P. 275–287. – <https://doi.org/10.1139/er-2014-0074>.
49. Observed variability of Lake Superior pCO₂ / N. Atilla, G. A. McKinley, V. Bennington [et al.] // *Limnology and Oceanography.* – 2011. – Vol. 56 (3). – P. 775–786. – <https://doi.org/10.4319/lo.2011.56.3.0775>.
50. Martynova, M. V. O gazovom sostave ilov oz. Naroch' (v svete vliyaniya na nego zoo-bentosa) / M. V. Martynova, T. V. Zhukova, E. P. Zhukov // *Vodnye resursy.* – 1999. – T. 26, № 4. – S. 478–483.
51. Predvaritel'nye rezul'taty izmerenii sodержaniya metana v donnykh otlozheniyakh ozer Belorusskogo Poozer'ya / A. M. Pavlyuchenko, S. I. Zui, B. P. Vlasov [i dr.] // *Problemy geologii Belarusi i smezhnykh territorii : materialy mezhdunar. nauch. konf., posvyashch. 100-letiyu so dnya rozhdeniya akad. NAN Belarusi Aleksandra Semenovicha Makhnacha, Minsk, 21–22 noyab. 2018 g. / In-t prirodopol'zovaniya NAN Belarusi ; redkol.: A. A. Makhnach [i dr.]*. – Mn. : StroiMediaProekt, 2018. – S. 244–247.
52. Sezonnyi balans potokov SO₂ cherez poverkhnost' ozera Naroch' (Belarus') na osnove IK spektroskopii s ispol'zovaniem zakrytykh kamer / Z. A. Nichiporovich, B. V. Adamovich, A. M. Pavlyuchenko [i dr.] // *Zhurnal prikladnoi spektroskopii.* – 2020. – T. 87, № 1. – S. 78–83.
53. Estimation of CO₂ fluxes in the «atmosphere–water» system in the south Lake Baikal littoral with the floating chamber method / V. M. Domysheva, D. A. Pestunov, M. V. Sakirko [et al.] // *Atmospheric and Oceanic Optics.* – 2015. – Vol. 28. – P. 543–550. – <https://doi.org/10.1134/S1024856015060044>.