

СЕЗОННЫЙ БАЛАНС ПОТОКОВ CO₂ ЧЕРЕЗ ПОВЕРХНОСТЬ ОЗЕРА НАРОЧЬ (БЕЛАРУСЬ) НА ОСНОВЕ ИК СПЕКТРОСКОПИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЗАКРЫТЫХ КАМЕР

З. А. Ничипорович^{1*}, Б. В. Адамович², А. М. Павлюченко¹, М. М. Максимов¹,
С. И. Зуй¹, Ю. К. Верес², Т. В. Жукова², А. Э. Лычавко¹

УДК 535.33:574.5

¹ Научно-практический центр НАН Беларуси по биоресурсам,
220072, Минск, Беларусь; e-mail: nichiporovich_z@mail.ru

² Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь; e-mail: belaquallab@gmail.com

(Поступила 23 июля 2019)

Представлены результаты оценки потоков диоксида углерода (CO₂) через поверхность озера Нарочь за вегетационный сезон (май—сентябрь) 2017 г., полученные методом закрытых камер и ИК спектроскопии. Средние суточные величины стока 0.409 мг С/м² в пелагиали и 0.647 мг С/м² в литорали. Баланс потоков CO₂ свидетельствует о преобладании стока над эмиссией, а суммарный сезонный сток углерода в озеро из атмосферы составил 128.6 т, из них 26.3 т поступило через поверхность литорали, 102.3 т — пелагиали.

Ключевые слова: сезонный баланс (эмиссия/сток) диоксида углерода, ИК спектроскопия, метод закрытых камер, озеро Нарочь, литораль, пелагиаль.

This article presents the results of the assessment of carbon dioxide fluxes through the Naroch lake surface during the vegetative season (May—September) of 2017, obtained by the method of closed chambers and IR spectroscopy. The results show that the average daily runoff values are 0.409 mg C/m² in the pelagic zone and 0.647 mg C/m² in the littoral zone. The carbon dioxide fluxes balance indicates the runoff over emission prevalence. The total seasonal carbon runoff into the lake from the atmosphere is 128.6 t C, including 26.3 t C and 102.3 t C received through the surfaces of the littoral and pelagic zones, respectively.

Keywords: seasonal balance (emission/runoff) of carbon dioxide, IR spectroscopy, method of closed chambers, Naroch lake, littoral zone, pelagic zone.

Введение. Неуклонный рост концентрации углекислого газа в атмосфере Земли представляет глобальную экологическую проблему и является одной из причин климатических изменений [1]. Анализ потоков углерода исторически сосредоточен на изучении наземных и океанических экосистем [2, 3]. Однако наличие массовых дисбалансов в пределах континентальных балансов [4] стимулировало исследование роли озер как возможных неучтенных составляющих углеродного бюджета [5].

Предпринятые попытки оценить ежегодную эмиссию CO₂ озерами мира показали, что озерная вода в большинстве случаев перенасыщена углекислым газом [6]. Тем не менее роль пресноводных экосистем в балансе диоксида углерода остается неясной, а результаты, полученные в различных регионах земного шара, часто противоречивы. Так, например, отсутствуют четкие представления о внутриэкосистемных факторах, обуславливающих направление и величину углеродного баланса (эмиссия/сток) в течение всего вегетационного сезона [7, 8]. На сегодняшний день можно утвер-

SEASONAL BALANCE OF CARBON DIOXIDE FLUXES THROUGH THE NAROCH LAKE SURFACE (BELARUS) BASED ON IR SPECTROSCOPY AND THE METHOD OF CLOSED CHAMBERS

Z. A. Nichiporovich^{1*}, B. V. Adamovich², A. M. Pavlyuchenko¹, M. M. Maximov¹, S. I. Zuy¹,
J. K. Veres², T. V. Zhukova², A. E. Lychavko¹ (¹ Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Bioresources, Minsk, 220072, Belarus; e-mail: nichiporovich_z@mail.ru;
² Belarusian State University, Minsk, 220030, Belarus; e-mail: belaquallab@gmail.com)

ждать, что роль пресноводных экосистем в мировом углеродном цикле может быть существенной и озера должны учитываться в региональных бюджетах углерода, особенно в озерных ландшафтах [9]. Таким образом, на данном этапе изучения проблемы представляется важным накопление большего объема данных по потокам газов в пресноводных экосистемах для обнаружения их взаимосвязи с факторами среды.

Существует ряд способов оценки потока углекислого газа в системе вода—атмосфера, которые активно используются в натуральных наблюдениях, а именно: метод закрытых камер [10]; метод вихревой ковариации (eddy covariance), основные недостатки которого — дорогостоящее оборудование и трудоемкость процессов обработки данных [11]; метод измерения потоков CO₂, основанный на определении парциального давления газа ($p\text{CO}_2$) в системе вода—атмосфера с последующим расчетом величины и направленности потока по разработанной модели [12, 13]. При сравнительном анализе следует учитывать, что получаемые величины потоков не всегда совпадают. Это связано как с различными подходами к экстраполяции данных, так и с косвенными методами получения результатов, основанных на расчетных моделях [14].

В 2012 г. в Беларуси предпринята попытка сравнительного анализа некоторых озер Нарочанского региона на способность к обмену углекислым газом с атмосферой по элементам карбонатной системы, а именно по парциальному давлению газа в воде [15]. В настоящей работе оценки углеродного баланса за вегетационный сезон (май—сентябрь) на примере озера Нарочь впервые получены прямыми инструментальными измерениями CO₂ на основе ИК спектроскопии с использованием закрытых камер [16]. Актуальность исследований тем более возрастает, что баланс углерода — один из ключевых факторов в формировании трофического статуса и качества воды озерных экосистем и имеет важнейшее значение для создания эффективных технологических решений по снижению органического загрязнения водоемов.

Эксперимент. *Объект исследований* — самое крупное в Беларуси озеро Нарочь (79.6 км²), расположенное на северо-западе страны в бассейне реки Неман на территории Национального парка “Нарочанский”. Озеро включено в список наследия ЮНЕСКО, является популярнейшим белорусским курортом, и оценка состояния водной среды этого уникального объекта имеет важнейшее государственное значение. Многолетние изменения гидроэкологических параметров и анализ внешних факторов, определивших этапы эволюции экосистемы озера за последние 60 лет, а также современное состояние озера Нарочь отражены в работах [17—19]. Показано, что трофический статус озера в последние годы находится на границе мезотрофного и олиготрофного уровня [20, 21].

Выбор эталонных площадок обусловлен тем, что литоральная и пелагическая зоны различаются по структуре сообществ, участвующих в преобразовании диоксида углерода и формировании потоков CO₂. В пелагической зоне потребление CO₂ идет в основном за счет планктонных первичных продуцентов, в то время как в литоральной части существенную роль играют бентосные и перифитонные формы. Через литораль в озеро поступает основная продукция погруженных макрофитов (тростник, рогоз и др.), усваивающих диоксид углерода из воздуха. Кроме того, литоральный комплекс является границей между наземными и водными экосистемами и лежит на пути поступления в водоем биогенных элементов. Измерения CO₂ проводили на литорали (глубина 1 м) и пелагиали озера (глубина 9 м) один раз в месяц с мая по сентябрь в течение 1 сут. Координаты в системе WGS-84 контрольных точек измерений на озере Нарочь: литораль 54° 54' 17" N, 26° 43' 35" S; пелагиаль 54° 53' 36" N, 26° 43' 14" S.

Методика инструментальных измерений CO₂. Инструментальные измерения эмиссии и стоков диоксида углерода на Нарочанском полигоне осуществлялись с помощью портативного ИК газоанализатора LI-820 LI-COR, работающего по принципу избирательного поглощения молекул CO₂ в узкой полосе ИК диапазона с высокой CO₂-избирательностью фильтрации ИК излучения и позволяющего исключить влияние присутствия в газовой смеси водяных паров и других поглощающих в ИК диапазоне газов на полезный сигнал. При соединении газоанализатора непосредственно к выходу камеры осуществляется контроль давления в камере по ходу эксперимента.

Полный комплект измерительного оборудования, кроме ИК газоанализатора, включает в себя закрытые камеры, изготовленные из поливинилхлорида в виде прямоугольного параллелепипеда (70×70×51 см) объемом 0.269 м³, одно из оснований которого отсутствует; площадь покрываемого открытым основанием участка водной поверхности 0.49 м². Дополнительно подключается автоматическая метеостанция для круглосуточных измерений таких климатических показателей, как фотосинтетическая активная радиация солнечного излучения, давление, температура воздуха, температура

воды на поверхности и на глубинах 0.5 и 1.0 м. С учетом волновой и ветровой активности озера для повышения точности показаний регистрируются каждые 5 с.

Расчет. Камеральная обработка результатов полевых инструментальных измерений CO_2 . Потоки CO_2 рассчитаны в открытой среде программирования R с использованием специализированных пакетов Flux и Satoools. Модель расчета включает в себя девять входных параметров: концентрацию CO_2 , дату и время измерений, фотосинтетически активную радиацию, температуру воздуха, температуру в камере, температуру на поверхности воды, а также на глубинах 0.5 и 1.0 м. Результаты измерений представлены в виде протокола в формате Microsoft Office Excel для дальнейшей обработки полевых данных и расчета скорости потоков углерода ($\text{мг С/м}^2 \cdot \text{ч}$) для получения годового баланса (эмиссии/стоков) озера Нарочь.

Скорость потока диоксида углерода озера с единицы площади в единицу времени рассчитана по формуле:

$$F = \frac{M + PV\Delta v}{RAT_k},$$

где F — поток углерода, $\text{мкг/м}^2 \cdot \text{ч}$; M — молярная масса углерода, 12 г/моль; P — атмосферное давление в камере, Па; V — объем эмиссионной камеры, м^3 ; $R = 8.3143 \text{ Дж/моль} \cdot \text{К}$ — универсальная газовая постоянная; A — площадь основания камеры, м^2 ; T_k — температура воздуха в камере, К; $\Delta v = (\partial c / \partial t) \cdot 3600$ — скорость изменения концентрации, ppm/ч ; ∂c — изменение концентрации в камере, ppm; ∂t — промежуток времени, в течение которого измерялось изменение концентрации, с.

Результаты и их обсуждение. Оценен баланс (эмиссия/сток) CO_2 озера Нарочь на основе инструментальных измерений методом закрытых камер за вегетационный период (май—сентябрь). В течение всего наблюдаемого периода (кроме мая) на литорали регистрировалось поглощение (сток) диоксида углерода. Массовая скорость суточного потока (эмиссии) диоксида углерода составила в мае $0.371 \text{ мгС/м}^2 \cdot \text{ч}$. В июне отмечен максимальный сток ($-1.456 \text{ мгС/м}^2 \cdot \text{ч}$), после чего регистрировалось равномерное его снижение. Скорость суточного потока диоксида углерода на литорали и пелагиали озера Нарочь представлена в табл. 1.

Т а б л и ц а 1. Суточные скорости потоков углекислого газа ($\text{мг С/м}^2 \cdot \text{ч}$) через поверхность озера Нарочь в течение сезона

Месяц	Пелагиаль	Литораль
Май	0.388	0.371
Июнь	-0.568	-1.456
Июль	0.107	-0.959
Август	-1.522	-0.606
Сентябрь	-0.450	-0.586
Среднее	-0.409	-0.647

П р и м е ч а н и е: отрицательные значения — сток в озеро.

Что касается пелагиали, для вегетационного сезона измерений в целом наблюдалось поглощение CO_2 и суточный поток по углероду составлял $-2.066 \text{ мг/м}^2 \cdot \text{ч}$, что на $1.224 \text{ мг/м}^2 \cdot \text{ч}$ ниже по сравнению с литоралью. Максимальный поток стока зарегистрирован в августе ($-1.522 \text{ мг/м}^2 \cdot \text{ч}$), с уменьшением в сентябре ($-0.45 \text{ мг/м}^2 \cdot \text{ч}$). В мае и июле на пелагиали зарегистрирована эмиссия 0.388 и $0.107 \text{ мг/м}^2 \cdot \text{ч}$, а в июне отмечен сток CO_2 $-0.568 \text{ мг/м}^2 \cdot \text{ч}$.

Таким образом, поток CO_2 на литорали всегда выше, чем на пелагиали. Для экстраполяции данных на все озеро использованы морфометрические данные: литораль, ограниченная изобатой 2 м, составляет 14 % площади озера, пелагиаль — 86 % при общей площади озера 79.6 км^2 .

Эмиссию диоксида углерода в пелагиали озера наблюдали в мае и июле, а в литорали — только в мае. В остальные месяцы отмечен сток диоксида из атмосферы (табл. 1). В целом за сезон сток преобладал над эмиссией (рис. 1, б), среднемесячные величины стока $-299.4 \text{ мг С/м}^2 \cdot \text{мес.}$ в пелагиали и $-417.9 \text{ мг С/м}^2 \cdot \text{мес.}$ в литорали. При расчете суммарного потока газа со всего озера вклад литорали значительно ниже, чем пелагиали, за счет значительно меньшей занимаемой площади (рис. 1, а). Так,

за май—сентябрь через поверхность литорали озера Нарочь из атмосферы в воду поступило 26.3 т С в виде диоксида углерода, в то время как в пелагиали сток составил 102.3 т С. Суммарный сток углерода из атмосферы в форме диоксида составил 128.6 т.

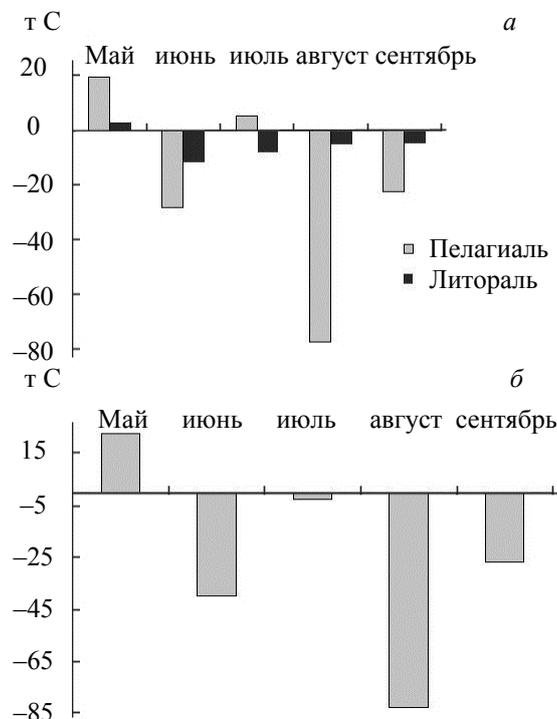


Рис. 1. Углеродный баланс (т С) озера Нарочь за вегетационный сезон (май—сентябрь) с разбивкой по месяцам: *а* — на литорали и пелагиали отдельно; *б* — суммарный поток по всему озеру

Озерные экосистемы очень гетерогенны в отношении участия различных форм углерода в их функционировании, что до настоящего времени не позволило разработать единую модель обменных процессов парниковых газов с атмосферой. Вследствие этого объективной необходимостью является проведение как можно более масштабных натурных измерений потоков газов на границе вода—атмосфера в разнотипных водоемах. Особую актуальность приобретают изучение условий и количественное измерение потоков углеродсодержащих газов в озерах, имеющих длинную и подробную историю мониторинговых наблюдений, поиск связей интенсивности потоков с различными гидро-экологическими факторами. Потоки углекислого газа в озерах могут быть значимы как на региональном, так и на глобальном уровне. Однако до сих пор роль в потоках углекислого газа в атмосфере самого крупного на территории Беларуси озера Нарочь не изучалась.

Проведенные нами исследования показывают, что в наиболее активный вегетационный период экосистема озера принимает углекислый газ из атмосферы. По полученным скоростям обменных процессов газов с атмосферой в виде стока озеро Нарочь сходно с озером Байкал: 5.5—8.6 г CO₂/м² за сезон (май—сентябрь) в озере Нарочь и 6.5—7.0 г CO₂/м² за год в период открытой воды озере Байкал [22]. В целом полученные нами данные об обменных процессах углекислого газа с атмосферой в озере Нарочь согласуются с рядом исследований, проведенных на других озерах [7, 23]. Кроме того, в настоящее время не выявлено четких критериев предсказания даже направления потока в озерах разного типа. Исходя из данных [24], направление потока в слаботрофном озере, таком как Нарочь, должно быть сдвинуто в сторону эмиссии CO₂. Однако полученные нами данные показывают, что суммарный поток озера сдвинут в сторону стока углекислого газа из атмосферы. Такие противоречия могут быть обусловлены различиями в методологии проводимых измерений (расчет по модели, использование закрытых камер и ИК спектроскопии или метода вихревой ковариации). Так, расчет по модели потока CO₂ в Нарочанских озерах в течение вегетационного сезона показал сдвиг в сторону эмиссии, тогда как проведенные нами прямые измерения — превосходство стока из атмо-

сферы [16]. Большое значение имеют время и продолжительность измерений. Как видно из исследований, выполненных нами в течение практически всего вегетационного сезона, в весенний период поток сдвигается в сторону эмиссии и проведение измерений, например, только в этот период привело бы к заключению о преобладании эмиссии в обменных процессах углекислого газа с атмосферой в озере Нарочь.

В силу того что на озере Нарочь ежегодно проводятся комплексные гидробиологические исследования, можно сравнить сезонный ход потока диоксида углерода с гидробиологическими параметрами [17], среди которых наиболее интересны продукционно-деструкционные процессы. Отметим наличие общего направления сезонных изменений как в продукционно-деструкционных параметрах (аэробная деструкция и величины фотосинтеза), так и в потоке диоксида углерода. Так, в начале сезона показатели продукции и деструкции принимают наименьшие значения, увеличиваясь к середине и концу сезона. При этом диоксид углерода в начале сезона поступает в атмосферу, а затем в озеро.

Заключение. Суммарный сток углерода из атмосферы через поверхность озера 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.

Дальнейшие исследования будут направлены на изучение потоков углеродсодержащих газов еще двух озер Нарочанской системы (Мястро, Баторино), отличающихся трофическим статусом, который в свою очередь является важнейшей гидроэкологической характеристикой водоемов, что позволит выявить влияние трофического статуса на скорость и направление потоков парниковых газов между атмосферой и водоемами и внести существенный вклад в создание общей модели формирования потоков углеродсодержащих газов озерными экосистемами.

Представленные данные по балансу (эмиссия/сток) CO₂ озера Нарочь в Беларуси получены совместно с БГУ и ГПНО “НПЦ НАН Беларуси по биоресурсам” в результате выполнения комплексного задания “Баланс углерода в озерных экосистемах и его связь с формированием их трофности и качеством воды” (2016—2020) в рамках ГПНИ “Природопользование и экология”.

- [1] C. D. Keeling, S. C. Piper, T. P. Whorf, R. F. Keeling. *Chem. Phys. Meteorol.*, **63** (2011) 1—22
- [2] P. Falkowski, R. J. Scholes, E. Boyle, J. Canadell, D. Canfield, J. Elser, N. Gruber, K. Hibbard, P. Högberg, S. Linder, F. T. Mackenzie, B. Moore, T. Pedersen, Y. Rosenthal, S. Seitzinger, V. Smetacek, W. Steffen. *Science, New Ser.*, **290**, N 5490 (2000) 291—296
- [3] A. J. Watson, J. C. Orr. *Ocean Biogeochemistry: the Role of the Ocean Carbon Cycle in Global Change (a JGOFS Synthesis)* (2003) 123—141
- [4] S. Fan, M. Gloor, J. Mahlman, S. Pacala, J. Sarmiento, T. Takahashi, P. Tans. *Science*, **282** (1998) 442—446
- [5] J. A. Cardille, S. R. Carpenter, J. A. Foley, P. C. Hanson, M. G. Turner, J. A. Vano. *J. Geophys. Res.*, **114** (2009) G03011
- [6] J. J. Cole, N. F. Caraco, G. W. Kling, T. K. Kratz. *Science*, **265** (1994) 1568—1570
- [7] M. B. Balmer, J. A. Downing. *Inland Waters*, **1** (2011) 125—132
- [8] M. U. M. Anas, K. A. Scott, B. Wissel. *Environ. Rev.*, **23** (2015) 275—287
- [9] N. Atilla, G. A. McKinley, V. Bennington, M. Baehr, N. Urban, M. De Grandpre, A. R. Dessai, C. Wu. *Limnol. Oceanogr.*, **56**, N 3 (2011) 775—786
- [10] Д. А. Пестунов. Аппаратно-программный комплекс измерения потоков CO₂ в системе вода—атмосфера на озере Байкал, автореф. дис... канд. тех. наук, Томск (2010)
- [11] M. Aubinet, T. Vesala, D. Papale. *Eddy Covariance: A Practical Guide to Measurement and Data Analysis* (2012) 437
- [12] J. J. Cole, N. F. Caraco. *Limnol. Oceanogr.*, **43**, N 4 (1998) 647—656
- [13] J. J. Heiskanen, I. Mammarella, S. Naapanala, J. Pumpanen, T. Vesala, S. MacIntyre, A. Ojala. *Tellus B*, **66** (2014) 22827; <https://doi.org/10.3402/tellusb.v66.22827>
- [14] K. M. Erkkilä, A. Ojala, D. Bastviken, T. Biermann, J. Heiskanen, A. Lindroth, O. Peltola, M. Rantakari, T. Vesala, I. Mammarella. *Biogeosciences*, **15**, N 2 (2018) 429—445
- [15] Т. В. Жукова, Ю. К. Верес. Материалы V Междунар. науч. конф. “Озерные экосистемы: биологические процессы, антропогенная трансформация, качество воды” 12—17 сентября 2016 г., Минск, Нарочь (2016) 57—59

- [16] J. Couwenberg, A. Thiele, F. Tanneberger, J. Augustin, S. Bärish, D. Dubovik, N. Liashchynskaya, D. Michaelis, M. Minke, A. Skuratovich, H. Joosten. *Hydrobiologia*, **674** (2011) 67—89
- [17] Т. В. Жукова, Т. М. Михеева, Б. В. Адамович, Р. З. Ковалевская, Ю. К. Верес, Е. В. Лукьянова, Л. В. Никитина, О. А. Макаревич, М. А. Батурина, И. Н. Селивончик, И. В. Савич, Н. В. Дубко, В. С. Карабанович, В. Г. Костоусов, С. А. Латушкин, И. И. Бручковский, В. Н. Денисенко, А. Н. Красовский, А. Г. Светашев, В. Л. Тавгин, Л. Н. Турышев, А. Г. Аронов, Т. И. Аронова, В. С. Люштык, О. С. Ежова. Бюллетень экологического состояния озер Нарочь, Мястро, Баторино, БГУ (2018) 120
- [18] А. П. Остапеня, Т. В. Жукова, Т. М. Михеева, Р. З. Ковалевская, Т. А. Макаревич, А. А. Жуков, Е. В. Лукьянова, Л. В. Никитина, О. А. Макаревич, Н. В. Дубко, В. С. Карабанович, И. В. Савич, Ю. К. Верес. *Тр. БГУ*, **7** (2012) 135—148
- [19] T. V. Zhukova, N. P. Radchikova, T. M. Mikheyeva, E. V. Lukyanova, R. Z. Kovalevskaya, J. K. Veres, A. V. Medvinsky, B. V. Adamovich. *Inland Water Biol.*, **3** (2017) 250—257
- [20] B. V. Adamovich, A. V. Medvinsky, L. V. Nikitina, N. P. Radchikova, T. M. Mikheyeva, R. Z. Kovalevskaya, Y. K. Veres, A. Chakraborty, A. V. Rusakov, N. I. Nurieva, T. V. Zhukova. *Ecolog. Indicat.*, **97** (2019) 120—129
- [21] B. V. Adamovich, T. V. Zhukova, T. M. Mikheeva, R. Z. Kovalevskaya, E. V. Luk'yanova. *Water Res.*, **43**, N 5 (2016) 809—817
- [22] V. M. Domysheva, D. A. Pestunov, M. V. Sakirko, A. M. Shamrin, M. V. Panchenko. *Atm. Ocean. Opt.*, **28**, N 6 (2015) 543—550
- [23] K. Finlay, P. R. Leavitt, A. Patoine, B. Wisselc. *Limnol. Oceanogr.*, **55**, N4 (2010) 1551—1564
- [24] J. J. Cole, N. F. Caraco. *Limnol. Oceanogr.*, **43**, N 4 (1998) 647—656