

АТМОСФЕРНАЯ РАДИАЦИЯ, ОПТИЧЕСКАЯ ПОГОДА И КЛИМАТ

УДК 551.588.4:551.510

Эмиссия углекислого газа из пресноводных систем Западной Сибири

М.Ю. Аршинов, Б.Д. Белан[✉], Д.К. Давыдов,
Д.В. Симоненков, А.В. Фофонов*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 19.10.2023 г.;
после доработки 20.11.2023 г.;
принята к печати 21.11.2023 г.

Одним из возможных источников поступления углекислого газа в атмосферу могут быть речные экосистемы. Приводятся результаты измерения потоков CO_2 с поверхности нескольких рек и озер Томской обл. Показано, что в период экспериментов средние потоки углекислого газа составляли для р. Оби $143,7 \pm 21,7$ ($13-14.08.2023$ г.), $53,3 \pm 21,2$ ($19.08.2023$ г.) и $80,4 \pm 59,9$ $\text{мгС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$ ($20.08.2023$ г.); для р. Кеть — $66,1 \pm 17,3$; болотного озера Карасево — $33,3 \pm 17,3$; р. Суйга $50,2 \pm 23,0$; р. Икса — $81,9 \pm 11,5$ $\text{мгС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$. Их величина существенно зависела не только от объекта исследования, но и от гидрометеорологических условий.

Ключевые слова: атмосфера, воздух, поток, река, углекислый газ, эмиссия; atmosphere, air, flux, river, carbon dioxide, emission.

Введение

Одной из основных проблем, волнующих все человечество, является глобальное потепление климата [1]. По заключению МГЭИК, причина этого процесса — увеличение концентрации парниковых газов в атмосфере и вызываемый ими дополнительный приток тепла в атмосферу [2]. В первую очередь это касается углекислого газа (CO_2), рост содержания которого в воздухе продолжается [3]. Точная оценка выбросов CO_2 и его перераспределения между атмосферой, океаном и земной биосферой в условиях меняющегося климата имеет решающее значение для лучшего понимания глобального углеродного цикла, разработки климатической политики и прогнозирования будущего изменения цикла [2].

Несмотря на большой прогресс в исследовании пространственно-временной изменчивости CO_2 на планете, в его балансе все еще сохраняется неопределенность, оцениваемая в 1 ГтС (гигатонна в эквиваленте углерода ($12/44$ для CO_2 и $12/16$ для CH_4)) [4]. Это означает, что не все источники поступления этого парникового газа в атмосферу корректно учтены.

Одним из таких источников могут быть речные системы, которые переносят углерод из наземных

экосистем в открытый океан [5]. Этот основной перенос дополняется двумя более короткими ветвями: из наземных экосистем во внутренние воды и из приливных водно-болотных систем в мировой океан. Оценки глобальной эмиссии углерода из рек показывают, что его потоки варьируются от 0,6 до 1,8 $\text{ПгС} \cdot \text{год}^{-1}$ (петтапикограммы углерода) [6–8]. Баланс углерода в разных речных бассейнах значительно отличается, а растворенный органический углерод (DOC — Dissolved Organic Carbon), твердый органический углерод (POC — Particulate Organic Carbon) и растворенный неорганический углерод (DIC — Dissolved Inorganic Carbon) также важны для оценки вклада общего потока углерода в океан (TOC — Total Organic Carbon) и его осадочного накопления в глобальном углеродном цикле. На основе собранных данных по 27 речным бассейнам в различных экосистемах Земли в [9, 10] определены средний поток TOC, DOC, POC, DIC в мировой океан и эмиссия CO_2 из водных масс на пути к нему. В результате выявлены горизонтальный перенос углерода (экспорт с суши во внутренние воды $2,01 \pm 1,98$ и сток в океан $1,13 \pm 0,50$ $\text{ПгС} \cdot \text{год}^{-1}$) и его вертикальные потоки (дегазация $0,79 \pm 0,38$ и накопление отложений $0,20 \pm 0,09$ $\text{ПгС} \cdot \text{год}^{-1}$). Существенные неопределенности этих оценок требуют уточнения по экспериментальным данным.

В настоящее время достаточно хорошо изучены потоки углерода с речных поверхностей в Европе и Северной Америке [11–16]. И только в последние годы появилось несколько работ, выполненных на территории Сибири [17–20]. Очевидно, что для

* Михаил Юрьевич Аршинов (michael@iao.ru); Борис Денисович Белан (bbd@iao.ru); Денис Константинович Давыдов (denis@iao.ru); Денис Валентинович Симоненков (simon@iao.ru); Александр Владиславович Фофонов (alenfo@iao.ru).

такого огромного региона, как Сибирь, этого явно недостаточно.

Для расширения сведений о динамике потоков углекислого газа с поверхности сибирских рек были проведены их измерения в августе – начале сентября 2023 г. в среднем течении р. Оби (пос. Киреевск, Томская обл.), на р. Кеть (пос. Белый Яр Томской обл.), а также на малых таежных речках и болотных озерах. Цель настоящей работы – определение потоков углекислого газа с поверхности рек и болотных озер.

Материалы и методы исследования

Для измерения потоков CO_2 была изготовлена плавающая камера размерами $0,4 \times 0,4 \times 0,4$ м из прозрачного плексигласа (рис. 1). Положительная плавучесть камеры обеспечивалась основанием, изготовленным из пенопласта. Небольшие габариты и вес оборудования позволяли проводить измерения в труднодоступных местах.

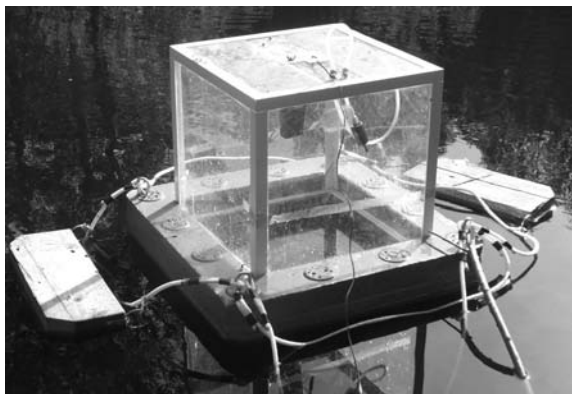


Рис. 1. Плавающая камера в режиме экспозиции на водной поверхности

Методика измерения газовых потоков камерами широко известна в научном сообществе и достаточно хорошо проработана [21–26]. Она используется на открытых почвах, в различных растительных покровах и даже на деревьях. Суть метода

состоит в регистрации изменений концентрации газов в изолированном от атмосферы объеме. Воздушную пробу из камеры можно либо отбирать в отдельные мини-емкости для последующего лабораторного анализа, либо подавать непосредственно в переносной газоанализатор при измерениях *in situ*. Согласно этой методике также рекомендуется проводить как разовые измерения в отдельных точках для большего охвата территории исследований, так и непрерывные в одном и том же месте для определения сезонного/суточного хода потоков газов или уточнения их значений.

В наших исследованиях на водных объектах были проведены разовые и серийные измерения *in situ*. Перед каждым экспонированием камеры (работа в закрытом режиме) она проветривалась окружающим воздухом, затем закрывалась примерно на 5 мин. Потоки CO_2 определялись методом наименьших квадратов по изменениям концентраций за известные временные отрезки.

Концентрация измерялась с помощью NDIR-газоанализатора SenseAir Dioxide Instrument (SenseAir AB, Швеция) с оптической ячейкой типа «улитка». Диапазон определения концентраций CO_2 составляет $0\text{--}6000 \text{ млн}^{-1}$ с неопределенностью $\pm 3\%$. При вентиляции рабочего объема воздушным потоком $0,2 \text{ л/мин}$ оптимальное время реакции прибора – 15 с. Встроенная процедура калибровки ABC (Automatic Background Calibration) позволяет корректировать дрейф базовой линии газоанализатора. Логгер прибора запоминает до 900 измерений с заданным временным интервалом, которые считываются через интерфейс программными средствами. Автономность работы прибора определяется встроенным аккумулятором и составляет около 12 ч.

Размеры камеры позволили разместить в ней датчик. Для окончательной проверки работоспособности прибора была проведена интеркалибровка с переносным газоанализатором $\text{CO}_2 + \text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O}$ Picarro G4301 (США), имеющим неопределенность регистрации концентрации CO_2 не более $0,4 \text{ млн}^{-1}$. На рис. 2 приведена серия одновременных измерений, выполненных обоими газоанализаторами в условиях затемненной камеры, установленной

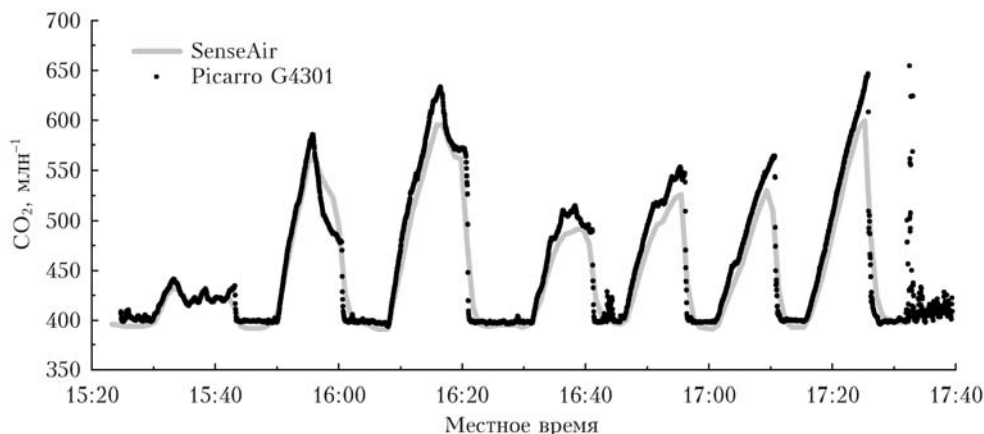


Рис. 2. Временная диаграмма измерений концентрации CO_2 газоанализаторами SenseAir и Picarro G4301 (18.08.2023 г.)

на травяном покрове. Участки роста концентрации соответствовали временным интервалам экспонирования камеры, по которым вычислялись потоки CO_2 на границе раздела сред.

Из рис. 2 видно, что время реакции газоанализатора Picarro было значительно меньше, чем у диффузионного датчика SenseAir. Среднее соотношение между концентрациями, полученными приборами, имеющими различные принципы измерения, составило всего 1,15 раза, что при дифференциальной методике регистрации потоков не имеет существенного значения.

Помимо концентраций CO_2 для измерения потоков на границе раздела «водная поверхность – атмосфера» необходимо контролировать температуру окружающей среды, в том числе воды. У газоанализатора SenseAir есть функция контроля температуры рабочего объема, которая при вентилировании совпадает с температурой воздуха ($T_{\text{возд}}$). Температура воды ($T_{\text{воды}}$) была измерена с помощью миниатюрного термохрона iBotton DS1921L на глубинах 10–20 см.

Результаты и обсуждение

Измерительная кампания 2023 г. состояла из нескольких этапов. На *первом этапе* был обследован район р. Оби вблизи пос. Киреевск (Томская обл.), прилегающий к обсерватории «Фоновая»

ИОА СО РАН (56,4185° с.ш.; 84,0740° в.д.). Измерения проводились на различных участках мелководья основного русла реки и в прилегающих протоках. Речное дно здесь песчано-гравийное, местами покрыто слоем ила при практически полном отсутствии водорослей. Цвет воды во время проведения исследований оставался светло-желтым с примесью взвесей. Первая серия измерений 13–14.08.2023 г. проводилась в разное время суток при относительно прохладной погоде, когда $T_{\text{воды}}$ на 6–10 °С превышала $T_{\text{возд}}$. Во второй серии 19–20.08.2023 г. при солнечной погоде, наоборот, $T_{\text{возд}}$ на 2–10 °С превышала $T_{\text{воды}}$, за исключением утренних часов (табл. 1).

Из данных табл. 1 следует, что средние потоки CO_2 во время первой серии измерений были выше ($143,7 \pm 21,7 \text{ мгС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$), чем во время второй серии ($53,3 \pm 21,2$ и $80,4 \pm 59,9 \text{ мгС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$), исключая зарегистрированные случаи артефактов (здесь и далее выделено полужирным). Особенно хорошо выраженный тренд в изменении величины потоков CO_2 наблюдался 19.08.2023 г. при переходе значений разности $T_{\text{возд}} - T_{\text{воды}}$ от отрицательных к положительным.

На рис. 3 приведена выявленная зависимость изменения величины потоков от разности $T_{\text{возд}} - T_{\text{воды}}$. При общей линейности характеристики можно отметить область повышенной неопределенности в пределах $-3^\circ\text{C} > T_{\text{возд}} - T_{\text{воды}} > +3^\circ\text{C}$, связанной, по всей

Т а б л и ц а 1

Результаты измерений потоков CO_2 на р. Обь (пос. Киреевск) (ПБ – правый берег, ЛБ – левый берег)

№	Время	Точка измерений	$T_{\text{возд}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{воды}}, ^\circ\text{C}$	Поток CO_2 , $\text{мгС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$
1	2	3	4	5	6
<i>13–14.08.2023 г.</i>					
1	17:35 (13.08)	Основное русло. ПБ	$15,4 \pm 0,2$	21,3	124,5
2	18:16 (13.08)	Основное русло. ПБ	$13,8 \pm 0,2$	21,3	147,0
3	07:13 (14.08)	Основное русло. ПБ	$11,8 \pm 0,4$	21,5	179,1
4	07:49 (14.08)	Основное русло. ЛБ	$13,9 \pm 0,1$	21,5	137,4
5	10:27 (14.08)	Основное русло. ЛБ	$14,2 \pm 0,1$	21,5	154,5
6	11:01 (14.08)	Основное русло. ПБ	$15,0 \pm 0,1$	21,5	119,8
Среднее					$143,7 \pm 21,7$
<i>19.08.2023 г.</i>					
1	09:29	Основное русло. ПБ	$17,3 \pm 0,3$	20	28,8
2	10:01	Основное русло. ЛБ	$23,9 \pm 0,5$	20	29,7
3	10:59	Основное русло. ЛБ	$26,6 \pm 0,6$	20	83,5
4	11:17	Основное русло. ПБ	$25,8 \pm 0,3$	20	825,7
5	12:17	Протока. Точка 1	$26,4 \pm 0,5$	20	55,3
6	12:33	Протока. Точка 2	$28,2 \pm 0,3$	20	37,4
7	12:43	Протока. Точка 3	$29,6 \pm 0,3$	20	29,1
8	12:54	Протока. Точка 4	$27,0 \pm 0,2$	20	64,5
9	13:06	Протока. Точка 5	$30,6 \pm 0,2$	20	32,5
10	13:25	Протока. Точка 6	$25,7 \pm 0,4$	20	76,6
11	13:39	Протока. Точка 7	$23,5 \pm 0,2$	20	77,2
12	13:52	Протока. Точка 8	$26,7 \pm 0,5$	20	41,1
13	17:01	Основное русло. ЛБ	$24,7 \pm 0,3$	20	59,2
14	17:33	Основное русло. ПБ	$20,3 \pm 0,1$	20	78,0
Среднее					$53,3 \pm 21,2$

1	2	3	4	5	6
20.08.2023 г.					
1	08:10	Основное русло. ПБ	$15,9 \pm 0,1$	20,3	186,5
2	08:22	Основное русло. ЛБ	$15,9 \pm 0,1$	20,3	170,6
3	08:48	Основное русло. ЛБ	$17,3 \pm 0,1$	20,3	118,9
4	09:22	Острова. Точка 1	$18,3 \pm 0,1$	20,3	102,8
5	09:41	Острова. Точка 2	$18,4 \pm 0,1$	20,3	38,7
6	10:15	Острова. Точка 3	$19,8 \pm 0,0$	20,3	48,1
7	10:29	Острова. Точка 4	$20,7 \pm 0,1$	20,3	101,9
8	10:44	Острова. Точка 5	$21,0 \pm 0,3$	20,3	19,2
9	11:02	Острова. Точка 6	$21,5 \pm 0,2$	20,3	32,3
10	11:23	Основное русло. ЛБ	$22,4 \pm 0,3$	20,3	50,1
11	11:36	Основное русло. ЛБ	$22,4 \pm 0,1$	20,3	-134,1
12	12:00	Основное русло. ПБ	$22,2 \pm 0,1$	20,3	855,3
13	12:15	Основное русло. ПБ	$22,4 \pm 0,2$	20,3	15,5
Среднее					$80,4 \pm 59,9$

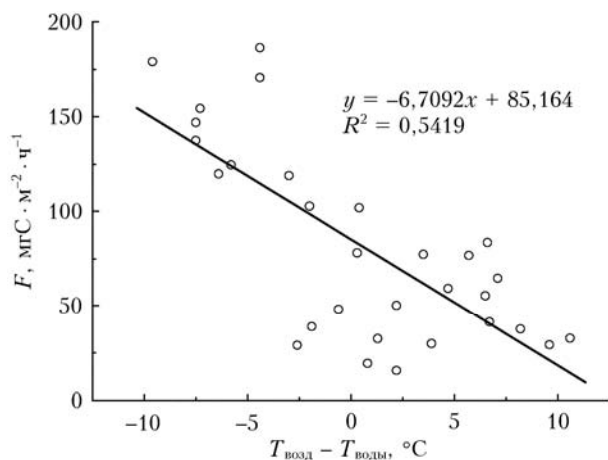


Рис. 3. Линеаризация зависимости измеренных величин потока CO_2 от разности температур $T_{\text{возд}} - T_{\text{воды}}$ (р. Обь)

видимости, с переходными термодинамическими процессами в незамкнутой системе «вода — атмосфера». Следует отметить, что во время экспонирования камеры $T_{\text{возд}}$ в закрытом объеме начинает заметно меняться, как правило, в сторону измеряемых значений $T_{\text{воды}}$.

Упомянутые выше отклонения от основного массива полученных данных были связаны с кратковременным выходом в изолированный объем камеры пузырьков придонного газа (измерения № 4 19.08.2023 г. и № 12 20.08.2023 г.), что привело к увеличению потока CO_2 почти на порядок ($> 800 \text{ mgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$). Исключение составляет отрицательное значение потока (измерение № 11 20 августа), зарегистрированное во время экспонирования камеры над водным участком с растительностью и обусловленное поглощением CO_2 в процессе фотосинтеза. Хотя во всех инструкциях по камерным измерениям рекомендуется избегать подобных событий [27], полученное отрицательное значение свидетельствует о возможности использования выбранного газоанализатора в наших исследованиях.

Объектами *второго этапа* измерительной кампании являлись водные объекты в зоне средней тайги. Эксперименты проводились 30–31.08.2023 г. в районе пос. Белый Яр Томской обл. ($58,4500^\circ \text{ с.ш.}$;

$85,0310^\circ \text{ в.д.}$), который расположен на р. Кеть — большом правом притоке р. Оби. Кроме обследования р. Кеть в рамках поездки были осуществлены серии измерений потоков CO_2 на болотном оз. Карасевое и р. Суйга рядом с пос. Нибига (тот же район Томской обл., $58,2840^\circ \text{ с.ш.}$; $84,8850^\circ \text{ в.д.}$). Все водные объекты в данном районе обогащены растворенным органическим веществом (DOC, POC) и имеют темно-коричневый оттенок. Зачастую дно малых рек и озер — это торфяные залежи без водорослей и с выходами подстилающих песчаных пород. Результаты измерений приведены в табл. 2.

Из-за ограниченности во времени все представленные в табл. 2 измерения являлись серийными. Наблюдавшиеся $T_{\text{возд}}$ постоянно превышали $T_{\text{воды}}$. Следует отметить хороший прогрев вод болотного озера к концу лета ($T_{\text{воды}} = +18^\circ \text{C}$). В то же время пониженные значения $T_{\text{воды}}$ в р. Суйга, берущей начало из тех же болот, свидетельствуют о замедленном проникновении тепла в торфяную залежь. При этом средние потоки CO_2 в оз. Карасевое ($33,3 \pm 17,3 \text{ mgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$) были ниже, чем в реках Кеть и Суйга ($66,1 \pm 17,3$ и $50,2 \pm 23,0 \text{ mgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$ соответственно). Возможно, это произошло не только из-за большой разности $T_{\text{возд}} - T_{\text{воды}}$, но и из-за отсутствия активного перемешивания водных слоев.

О том, что фактор перемешивания играет важную роль в потоках газов на границе системы «вода — атмосфера», свидетельствует исключенное из обобщения отклонение, зарегистрированное на р. Кеть. В ходе экспонирования плавающей камеры она попала в зону быстрого течения и значения потока CO_2 заметно выросли (измерение № 6 31.08.2023 г.).

На *третьем, заключительном этапе* измерительной кампании (табл. 3) были произведены краткие вечерние измерения потоков CO_2 на р. Икса в районе пос. Плотниково Томской обл. ($56,8548^\circ \text{ с.ш.}$; $83,0750^\circ \text{ в.д.}$). Река берет начало в водной системе Большого Васюганского болота. Берега этой таежной реки богаты водной растительностью, а дно в основном илистое, больше похожее на пойменные озера; течение медленное. Однако в ее темно-коричневых болотных водах обильно

Таблица 2

Результаты измерений потоков CO_2 на водных объектах (притоки р. Оби)

№	Время	Точка/ серия измерений	$T_{\text{возд}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{воды}}, ^\circ\text{C}$	Поток CO_2 , $\text{мгС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$
<i>оз. Карасевое, пос. Нибегга (30.08.2023 г.)</i>					
1	14:15	1/1	$28,0 \pm 1,4$	18,5	73,7
2	14:25	1/2	$25,3 \pm 0,5$	18,5	29,5
3	14:35	1/3	$25,5 \pm 0,3$	18,5	27,1
4	14:46	1/4	$27,8 \pm 0,9$	18,5	29,3
5	15:04	2/1	$28,9 \pm 0,6$	18,5	27,5
6	15:15	2/2	$28,7 \pm 0,3$	18,5	10,2
7	15:25	2/3	$29,9 \pm 0,6$	18,5	29,1
8	15:33	2/4	$29,1 \pm 0,3$	18,5	52,4
9	15:46	2/5	$29,3 \pm 0,5$	18,5	30,5
10	15:57	3/1	$28,7 \pm 0,7$	18,5	16,3
11	16:07	3/2	$29,5 \pm 1,0$	18,5	21,2
12	16:16	3/3	$29,7 \pm 0,3$	18,5	23,3
13	16:26	3/4	$28,3 \pm 0,4$	18,5	28,1
14	16:36	3/5	$28,1 \pm 0,4$	18,5	40,9
15	16:51	4/1	$28,1 \pm 0,4$	18,5	23,4
16	17:07	4/2	$25,5 \pm 0,2$	18,5	33,0
17	17:25	4/3	$24,5 \pm 0,2$	18,5	71,0
Среднее					$33,3 \pm 17,3$
<i>р. Кеть, пос. Белый Яр (31.08.2023 г.)</i>					
1	07:11	1/1	$17,7 \pm 0,2$	17	59,3
2	07:24	1/2	$17,5 \pm 0,3$	17	53,3
3	07:32	1/3	$17,7 \pm 0,3$	17	56,5
4	07:43	2/1	$20,4 \pm 1,4$	17	96,1
5	07:55	2/2	$23,9 \pm 0,6$	17	65,2
6	08:06	2/3	$24,9 \pm 1,3$	17	251,6
Среднее					$66,1 \pm 17,3$
<i>р. Суйга, пос. Нибегга (31.08.2023 г.)</i>					
1	10:37	1/1	$22,7 \pm 0,2$	13,5	48,8
2	10:46	1/2	$25,9 \pm 1,5$	13,5	85,6
3	11:01	1/3	$26,1 \pm 1,0$	13,5	22,0
4	11:11	1/4	$26,7 \pm 1,5$	13,5	27,1
5	11:27	2/1	$23,6 \pm 0,7$	13,5	36,8
6	11:39	2/2	$21,5 \pm 0,7$	13,5	40,6
7	11:51	2/3	$20,5 \pm 0,5$	13,5	87,2
8	12:03	2/4	$20,1 \pm 0,7$	13,5	54,0
9	12:15	2/5	$18,9 \pm 0,4$	13,5	50,1
Среднее					$50,2 \pm 23,0$

Таблица 3

Результаты измерений потоков CO_2 на р. Икса (6.09.2023 г.)

№	Время	Точка/ серия измерений	$T_{\text{возд}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{воды}}, ^\circ\text{C}$	Поток CO_2 , $\text{мгС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$
1	17:33	1/1	$15,0 \pm 0,4$	14,5	61,1
2	17:46	1/2	$13,5 \pm 0,1$	14,5	77,6
3	17:56	1/3	$13,0 \pm 0,0$	14,5	74,2
4	18:05	1/4	$12,8 \pm 0,1$	14,5	68,6
5	18:16	1/5	$12,7 \pm 0,0$	14,5	82,6
6	18:29	2/1	$12,5 \pm 0,1$	14,5	86,4
7	18:39	2/2	$12,3 \pm 0,1$	14,5	88,4
8	18:50	2/3	$12,1 \pm 0,0$	14,5	88,2
9	19:00	2/4	$11,8 \pm 0,1$	14,5	97,9
10	19:11	2/5	$11,7 \pm 0,1$	14,5	93,8
Среднее					$81,9 \pm 11,5$

присутствуют растворенные органические вещества (DOC и POC), а $T_{\text{воды}}$, как и в р. Суйга, невысока ($+14,5^\circ\text{C}$).

Зарегистрированный здесь средний поток CO_2 составил $81,9 \pm 11,5 \text{ мгС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$ с тенденцией роста при уменьшении разности $T_{\text{возд}} - T_{\text{воды}}$ (рис. 4).

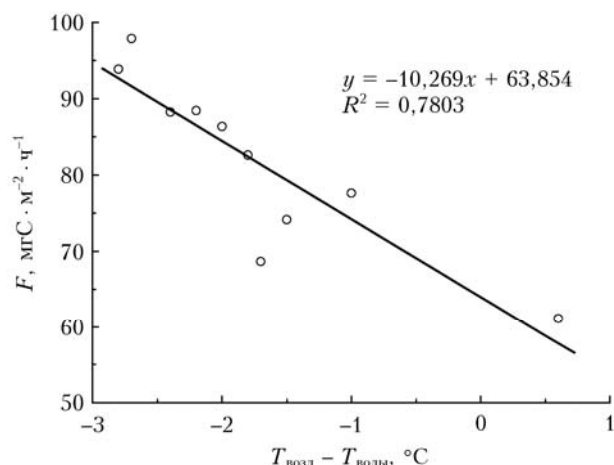


Рис. 4. Линеаризация зависимости измеренных величин потока CO_2 от разности $T_{\text{возд}} - T_{\text{воды}}$ (р. Икса)

В отличие от аналогичной закономерности, выявленной нами на р. Оби (рис. 3), небольшая ширина р. Икса могла стать причиной более низких значений потоков вследствие значимого в ее масштабах поглощения CO_2 водной растительностью. Время проведения серийных измерений здесь совпало с переходом водной экосистемы от частичного поглощения CO_2 к его выделению.

Полученные данные и результаты исследования потоков углекислого газа на р. Обь и Кеть [28, 29] хорошо согласуются, если учитывать зафиксированный в этих работах сезонный ход. В то же время, в работе [30] было показано, что дельта р. Лены оказалась значительным поглотителем атмосферного CO_2 (-119 г/м^2) летом с расчетным годовым углеродным обменом 71 г/м^2 . В этой работе измерения проводились вихревым методом, и здесь, скорее всего, сказался вклад растительности. Также в ходе многолетних измерений на оз. Байкал было показано, что суммарный поток углекислого газа за период открытой воды направлен из атмосферы в озеро и составляет $6,5\text{--}7,0 \text{ г/м}^2$ в год [31–35].

Заключение

Разработанная и изготовленная плавучая камера на базе относительно простого датчика углекислого газа, откалиброванная по прецизионному газоанализатору, оказалась весьма эффективным средством измерения потоков CO_2 .

Результаты измерения потоков CO_2 на водных объектах бассейна р. Оби, озерах и болотных системах Западной Сибири показали почти повсеместный выход растворенного углерода в атмосферу. Это несколько отличается от динамики потоков CO_2 на других крупных пресноводных объектах.

Измеренные потоки углекислого газа с поверхности водных объектов, без учета отклонений, находились в диапазоне значений $10\text{--}180 \text{ мгС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$. Их величина зависела не только от объекта исследования, но и от гидрометеорологических условий, что необходимо учитывать при анализе этих данных.

Дальнейшие исследования в этой области могут заполнить существующие пробелы в данных для уточнения модельных расчетов и выявления источников/стоков атмосферного углерода в глобальном масштабе.

Финансирование. Работа выполнена в рамках реализации важнейшего инновационного проекта государственного значения «Разработка системы наземного и дистанционного мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов на территории Российской Федерации, обеспечение создания системы учета данных о потоках климатически активных веществ и бюджете углерода в лесах и других наземных экологических системах» (соглашение ВПП-ГЗ/23-14).

Список литературы

1. Tollefson J. Earth's hottest month: These charts show what happened in July and what comes next // *Nature*. 2023. V. 620, N 7975. P. 703–704.
2. Summary for Policymakers // *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: Cambridge University Press, 2021. P. 1–41.
3. Ramonet M., Ciais Ph., Sha M.K., Steinbacher M., Sweeney C. CO_2 in the atmosphere: Growth and trends since 1850 // *Oxford Research Encyclopedias of Climate Science*. England: Oxford University Press, 2023. 44 p.
4. Friedlingstein P., O'Sullivan M., Jones M.W., Andrew R.M., Gregor L., Hauck J., Le Quéré C., Luijckx I.T., Olsen A., Peters G.P., Peters W., Pongratz J., Schwingshackl C., Sitch S., Canadell J.G., Ciais Ph., Jackson R.B., Alin S.R., Alkama R., Arneeth A., Arora V.K., Bates N.R., Becker M., Bellovin N., Bittig H.C., Bopp L., Chevallier F., Chini L.P., Cronin M., Evans W., Falk S., Feely R.A., Gasser T., Gehlen M., Gkritzalis T., Gloege L., Grassi G., Gruber N., Gürses O., Harris I., Hefner M., Houghton R.A., Hurtt G.C., Iida Y., Ilyina T., Jain A.K., Jersild A., Kadono K., Kato E., Kennedy D., Golde-wijk K.K., Knauer J., Korsbakken J.I., Landschützer P., Lefèvre N., Lindsay K., Liu J., Liu Z., Marland G., Mayot N., McGrath M.J., Metzl N., Monacchi N.M., Munro D.R., Nakaoka S.-I., Niwa Y., O'Brien K., Ono T., Palmer P.I., Pan N., Pierrot D., Pockock K., Poulter B., Resplandy L., Robertson E., Rödenbeck Ch., Rodriguez C., Rosan T.M., Schwingner J., Séférian R., Shutler J.D., Skjelvan I., Steinhoff T., Sun Q., Sutton A.J., Sweeney C., Takao S., Tanhua T., Tans P.P., Tian X., Tian H., Tilbrook B., Tsujino H., Tubiello F., van der Werf G.R., Walker A.P., Wanninkhof R., Whitehead C., Wranne A.W., Wright R., Yuan W., Yue C., Yue X., Zaehle S., Zeng J., Zheng B. Global carbon budget 2022 // *Earth Syst. Sci. Data*. 2022. V. 14, N 11. P. 4811–4900.
5. Regnier P., Resplandy L., Najjar R.G., Ciais Ph. The land-to-ocean loops of the global carbon cycle // *Nature*. 2022. V. 603, N 7901. P. 401–410.
6. Battin T.J., Lauerwald R., Bernhardt E.S., Bertuzzo E., Gener L.G., Hall Jr R.O., Hotchkiss E.R., Maavara T., Pavelsky T.M., Ran L., Raymond P., Rosentreter J.A., Regnier P. River ecosystem metabolism and carbon biogeochemistry in a changing world // *Nature*. 2023. V. 613, N 7944. P. 449–459.

7. Liu S., Kuhn C., Amatullia G., Aho K., Butman D.E., Allen G.H., Ling P., Pan M., Yamazaki D., Brinkerhoff C., Gleason C., Xia X., Raymond P.A. The importance of hydrology in routing terrestrial carbon to the atmosphere via global streams and rivers // *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*. 2022. V. 119, N 11. P. e2106322119.
8. Raymond P.A., Hartmann J., Lauerwald R., Sobek S., McDonald C., Hoover M., Butman D., Striegl R., Mayorga E., Humborg Ch., Kortelainen P., Hans Durr H., Meybeck M., Ciais Ph., Guth P. Global carbon dioxide emissions from inland waters // *Nature*. 2013. V 503, N 7476. P. 355–359.
9. Nakayama T. Development of an advanced eco-hydrologic and biogeochemical coupling model aimed at clarifying the missing role of inland water in the global biogeochemical cycle // *J. Geophys. Res.: Biogeosci.* 2017. V. 122, N 4. P. 966–988.
10. Nakayama T. Scaled-dependence and seasonal variations of carbon cycle through development of an advanced eco-hydrologic and biogeochemical coupling model // *Ecol. Model.* 2017. V. 356, N 7. P. 151–161.
11. Leith F.I., Dinsmore K.J., Wallin M.B., Billett M.F., Heal K.V., Laudon H., Öquist M.G., Bishop K. Carbon dioxide transport across the hillslope-riparian-stream continuum in a boreal headwater catchment // *Biogeosci.* 2015. V. 12, N 6. P. 1881–1892.
12. Rocher-Ros G., Harms T.K., Sponseller R.A., Väisänen M., Mörtz C.-M., Giesler R. Metabolism overrides photo-oxidation in CO₂ dynamics of Arctic permafrost streams // *Limnol. Oceanogr.* 2021. V. 66, N 51. P. 169–181.
13. Bretz K.A., Jackson A.R., Rahman S., Monroe J.M., Hotchkiss E.R. Integrating ecosystem patch contributions to stream corridor carbon dioxide and methane fluxes // *J. Geophys. Res.: Biogeosci.* 2021. V. 126, N 9. P. e2021JG006313.
14. Pearce N.J.T., Dyczko J.M., Xenopoulos M.A. Carbon and nutrients regulate greenhouse gas fluxes from oxic stream sediments // *Biogeochem.* 2022. V. 160, N 2. P. 1–13.
15. Leng P., Li Z., Zhang Q., Li F., Koschorreck M. Fluvial CO₂ and CH₄ in a lowland agriculturally impacted river network: Importance of local and longitudinal controls // *Environ. Pollut.* 2022. V. 303. P. 119125.
16. Gómez-Gener L., Rocher-Ros G., Battin T., Cohen M.J., Dalmagro H.J., Dinsmore K.J., Drake T.W., Duvert C., Enrich-Prast A., Horgby Å., Johnson M.S., Kirk L., Machado-Silva F., Marzolf N.S., McDowell M.J., McDowell W.H., Miettinen H., Ojala A.K., Peter H., Pumpanen J., Ran L., Riveros-Iregui D.A., Santos I.R., Six J., Stanley E.H., Wallin M.B., White S.A., Sponseller R.A. Global carbon dioxide efflux from rivers enhanced by high nocturnal emissions // *Nat. Geosci.* 2021. V. 14. P. 289–294.
17. Pokrovsky O.S., Manasypov R.M., Kopysov S.G., Krickov I.V., Shirokova L.S., Loiko S.V., Lim A.G., Kolesnichenko L.G., Vorobyev S.N., Kirpotin S.N. Impact of permafrost thaw and climate warming on riverine export fluxes of carbon, nutrients and metals in Western Siberia // *Water (MDPI)*. 2020. V. 12. P. 1817.
18. Vorobyev S.N., Pokrovsky O.S., Kolesnichenko L.G., Manasypov R.M., Shirokova L.S., Karlsson J., Kirpotin S.N. Biogeochemistry of dissolved carbon, major, and trace elements during spring flood periods on the Ob River // *Hydrol. Proc.* 2019. V. 33. P. 1579–1594.
19. Krickov I.V., Serikova S., Pokrovsky O.S., Vorobyev S.N., Lim A.G., Siewert M.B., Karlsson J. Sizable carbon emission from the floodplain of Ob River // *Ecol. Indic.* 2021. V. 131. P. 108164.
20. Castro-Morales K., Canning A., Körtzinger A., Gockede M., Küsel K., Overholt W.A., Wichard T., Redlich S., Arzberger S., Kolle O., Zimov N. Effects of reversal of water flow in an Arctic floodplain river on fluvial emissions of CO₂ and CH₄ // *J. Geophys. Res.: Biogeosci.* 2022. V. 127, N 1. P. e2021JG006485.
21. Глаголев М.В. Аннотированный список литературных источников по результатам измерений потоков CH₄ и CO₂ из болот России // *Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата*. 2010. Т. 1, № 2. С. 5–57.
22. Алферов А.М., Блинов В.Г., Гитарский М.Л., Грабар В.А., Замолодчиков Д.Г., Зинченко А.В., Иванова Н.П., Ивахов В.М., Карабаню Р.Т., Карелин Д.В., Калужный И.Л., Кашин Ф.В., Конюшков Д.Е., Коротков В.Н., Кровотынцева В.А., Лаеров С.А., Марунин А.С., Парамонова Н.Н., Романовская А.А., Трунов А.А., Шилкин А.В. Юзбеков А.К. Мониторинг потоков парниковых газов в природных экосистемах. Саратов: Амирит, 2017. 279 с.
23. Смагин А.В., Глаголев М.В., Суворов Г.Г., Шнырев Н.А. Методы исследования потоков газов и состава почвенного воздуха в полевых условиях с использованием портативного газоанализатора ПГА-7 // *Вестн. МГУ. Сер. Почвоведение*. 2003. № 3. С. 29–36.
24. Глаголев М.В. К методу «обратной задачи» для определения поверхностной плотности потока газа из почвы // *Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата*. 2010. Т. 1, № 1. С. 17–36.
25. Pavelka P., Acosta M., Kiese R., Altimir N., Brümmner C., Crill P., Darenova E., Fuß R., Gielen B., Graf A., Klemmedtsson L., Lohila A., Longdoz B., Lindroth A., Nilsson M., Jiménez S.M., Merbold L., Montagnani L., Peichl M., Mari Pihlatie M., Pumpanen J., Ortiz P.S., Silvenmoinen H., Skiba U., Vestin P., Weslien P., Janous D., Kutsch W. Standardisation of chamber technique for CO₂, N₂O, and CH₄ fluxes measurements from terrestrial ecosystems // *Int. Agrophys.* 2018. V. 32, N 12. P. 569–587.
26. Riederer M., Serafimovich A., Foken T. Net ecosystem CO₂ exchange measurements by the closed chamber method and the eddy covariance technique and their dependence on atmospheric conditions // *Atmos. Meas. Tech.* 2014. V. 7, N 4. P. 1057–1064.
27. Maier M., Weber T.K.D., Fiedler J., Fuß R., Glatzel S., Huth V., Jordan S., Jurasinski G., Kutzbach L., Schäfer K., Weymann D., Hagemann U. Introduction of a guideline for measurements of greenhouse gas fluxes from soils using non-steady-state chambers // *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 2022. V. 185, N 4. P. 447–461.
28. Lim A.G., Krickov I.V., Vorobyev S.N., Korets M.A., Kopysov S., Shirokova L.S., Karlsson J., Pokrovsky O.S. Carbon emission and export from the Ket River, Western Siberia // *Biogeosci.* 2022. V. 19, N 24. P. 5859–5877.
29. Krickov I.V., Lim A.G., Shirokova L.S., Korets M.A., Karlsson J., Pokrovsky O.S. Environmental controllers for carbon emission and concentration patterns in Siberian rivers during different seasons // *Sci. Total Environ.* 2023. V. 859. P. 160202.
30. Kutzbach L., Wille C., Pfeiffer E.-M. The exchange of carbon dioxide between wet arctic tundra and the atmosphere at the Lena River delta, Northern Siberia // *Biogeosci.* 2007. V. 4, N 5. P. 869–890.
31. Панченко М.В., Домышева В.М., Пестунов Д.А., Сакирко М.В., Заворуев В.В., Новицкий А.Л. Экспериментальные исследования процессов газообмена CO₂

- в системе «атмосфера — водная поверхность» оз. Байкал (постановка эксперимента) // Оптика атмосф. и океана. 2007. Т. 20, № 5. С. 448–452.
32. Домышева В.М., Сакирко М.В., Пестунов Д.А., Панченко М.В. Сезонный ход процесса газообмена CO₂ в системе «атмосфера — вода» в литорали Южного Байкала. 2. Гидрологическое лето // Оптика атмосф. и океана. 2011. Т. 24, № 9. С. 737–742; *Domyshева V.M., Sakirko M.V., Pestunov D.A., Panchenko M.V.* Seasonal behavior of the CO₂ gas exchange process in the “atmosphere — water” system of littoral zone of Southern Baikal. 2. Hydrological summer // Atmos. Ocean. Opt. 2013. V. 26, N 2. P. 163–169.
 33. Домышева В.М., Сакирко М.В., Пестунов Д.А., Панченко М.В. Сезонный ход процесса газообмена CO₂ в системе «атмосфера — вода» в литорали Южного Байкала. 3. Осень // Оптика атмосф. и океана. 2012. Т. 25, № 9. С. 826–832; *Domyshева V.M., Sakirko M.V., Pestunov D.A., Panchenko M.V.* Seasonal behavior of the CO₂ gas exchange process in the “atmosphere — water” system of littoral zone of Southern Baikal. 3. Autumn // Atmos. Ocean. Opt. 2013. V. 26, N 3. P. 252–258.
 34. Домышева В.М., Пестунов Д.А., Сакирко М.В., Шамрин А.М., Панченко М.В. К оценке бюджета потоков углекислого газа в системе «атмосфера — вода» в литорали Южного Байкала с применением метода плавающих камер // Оптика атмосф. и океана. 2015. Т. 28, № 6. С. 552–560; *Domyshева V.M., Pestunov D.A., Sakirko M.V., Shamrin A.M., Panchenko M.V.* Estimation of CO₂ fluxes in the “atmosphere — water” system in the South Lake Baikal littoral with the floating chamber method // Atmos. Ocean. Opt. 2015. V. 28, N 6. P. 543–550.
 35. Пестунов Д.А., Домышева В.М., Иванов В.Г., Шамрин А.М., Панченко М.В. Пространственное распределение направления потоков CO₂ и CH₄ по акватории озера Байкал (кругобайкальская экспедиция, июнь 2013 г.) // Оптика атмосф. и океана. 2015. Т. 28, № 9. С. 792–799.

M.Yu. Arshinov, B.D. Belan, D.K. Davydov, D.V. Simonenkov, A.V. Fofonov. Carbon dioxide emissions from freshwater systems in Western Siberia.

One of the possible sources of carbon dioxide emission into the atmosphere can be river ecosystems. The paper presents the results of measuring CO₂ fluxes from the surface of several rivers and lakes in the Tomsk region. The experimental period average carbon dioxide fluxes were 143.7 ± 21.7 (August 13–14, 2023), 53.3 ± 21.2 (August 19), and 80.4 ± 59.9 mgC · m⁻² · h⁻¹ for the Ob River; 66.1 ± 17.3 mgC · m⁻² · h⁻¹ for the Ket River; 33.3 ± 17.3 mgC · m⁻² · h⁻¹ for the swamp Karasevoye Lake, 50.2 ± 23.0 mgC · m⁻² · h⁻¹ for the Suiga River, and 81.9 ± 11.5 mgC · m⁻² · h⁻¹ for the Iksha River. The flux magnitudes significantly depended not only on the object of the study, but also on hydrometeorological conditions.