

УДК 551.506.5

## К оценке бюджета потоков углекислого газа в системе «атмосфера–вода» в литорали Южного Байкала с применением метода плавающих камер

В.М. Домышева<sup>1</sup>, Д.А. Пестунов<sup>2,3</sup>, М.В. Сакирко<sup>1</sup>,  
А.М. Шамрин<sup>2</sup>, М.В. Панченко<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Лимнологический институт СО РАН  
664033, г. Иркутск, ул. Улан-Баторская, 3

<sup>2</sup>Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН  
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

<sup>3</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30

Поступила в редакцию 5.03.2015 г.

Дано обоснование применимости используемого нами камерного метода для измерения потоков углекислого газа между атмосферой и водой в литорали оз. Байкал, обсуждаются его достоинства и недостатки. Сопоставляются данные, представленные ранее, с результатами, полученными в 2011–2014 гг., в которые наблюдались кардинально разные погодные ситуации. Показано, что межгодовые вариации суммарных потоков CO<sub>2</sub> гораздо меньше, чем сезонные изменения этих величин. Приведена и обоснована оценка «снизу» суммарного потока углекислого газа, который направлен в воду и составляет примерно 6,5–7 г · м<sup>-2</sup>/год за период открытой воды.

*Ключевые слова:* поток углекислого газа, система «атмосфера–вода», камерный метод, суммарный поток, оз. Байкал; carbon dioxide flux, “atmosphere–water” system, chamber method, Lake Baikal, total flux.

### Введение

В связи с глобальной проблемой наблюдаемого неуклонного роста концентрации углекислого газа в атмосфере [1–3] наряду с изучением газообмена CO<sub>2</sub> между атмосферой и Мировым океаном в настоящее время представляют интерес аналогичные исследования процессов, протекающих в системе «атмосфера–вода» континентальных водоемов [4, 5].

Очевидно, что в условиях происходящих климатических изменений и усиливающегося антропогенного воздействия на окружающую среду необходимо и детальное изучение всех составляющих цикла углерода. Для Байкала особенно актуально знание потоков углекислого газа в системе «атмосфера–вода», являющихся основой фотосинтетической деятельности планктонного сообщества, которое на протяжении многих веков обеспечивает сохранение «эталонной» чистоты воды озера [6].

В изменении концентрации углекислого газа, кислорода и биогенных элементов в воде ключевую

роль играет процесс фотосинтеза водной биоты. Соответственно процесс газообмена CO<sub>2</sub> в системе «атмосфера–вода» зависит как от физико-химического состояния воды, так и от собственных биологических ритмов планктона. Гидрологические и биологические ритмы в определенной степени связаны между собой, но, с другой стороны, имеют свой внутренний сезонный ход и межгодовую изменчивость. Следовательно, климатическая значимость полученных данных и оценок во многом определяется качеством измерений, продолжительностью рассматриваемого периода многолетних наблюдений и соответственно зависит от большого числа внешних межгодовых и сезонных погодных факторов, а также собственных циклов развития биоты Байкала [7].

В 2002 г. на побережье Байкала нами были начаты первые циклы наблюдений, а с 2004 г. проводятся ежегодные круглосуточные циклы комплексных измерений продолжительностью 10–20 дней для каждого из сезонов. За период с 2004 по 2010 г. в литоральной зоне Байкала в поверхностной воде были изучены типичные проявления суточного хода биогенных элементов, растворенных газов и потоков CO<sub>2</sub> в разные сезоны года («весна», «лето», «осень») [8–10], а также сделана оценка общего бюджета потока углекислого газа для всего периода открытой воды [11].

\* Валентина Михайловна Домышева (hydrochem@lin.irk.ru); Дмитрий Александрович Пестунов (pest@iao.ru); Мария Владимировна Сакирко (sakirko@lin.irk.ru); Артем Михайлович Шамрин (shamrin.ar@yandex.ru); Михаил Васильевич Панченко (pmv@iao.ru).

В настоящей статье дано обоснование применимости выбранного нами метода плавающих камер для измерения потоков газа между атмосферой и водой, обсуждаются его достоинства и недостатки. Проведено сопоставление ранее представленных данных [7–10] с результатами наблюдений 2011–2014 гг. На наш взгляд, это дополнение будет весьма полезно, поскольку в 2010, 2011 и 2012 гг. в холодный период в регионе наблюдались кардинально разные погодные ситуации, которые во многом определили характер гидрологических, химических и биологических процессов в воде Байкала после схода ледяного покрова [11].

## Методические аспекты

Учитывая, что в предыдущих публикациях были представлены основные сведения об используемом нами оборудовании [12, 13], в настоящей статье ограничимся лишь их кратким описанием и более подробно остановимся на вопросах, которые определили выбор камерного метода в составе нашего комплекса для определения потоков  $\text{CO}_2$ .

Для проведения измерений было выбрано западное побережье Южного Байкала в районе пос. Большие Коты. Этот участок территории по данным ранее проведенной серии измерений аэрозольно-газовых характеристик атмосферы вполне может рассматриваться как «фоновый». Непосредственно весь аппаратный комплекс размещается на стационаре Лимнологического института СО РАН (51°54' с.ш., 105°04' в.д.), где для этих исследований создана совместная Байкальская атмосферно-лимнологическая обсерватория СО РАН (БАЛО). В состав обсерватории входят береговая лаборатория и выносной газоаналитический пункт.

Дно озера в месте расположения газоаналитического комплекса песчаное, с небольшим вкраплением камней, покрытых редкой растительностью. Подводный свал с резким набором глубины (наклон до 45°) находится на расстоянии около 100 м от берега. Благодаря огромной массе воды озеро оказывает существенное влияние на температурный режим прилегающих территорий [14].

Выносной пункт обсерватории (рис. 1), в котором размещена система управления и сбора информации, газоаналитическая аппаратура и эквипиратор, располагается на оконечности пирса на расстоянии около 30 м от берега. Отдельно на высоте 1 м над поверхностью воды на выносной штанге помещена головка ультразвуковой (УЗ) метеостанции, обеспечивающей измерения температуры воздуха и трех ортогональных компонент скорости ветра. Комплекс содержит пиранометр и датчики для измерения профиля температуры воды от поверхности и на трех уровнях по глубине до дна.

На поверхности воды размещены две плавающие полупогруженные камеры (рис. 1, б). Одна из камер постоянно закрыта (воздушный объем камеры  $V_k$  составляет 0,34 м<sup>3</sup>, а площадь охватываемой водной поверхности  $S_k$  равна 1,6 м<sup>2</sup>), другая камера ( $V_k = 0,32$  м<sup>3</sup>,  $S_k = 0,81$  м<sup>2</sup>) обеспечена устройством

автоматического проветривания. Камеры и другое измерительное оборудование выносятся с западной стороны от пирса, что обеспечивает постановку обеих камер на расстояние от берега около 30 м. Глубина воды в месте расположения проветриваемой камеры 2–3 м (в зависимости от сезонов года). Насос для забора пробы для эквипиратора вынесен от пирса на 2 м в сторону открытой части озера.

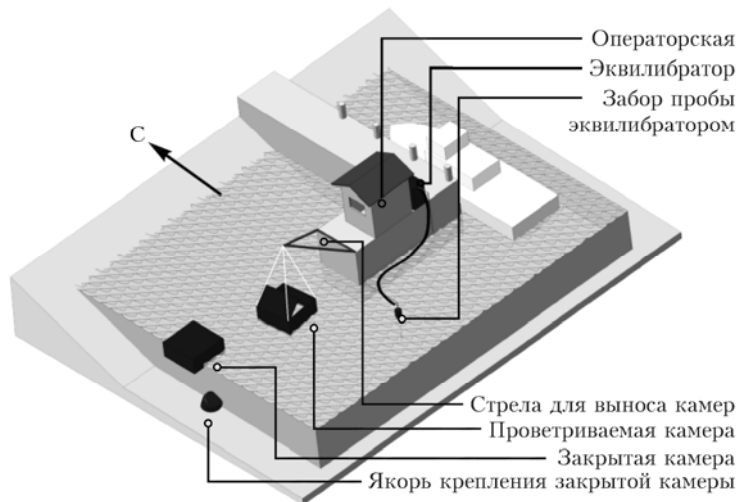
Отбор проб поверхностной воды для химического анализа в стандартном цикле наблюдений производится каждые 3 ч непосредственно около проветриваемой камеры. Далее в полевой лаборатории осуществляются анализ проб воды (определяется необходимый набор химических и флуоресцентных характеристик), а также фиксация гидробиологических проб для последующего анализа. Измерения гидрохимических характеристик проводятся лабораторией гидрохимии ЛИН СО РАН (лаборатория аккредитована Федеральной службой по аккредитации на техническую компетентность и независимость, участвует в ежегодных межлабораторных сравнительных испытаниях в рамках WMO, ЕМЕР и EANET, а также имеет лицензию Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды на осуществление деятельности в области гидрометеорологии и в смежных с ней областях. Регистрационный номер Р/2012/2039/100/Л).

*Метод плавающих камер.* Исходя из поставленной задачи комплексного измерения физических, химических и биологических составляющих процесса газообмена «атмосфера–вода» в литорали озера, из различных методов определения потоков газа был выбран камерный метод, который, с учетом специфики условий данной среды, представляется нам единственно возможным. Суть этого метода заключается в размещении на воде полупогруженной камеры без нижней стенки, которая ограничивает определенный объем воздуха над водной поверхностью. Линейные размеры камеры предварительно выбираются с учетом необходимого временного разрешения измерений потоков и определяются исходя из точности и чувствительности применяемых газоанализаторов. Величина потока  $F_k$  рассчитывается по формуле

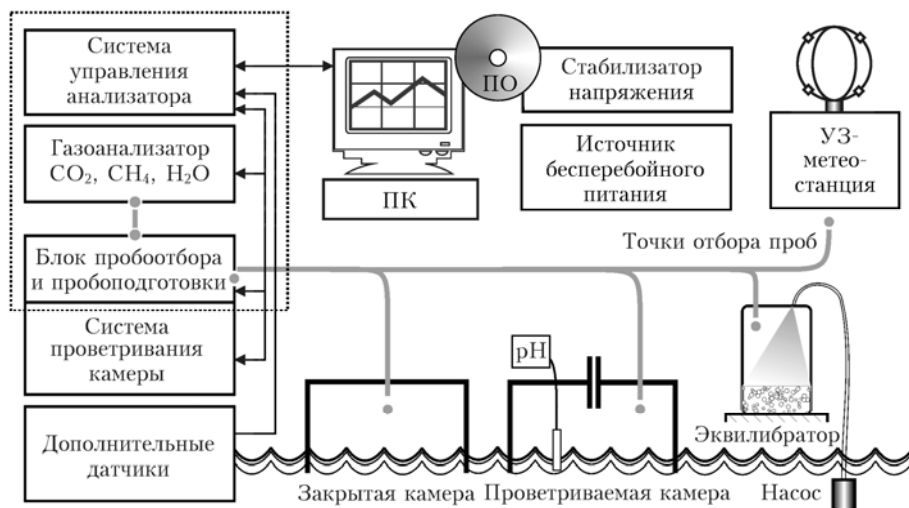
$$F_k = \frac{\Delta C V}{\Delta t S}, \quad (1)$$

где  $C$  – концентрация газа, мг/л;  $\Delta C/\Delta t$  – изменение концентрации газа в камере за время  $\Delta t$ ;  $V$  и  $S$  – внутренний объем (л) и площадь покрытия водной поверхности (м<sup>2</sup>) соответственно.

В дополнение к камерному методу с помощью эквипиратора [13] мы получаем равновесные парциальные давления газа с поверхностной и придонной водой. Измерения концентрации углекислого газа в приводной атмосфере, камерах и эквипираторах проводятся одним газоанализатором. До 2012 г. использовался газоанализатор LiCOR-840 (LI-COR, Inc., США), а с 2012 г. – газоанализатор Picarro 2301-f (Picarro, Inc., США), погрешность измерения  $\text{CO}_2$  которых не хуже 3 и 0,2 млн<sup>-1</sup> соответственно. Пробы



а



б

Рис. 1. Выносной пункт Байкальской атмосферно-лимнологической обсерватории (а), состав аппаратно-программного комплекса (б)

с каждого из источников подаются на газоанализатор поочередно через многоканальный газовый коммутатор. В стандартном режиме, который использовался нами на протяжении практически всех измерительных циклов, отбор газа в течение каждого часа автоматически осуществлялся по пяти каналам. По одному каналу поступает воздух из приводной атмосферы (высота точки отбора 1 м над поверхностью воды), по двум другим – из камер, и еще по двум каналам – от эквилибраторов. Часовой цикл разбит на следующие этапы:

- 1) измерение в надводной атмосфере – 10 мин;
- 2) измерение в закрытой камере – 10 мин;
- 3) измерение в эквилибраторах – 20 мин;
- 4) измерение в проветриваемой камере, включая процедуру проветривания, – 20 мин.

Камерный метод достаточно широко применяется в мировой практике изучения процессов газообмена над различными типами подстилающей поверхности, в том числе и над водной поверхностью [15]. В настоящее время для измерения потоков газов

с подстилающей поверхности разработаны различные методы (см., например, [16–19]). Но выбор нами именно камерного метода в первую очередь продиктован спецификой постановки исследований в прибрежной зоне, т.е. на границе раздела существенно разных экосистем. Действительно, широко распространенные сегодня микрометеорологические методики требуют высокоточного определения мгновенных концентраций исследуемого газа, метеорологических величин и их высших статистических моментов. В этом случае возникает проблема выбора периода осреднения исследуемых характеристик по времени и, следовательно, по пространству. Это в свою очередь неизбежно накладывает ограничения на выбор места расположения измерительной аппаратуры, для которого должны выполняться следующие условия: плоский рельеф местности, достаточно однородная подстилающая поверхность, так что поля скорости ветра и температуры однородны по горизонтали и статистически стационарны. Только при выполнении этих условий статистические характери-

стики метеорологических полей не зависят от горизонтальных координат точки измерения и, следовательно, могут обуславливаться лишь высотой расположения приборов (см., например, [20, 21]).

В прибрежной зоне Байкала, где проходит контрастная температурная граница между водой и окружающим берегом со сложным горным рельефом, движения воздушных масс зависят не только от градиентных и местных ветров, но, и весьма существенно, от сложного сочетания бризовой и горно-долинной циркуляции в течение суток. Отсюда возникает неразрешимая проблема выбора приемлемого места расположения измерительной аппаратуры, высоты забора проб и длительности осреднения измеряемых сигналов. В настоящее время не существует соответствующей модели описания атмосферной турбулентности в таких условиях, и специалисты только приступают к разработке математического аппарата [22].

Широкое распространение для оценки потоков  $\text{CO}_2$  в системе «атмосфера–вода» получил так называемый метод тонкого слоя, основанный на измерении скорости ветра и разности парциальных давлений газа в атмосфере и в воде, который может быть описан следующим выражением:

$$F = k\Delta P_{\text{CO}_2}, \quad (2)$$

где  $\Delta P_{\text{CO}_2} = (P_{\text{CO}_2} - p_{\text{CO}_2})$  – разница парциальных давлений углекислого газа в приводной атмосфере  $p_{\text{CO}_2}$  и растворенного в поверхностной воде  $P_{\text{CO}_2}$ ;  $k$  – коэффициент турбулентного обмена, зависящий от скорости ветра (как правило, на высоте 10 м от поверхностного слоя) при данной температуре (см., например, [23–25]).

Отметим, что этот метод также предъявляет существенные требования к высокоточному измерению турбулентных характеристик в приводном слое атмосферы, в связи с чем возникает проблема выбора периода осреднения, либо обуславливает необходимость использования при расчетах потоков коэффициентов  $k$ , которые зависят от скорости ветра, но были получены эмпирически для однородных пространств водной поверхности и в разных публикациях при повышенных значениях скорости ветра могут различаться более чем в 2 раза [23, 25]. Весь перечень проблем, связанных с применением этого метода, подробно рассмотрен в работе [4].

Исходя из основной цели комплексных исследований, можно сделать главный вывод, что применение плавающей камеры позволяет выделить определенную площадь изучаемой поверхности и осуществить забор проб воды для анализа химического и биологического состава непосредственно в месте измерения потоков. Именно этот аспект определяет возможность корректно сопоставить содержание в воде биогенных элементов, растворенных газов и потоков  $\text{CO}_2$  с хорошим временным разрешением и выявить наиболее характерные проявления суточного хода.

Конечно, используемый нами камерный метод измерения потоков углекислого газа с поверхности воды не свободен от следующих ограничений и недостатков.

1. Камерные измерения становятся невозможными в штормовых ситуациях.

2. Сама камера влияет на объект исследования. Отмечается определенное искажение температуры, освещенности и ветрового режима, способных влиять на газообмен. Поскольку внутри камеры при помощи вентиляторов поддерживается практически постоянный ветровой режим (2–3 м/с), то в условиях полного штиля измерения могут давать завышенные значения потока, а при сильном ветре, наоборот, занижать его величину.

3. При сильном волнении и, соответственно, большом крене камеры не исключены спорадические «паразитные» проветривания измерительного объема внутри камеры. В то же время в определенной степени часть ошибок, обусловленных случайным проветриванием, удается убрать при обработке результатов сравнением с данными второй неветилируемой камеры (см. рис. 1, б).

В целом же многолетний опыт измерений и анализа результатов показал, что при комплексной обработке данных измерений парциальных давлений  $\text{CO}_2$  в воде и в приводной атмосфере, химических и флуоресцентных характеристик поверхностной воды и соответствующей селекции получаемых результатов применение этого метода позволяет с неплохим временным разрешением достаточно надежно исследовать процесс суточного хода газообмена в большинстве погодных ситуаций.

### **Сезонный ход процесса газообмена и межгодовая изменчивость в период открытой воды**

При исследовании Байкала мы имеем дело как с гидрологическими, так и с биологическими переходными процессами – после вскрытия льда идет прогрев воды, заканчивается вегетация подледного комплекса водорослей, затем при дальнейшем прогреве начинает развиваться их летнее сообщество и, наконец, следуют осеннее охлаждение и завершение летней вегетации. Опираясь на опыт проведенных исследований, отметим, что изменчивость содержания  $\text{CO}_2$  и кислорода в воде, а также концентрации биогенных элементов наиболее сильно проявляются в суточном цикле. Главным фактором, определяющим суточные колебания их содержания, служат процессы фотосинтеза и деструкции органического вещества, включая дыхание гидробионтов.

Процессы газообмена в системе «атмосфера–вода» определяются еще и многими другими факторами (например, температурой воды, скоростью ветра, состоянием водной поверхности и т.п.), имеющими иной временной масштаб изменчивости. Следовательно, суточный ход концентрации химических компонентов в воде формируется в результате наложения совокупности изменений внешних сезонных, суточных, гидрометеорологических условий на биологические ритмы продуцирования и деструкции органического вещества, а для растворенных

в воде газов — еще и на интенсивность физико-химических процессов перехода газов через водную поверхность. Но именно суточный ход газообмена  $\text{CO}_2$  позволяет получить более детальное представление о сезонной изменчивости этого процесса в литорали озера по сравнению с данными измерений, которые проводятся только в ограниченный период времени суток (например, только в светлое время).

В период открытой воды суточный ход потоков углекислого газа проявляется весьма отчетливо (рис. 2 и 3).

С мая по июль увеличивается амплитуда суточного хода концентраций  $\text{CO}_2$  в воде. Среднесуточный бюджет потока углекислого газа в мае близок к нулю, а уже в июне начинает наблюдаться отчетливый сток  $\text{CO}_2$  на водную поверхность. Далее активная фотосинтетическая деятельность фитопланктона в летний период настолько уменьшает концентрацию  $\text{CO}_2$ , что его парциальное давление практически на протяжении почти всего времени суток становится ниже атмосферного. Соответственно увеличиваются и продолжительность, и интенсивность потока углекислого газа из атмосферы на водную поверхность. Именно поэтому в период гидрологического лета литоральная зона оз. Байкал в годовом ходе является наиболее мощным стоком углекислого газа.

В осенний период в воде литорали оз. Байкал процесс изменения концентраций растворенных газов в поверхностной воде озера противоположен процессу, наблюдающемуся в весенне-летний период. Концентрация углекислого газа в воде возрастает начиная со второй половины сентября к декабрю. В октябре в литорали Байкала еще наблюдается сток  $\text{CO}_2$  из атмосферы на водную поверхность, суточный бюджет которого сравним по величине со среднесуточным стоком в период гидрологического лета. К середине ноября суточный баланс потока  $\text{CO}_2$  изменяет знак и поверхность озера становится источником поступления углекислого газа в приводную атмосферу, выход которого продолжает усиливаться и достигает своих максимальных значений в декабре, вплоть до начала ледостава.

## Оценка бюджета

На рис. 4 приведены среднемесячные значения суммарного суточного потока углекислого газа для периода открытой воды в литоральной зоне Байкала (серый цвет — осреднение за период наблюдений 2004–2010 гг. и черный — за период 2004–2014 гг.).

Сравнивая величины среднемесячных суточных значений потока  $\text{CO}_2$  в двух массивах, приведенных на рис. 4, отметим, что дополнение 6-летнего ряда

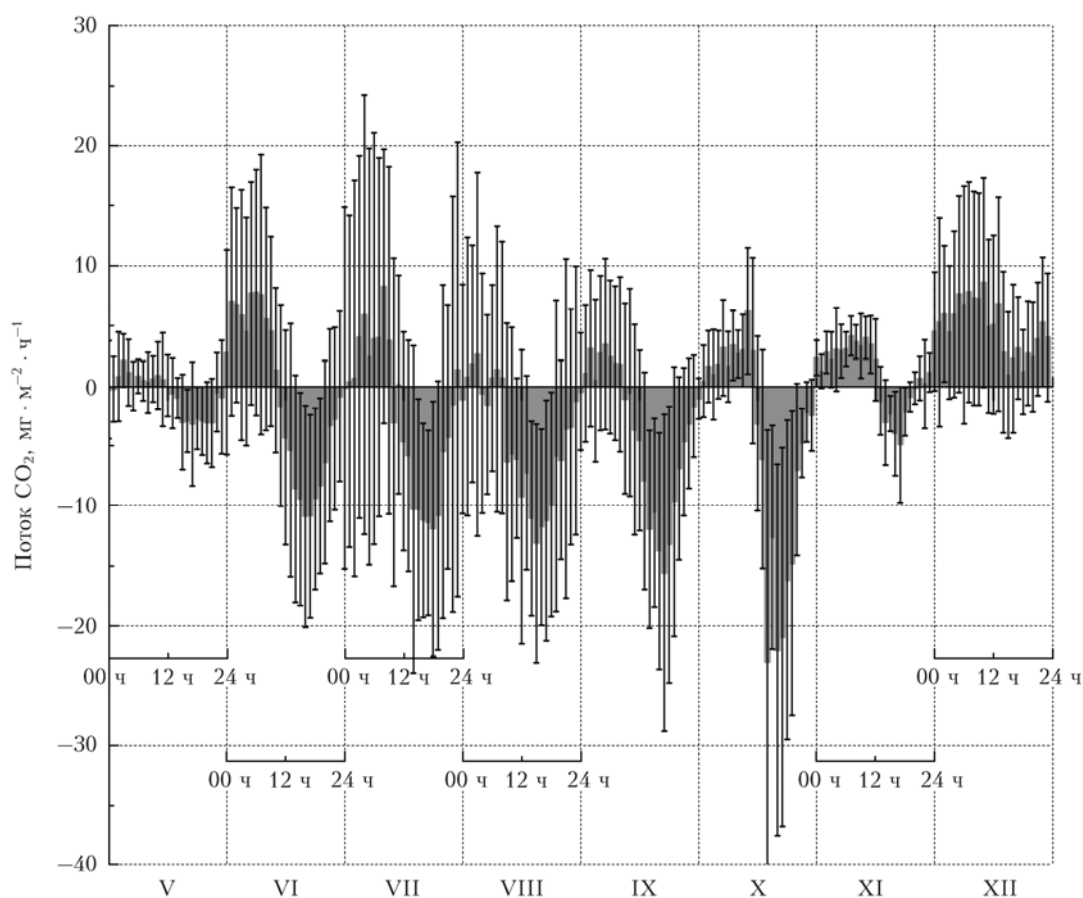


Рис. 2. Средний суточный ход потоков углекислого газа для каждого месяца в период открытой воды

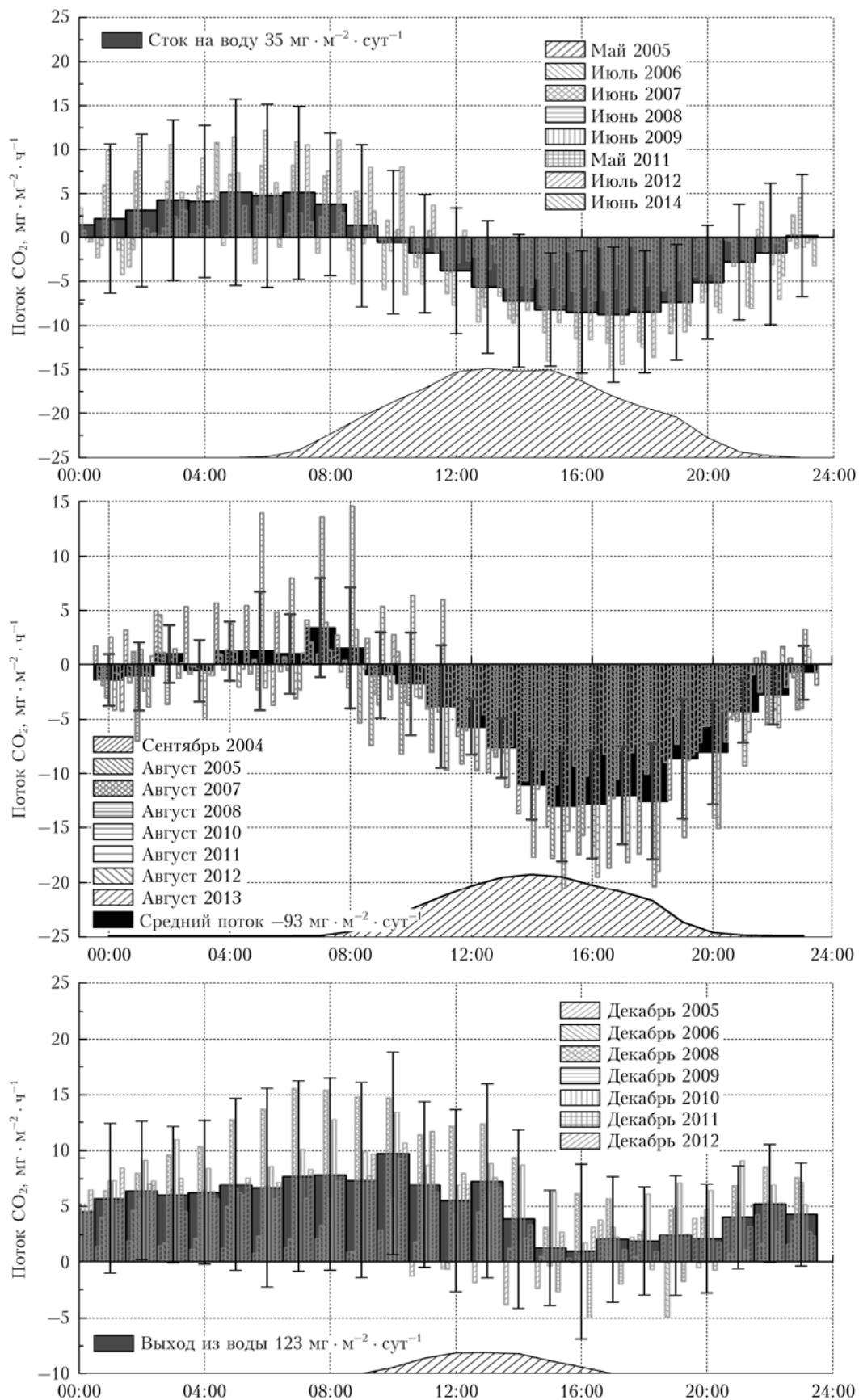


Рис. 3. Средний суточный ход потоков углекислого газа в разные периоды года (отрицательные значения соответствуют стоку на водную поверхность). Заштрихованная область внизу – относительная интенсивность и продолжительность инсоляции

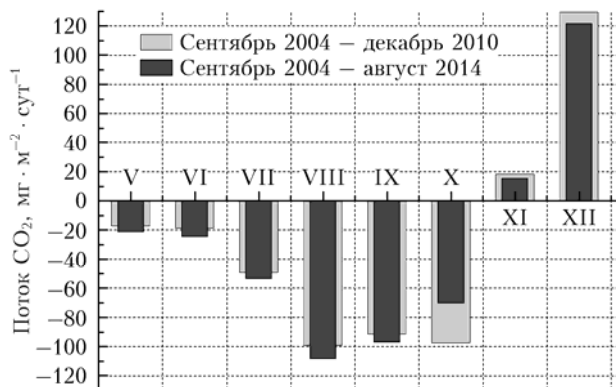


Рис. 4. Среднемесячные значения суммарного суточного потока углекислого газа для периода открытой воды

измерений еще 4-летним циклом существенно не изменило представления о сезонном ходе. Видно, что межгодовые вариации суммарных потоков углекислого газа в системе «атмосфера–вода» в литорали озера для периода открытой воды, наблюдаемые в полученных данных, гораздо меньше, чем сезонные изменения этих величин (рис. 4).

Суммарный сток  $\text{CO}_2$  через границу «атмосфера–вода» в литорали оз. Байкал начинает возрастать с мая, достигая максимальных значений в августе–сентябре (см. рис. 4). Снижение величины стока начинает наблюдаться с конца сентября, а нулевой баланс газообмена – в конце октября – начале ноября. Максимальная скорость среднесуточного выхода  $\text{CO}_2$  около  $120 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$  зарегистрирована в декабре.

На основании имеющихся данных измерений 2004–2014 гг. был оценен суммарный сток углекислого газа из атмосферы в литорали оз. Байкал в период открытой воды, который составил примерно  $6,5\text{--}7 \text{ г} \cdot \text{м}^{-2}/\text{год}$ .

## Обсуждение результатов

Для того чтобы проанализировать качество оценки годового бюджета потоков углекислого газа в период открытой воды в литорали оз. Байкал, необходимо отметить, что измерения потоков с применением плавающей камеры по понятным техническим причинам во время вскрытия и начала схода льда на Байкале нами не проводились. Гипотетически можно предполагать, что в этот момент происходит и выход углекислого газа с поверхности воды, а следовательно, и изменение суммарного стока за весь период. Но данные наших наблюдений, проведенных до вскрытия ледового покрова в течение ряда лет, показывают, что парциальное давление углекислого газа в подледной воде во всех измерительных циклах заметно меньше давления  $p_{\text{CO}_2}$  в атмосфере (рис. 5). Следовательно, стоит ожидать, что при вскрытии озера поток углекислого газа будет направлен из атмосферы на водную поверхность.

Необходимо рассмотреть и ряд аспектов, связанных непосредственно с недостатками камерного метода. В литоральной зоне Байкала в период открытой

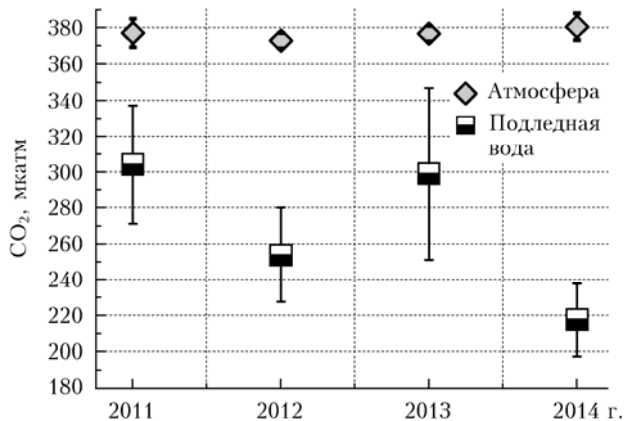


Рис. 5. Среднесуточные значения парциального давления углекислого газа в подледной воде –  $P_{\text{CO}_2}$  и в атмосфере –  $p_{\text{CO}_2}$

воды, как правило, хорошо выражен суточный ход бризовой циркуляции воздуха. После утреннего затихья в дневное время с 10–11 ч начинается ветер с открытой части озера, максимум скорости которого достигается в послеполуденное время и зачастую превышает скорость обдува внутри камеры (2–3 м/с). В это же время в дневном ходе наблюдается и наиболее сильный сток углекислого газа из атмосферы. Следовательно, в соответствии с формулой (2) (см., например, [23, 24]) можно полагать, что в реальных условиях величина стока  $\text{CO}_2$  в воду выше, чем регистрируется в камере.

Усиление ветра способствует и развитию волнения, которое может приводить к поступлению атмосферного воздуха во внутренний объем камеры, что не всегда удастся учесть при анализе результатов, и тем самым замедлять снижение парциального давления  $\text{CO}_2$  в цикле измерения скорости стока. Следовательно, и этот процесс в дневных условиях занижает измеряемую величину стока в воду.

Днем возможный нагрев поверхности воды внутри камеры, увеличивая парциальное давление углекислого газа в воде, также приводит к уменьшению регистрируемой величины стока. В ночных условиях скорость ветра с берега, как правило, меньше, чем днем, поскольку контраст температуры выхолаживающейся поверхности берега и холодной воды Байкала невелик, а следовательно, ограничение ветрового обмена внутри камеры в меньшей степени сказывается на определении суммарного выхода потока  $\text{CO}_2$ .

Понятно, что случаи штормовых ситуаций не были нами включены в суммарную оценку бюджета потоков углекислого газа. Но поскольку такие события равновероятны и в дневных (сток  $\text{CO}_2$ ), и в ночных условиях (выход  $\text{CO}_2$ ), то в качестве первого приближения можно полагать, что их общий вклад в оценку бюджета будет скомпенсирован.

Таким образом, рассмотренные нами возможные погрешности применения камерного метода для оценки суточного баланса потока углекислого газа в системе «атмосфера–вода» в период открытой воды могут привести лишь к занижению итоговой стоковой составляющей бюджета.

В ряде декабрьских измерительных циклов нам удалось зафиксировать, что во время замерзания поверхности воды в камере происходит разовый выброс углекислого газа в атмосферу, величина которого в декабре 2009 г. составляла около  $40\text{--}90 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2}$  [9]. Предположим, что в идеализированном случае идет одновременное образование льда на всей акватории озера и в атмосферу разово поступает порция углекислого газа (около  $100 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2}$ ). Очевидно, что эта неучтенная нами добавка эквивалентна средней величине потока, который поступает в декабре в атмосферу за 1 сут, и она заметно меньше, чем общий бюджет стока  $\text{CO}_2$  за весь период открытой воды.

### Заключение

Из проведенного анализа результатов 10-летнего ряда наблюдений с применением метода плавающих камер и учитывая сделанные методические замечания, следует, что полученная нами величина стока углекислого газа ( $6,5\text{--}7 \text{ г} \cdot \text{м}^{-2}$ ) из атмосферы в литорали Южного Байкала в период открытой воды должна рассматриваться как оценка снизу. В то же время отметим, что наблюдаемое потепление климата уже сказывается на начале ледостава на Байкале, в частности в 2015 г. южная часть озера до первых чисел февраля практически не имела ледового покрова [26]. Если продолжительность периода открытой воды будет и далее увеличиваться за счет позднего ледостава, то суммарный бюджет стока  $\text{CO}_2$  на поверхность озера может существенно уменьшиться.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 14-05-00277а), Программы фундаментальных исследований Отделения наук о Земле РАН № 10 и экспедиционных грантов СО РАН.

1. *Изменение климата*, 2001 г. Обобщенный доклад. Вклад 1, 2 и 3-й Рабочих групп в подготовку Третьего доклада об оценке Межправительственной группы экспертов по изменению климата. ВМО, ЮНЕП. Норвегия: Изд-во «ГРИД-Арендаль», 2003. 219 с.
2. *Emissions Scenarios*. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2000. 600 p.
3. *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation*. Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Intergovernmental Panel on Climate Change, 2012. 594 p.
4. *Emerson S.* Chemically enhanced  $\text{CO}_2$ , gas exchange in an eutrophic lake; a general model // *Limnol. Oceanogr.* 1975. V. 20, N 5. P. 743–753.
5. *Renbin Zhu, Yashu Liu, Hua Xu, Tao Huang, Jianjun Sun, Erdeng Ma, Liguang Sun.* Carbon dioxide and methane fluxes in the littoral zones of two lakes, east Antarctica // *Atmos. Environ.* 2010. V. 44, iss. 3. P. 304–311.
6. *Грачев М.А., Домышева В.М., Ходжер Т.В., Коровякова И.В., Голобокова Л.П., Погодаева Т.В., Верещагин А.Л., Гранин Н.Г., Гнатовский Р.Ю., Косторнова Т.Я.* Глубинная вода озера Байкал – природный стандарт пресной воды // *Химия в интересах устойчивого развития*. 2004. № 12. С. 417–429.

7. *Домышева В.М., Усольцева М.В., Сакирко М.В., Пестунов Д.А., Шимараев М.Н., Поповская Г.И., Панченко М.В.* Пространственное распределение потоков углекислого газа, биогенных элементов и биомассы фитопланктона в пелагиали оз. Байкал в весенний период 2010–2012 гг. // *Оптика атмосф. и океана*. 2014. Т. 27, № 6. С. 539–545.
8. *Домышева В.М., Сакирко М.В., Пестунов Д.А., Панченко М.В.* Сезонный ход процесса газообмена  $\text{CO}_2$  в системе «атмосфера–вода» в литорали Южного Байкала. 1. Гидрологическая весна // *Оптика атмосф. и океана*. 2010. Т. 23, № 12. С. 1067–1074.
9. *Домышева В.М., Сакирко М.В., Пестунов Д.А., Панченко М.В.* Сезонный ход процесса газообмена  $\text{CO}_2$  в системе «атмосфера–вода» в литорали Южного Байкала. 2. Гидрологическое лето // *Оптика атмосф. и океана*. 2011. Т. 24, № 9. С. 737–742.
10. *Домышева В.М., Сакирко М.В., Пестунов Д.А., Панченко М.В.* Сезонный ход процесса газообмена  $\text{CO}_2$  в системе «атмосфера–вода» в литорали Южного Байкала. 3. Осень // *Оптика атмосф. и океана*. 2012. Т. 25, № 9. С. 826–832.
11. *Panchenko M., Pestunov D., Sakirko M., Domysheva V.* Air–water carbon dioxide exchange in the littoral zone of Lake Baikal (ice-free period) // *Int. J. Geosci.* 2013. N 4. P. 1339–1345.
12. *Панченко М.В., Домышева В.М., Пестунов Д.А., Сакирко М.В., Заворухов В.В., Новицкий А.Л.* Экспериментальные исследования процессов газообмена  $\text{CO}_2$  в системе «атмосфера – водная поверхность» оз. Байкал (постановка эксперимента) // *Оптика атмосф. и океана*. 2007. Т. 20, № 5. С. 448–452.
13. *Пестунов Д.А., Шмаргунов В.П., Панченко М.В.* Измеритель содержания  $\text{CO}_2$ , растворенного в воде // *Приборы и техн. эксперим.* 2008. № 5. С. 143–145.
14. *Гидрометеорологический режим и тепловой баланс озера Байкал* / В.И. Верболов, В.М. Сокольников, М.Н. Шимараев. М.; Л.: Наука, 1965. 373 с.
15. *Kremer J.N., Reischauer A., D'Avanzo Ch.* Estuary-specific variation in the air–water gas exchange coefficient for oxygen // *Estuaries*. A. 2003. V. 26, N 4. P. 829–836.
16. *Панин Г.Н.* Тепло- и массообмен между водоемом и атмосферой в естественных условиях. М.: Наука, 1985. 206 с.
17. *Goulden M.L., Munger J.W., Fan S.M., Daube B.C., Wofsy S.C.* Measurements of carbon storage by long-term eddy correlation: Methods and a critical evaluation of accuracy // *Glob. Change Biol.* 1996. V. 2, N 3. P. 169–182.
18. *Daisuke Komori, Masatoshi Aoki, Tomoyasu Ishida.* Development of an air sampling system for the true EA technique // *J. Agric. Meteorol.* 2004. V. 60, N 4. P. 263–272.
19. *János Balogh, Szilvia Fóti, Zoltán Nagy, Szilárd Czóbel, Krisztina Pintér, Evelin Ramóna Péli, Zoltán Tuba.* Comparison of carbon dioxide fluxes over sandy grassland vegetation as measured by the eddy-covariance technique and by open system chamber // *Acta. Biol. Szeged.* 2005. V. 49, N 1–2. P. 143–145.
20. *Кутайгородский С.А.* Физика взаимодействия атмосферы и океана. Л.: Гидрометеониздат, 1970. 284 с.
21. *Монин А.С., Обухов А.М.* Основные закономерности турбулентного перемешивания в приземном слое атмосферы // *Тр. Геофиз. ин-та АН СССР*. 1954. № 24 (151). С. 163–187.
22. *Зилитинкевич С.С.* Стратификация: развитие теории и новый аппарат для расчета турбулентного перемешивания в моделях климата и его применений // *Всерос. конф. «Солнечная активность и природа глобальных и региональных климатических изменений»*. Иркутск, 19–22 июня 2012. С. 41.



23. *Wanninkhof R.* Relationship between wind speed and gas exchange over the ocean // *J. Geophys. Res.* 1992. V. 97. P. 7373–7382.
24. *Wanninkhof R., McGillis W.* A cubic relationship between air–sea CO<sub>2</sub> exchange and wind speed // *Geophys. Res. Lett.* 1999. V. 26, N 13. P. 1889–1892.
25. *Бютнер Э.К.* Планетарный газообмен O<sub>2</sub> и CO<sub>2</sub>. Л.: Гидрометеопиздат, 1986. 239 с.
26. *Бюллетень* космического мониторинга Байкальской природной территории <http://geol.irk.ru/>. Мониторинг ледовой обстановки, температуры поверхности, облачного и снежного покровов.

*V.M. Domyшева, D.A. Pestunov, M.V. Sakirko, A.M. Shamrin, M.V. Panchenko.* **Estimation of CO<sub>2</sub> fluxes in the “atmosphere–water” system in the South Lake Baikal littoral by the floating chambers method.**

In this paper, we discuss the applicability of the chamber method for measuring the fluxes of carbon dioxide between the atmosphere and water in the littoral of Lake Baikal. Its advantages and disadvantages are considered as well. A comparison of previously submitted data with observations in 2011–2014, in which there were dramatically different weather situations, is presented. It is shown that interannual variations of total CO<sub>2</sub> fluxes is much less than its seasonal changes. It is shown that the annual flux of carbon dioxide from atmosphere to the water surface in littoral of Lake Baikal is at least 6.5–7 g per square meter in the “open water” period.