

# Сезонный ход процесса газообмена CO<sub>2</sub> в системе «атмосфера – вода» в литорали Южного Байкала. 1. Гидрологическая весна

В.М. Домышева<sup>1</sup>, М.В. Сакирко<sup>1</sup>, Д.А. Пестунов<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  
634021, г. Томск, пл. Академика Зюева, 1

Поступила в редакцию 23.07.2010 г.

В рамках исследования проблемы наблюдающегося в современный период увеличения содержания в атмосфере одного из парниковых газов – углекислого газа, важным представляется анализ механизмов, определяющих направление и интенсивность потоков CO<sub>2</sub> в системе «атмосфера – вода». Данная статья начинается цикл публикаций по анализу сезонных особенностей процесса газообмена углекислого газа в литорали Южного Байкала и посвящена результатам, полученным в весенний период.

Показано, что в период «гидрологической весны» в литорали оз. Байкал наблюдается наибольшая перестройка всех составляющих процесса газообмена углекислого газа водной поверхности с атмосферой. С мая по июль увеличивается амплитуда суточного хода концентраций CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> в воде. Среднесуточный поток углекислого газа, который в середине мая направлен в атмосферу, уже в июне меняет направление и начинает наблюдаться отчетливый сток CO<sub>2</sub> на водную поверхность. Тенденция увеличения амплитуды суточного хода CO<sub>2</sub> в воде и усиления стока углекислого газа из атмосферы на водную поверхность продолжается, и к середине июля в среднем сток уже может достигать 70 мг CO<sub>2</sub> м<sup>-2</sup> · сут<sup>-1</sup>.

**Ключевые слова:** углекислый газ, система «атмосфера – вода», газообмен, поток, Байкал; carbon dioxide, air – sea, gas exchange, Lake Baikal.

## Введение

В рамках исследования проблемы наблюдающегося в современный период увеличения содержания в атмосфере одного из парниковых газов – углекислого газа [1], важным представляется анализ механизмов, определяющих направление и интенсивность потоков CO<sub>2</sub> в системе «атмосфера – вода». Сведения об этих процессах в атмосфере над пресными водоемами весьма ограничены [2–5]. Особая актуальность исследований на современном этапе обусловлена тем, что окружающая среда находится под воздействием возрастающей антропогенной нагрузки и климатических изменений.

Углекислый газ будет поглощаться водой или выделяться в атмосферу, если его парциальное давление в воде водоема отклоняется в большую или меньшую сторону от равновесного с атмосферой. Но, даже полагая многолетнее постоянство состава воды

в каком-либо водоеме, отметим, что за последние десятилетия рост концентрации CO<sub>2</sub> в атмосфере изменил границы равновесного значения. Для иллюстрации этого факта на рис. 1 приведен расчет значений

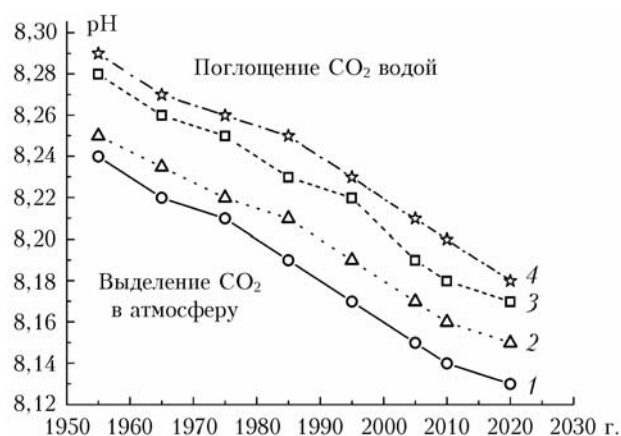


Рис. 1. Оценка pH байкальской воды для разных лет при температуре поверхностной воды 2 °C (1), 5 °C (2), 10 °C (3), 12 °C (4) по многолетним данным о химическом составе воды и атмосферном давлении над акваторией Байкала

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

pH байкальской воды, соответствующих равновесному значению парциального давления  $\text{CO}_2$  в системе «атмосфера – вода», учитывающий только увеличение концентрации углекислого газа в атмосфере с 1955 по 2020 г.

Не претендуя на высокую точность оценки, нами были использованы данные о трендах  $\text{CO}_2$  по многолетним измерениям в Сибири [6, 7], которые хорошо согласуются с результатами, определяемыми Всемирной метеорологической организацией по глобальной сети мониторинга [8]. Как видим, только одно это обстоятельство, без учета трендов температуры, серьезно затрудняет применение ранее полученных данных для описания современных процессов.

Применительно к проблемам изучения механизмов газообмена, на наш взгляд, Байкал является наиболее предпочтительной природной лабораторией. Длительные исследования показали, что вода Байкала может рассматриваться как естественный эталон чистой воды постоянного состава, «который в ближайшие десятилетия не изменится» [9]. Это позволяет при анализе многолетних измерений рассчитывать на хорошую воспроизводимость ряда физико-химических характеристик процесса.

С 2002 г. нами ведутся планомерные комплексные исследования процессов газообмена в системе «атмосфера – вода» на оз. Байкал [10–15]. Измерения проводятся на западном побережье Южного Байкала в районе пос. Большие Коты. Кратко напомним, что, учитывая точностные характеристики имеющейся аппаратуры и то, что над холодной водной поверхностью турбулентный обмен намного ниже, чем над сушей, для измерения потоков  $\text{CO}_2$  нами применяется метод накопительных камер [15, 16].

Аппаратно-программный комплекс Байкальской атмосферно-лимнологической обсерватории ведет измерения метеорологических величин, концентрации  $\text{CO}_2$  в атмосфере, в поверхностной воде и камерах в автоматическом режиме непрерывно в течение всего периода наблюдений [15, 16].

Каждые 3 ч осуществляется забор проб воды, анализ которой проводится в полевой лаборатории, где оперативно определяется необходимый набор химических характеристик [15]. Комплексность проводимых исследований дает возможность выявить наиболее устойчивые особенности процесса газообмена для конкретного периода наблюдений и привлечь для анализа и расширения границ применимости полученных результатов накопленный за многолетнюю историю изучения Байкала материал о свойствах воды (например, [17–21]).

## 1. Сезонные изменения и суточный ход

Очевидно, что для рассмотрения динамики процессов газообмена в течение года в литорали оз. Байкал целесообразно разделить на сезоны, которые определяются гидрологическими и биологическими процессами.

По определению гидрологический сезон – часть года, в пределах которого гидрологический режим характеризуется общими чертами его формирования и проявления, обусловленными сезонными изменениями климата. Как правило, различают весенний, летний, осенний и зимний гидрологические сезоны. Применительно к условиям открытой воды в качестве простого критерия разбиения на сезоны зачастую выбирается среднесуточное значение температуры поверхности воды ниже или выше  $10^\circ\text{C}$ .

При использовании этого критерия все массивы данных наших наблюдений можно разбить на следующие гидрологические сезоны: «весенний» (май – июль) – температура поверхности воды ниже  $10^\circ\text{C}$ ; «летний» (август – первая половина сентября) – период максимального прогрева водной поверхности, температура выше  $10^\circ\text{C}$ ; «осенний» (вторая половина сентября – декабрь) – период характеризуется быстрым снижением температуры поверхностной воды; «зимний» (январь – апрель) – период закрытой воды.

Понятно, что процесс газообмена  $\text{CO}_2$  в системе «атмосфера – вода» зависит как от физико-химического состояния поверхностной воды, так и от биологических ритмов. В свою очередь, при исследовании биологических объектов рассматриваются сезонные ритмы, т.е. внутригодовые циклы жизни биоты. С одной стороны, гидрологические и биологические сезонные ритмы в определенной степени коррелированы между собой, с другой – имеют свою внутреннюю сезонную изменчивость.

Это обстоятельство, применительно к изучаемым нами процессам, определяет условность разбиения данных наблюдений по сезонам. В то же время для удобства анализа и восприятия результатов исследования при изложении материала в наших работах будем придерживаться понятия «гидрологические сезоны».

С 2002 по 2005 г. были проведены измерения практически во все месяцы года (исключение ноябрь и январь). На основе полученных данных нами был выработан следующий план организации наблюдений: для того чтобы по мере накопления данных была возможность оценить межгодовую изменчивость, с 2005 г. ежегодно проводятся измерения в наиболее характерные периоды в каждом из сезонов (в нашем случае, февраль – март, июнь, сентябрь и декабрь).

Исходя из анализа полученного материала [10–15], был подобран режим организации наблюдений по 15–25 сут. За этот период укладывается чередование нескольких синоптических циклов, а температурный режим воды и состояние водной биоты не претерпевают больших изменений. Как показывает практика, такой подход позволяет, минимизировав материальные затраты, обеспечить получение вполне репрезентативных данных для конкретного гидрологического сезона [10–15].

Опираясь на опыт ранее проведенных исследований [10, 16, 17], отметим, что изменчивость содержания  $\text{CO}_2$  в приводном слое воздуха, а также концентрации биогенных элементов, растворенных

в воде углекислого газа и кислорода, наиболее сильно проявляется в суточном цикле. Главным фактором, определяющим суточные колебания их содержания, служат процессы фотосинтеза и деструкции органического вещества, включая дыхание гидробионтов.

Суточный цикл жизнедеятельности водной растительности зависит от продолжительности освещения и, соответственно, отражается на суточных максимумах и минимумах концентрации исследуемых компонентов. Процессы же 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, внутрисуточных 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. И именно суточный ход концентраций химических компонентов воды, участвующих в цикле газообмена  $\text{CO}_2$  и сопутствующих ему, может обеспечить получение более детальных представлений о сезонной изменчивости процесса в литорали озера по сравнению с данными измерений, которые проводятся только на ограниченном периоде времени суток (например, только в светлое время).

Обобщая полученные в течение ряда лет материалы о сезонных проявлениях процесса газообмена углекислого газа в системе «атмосфера – вода» в литорали Южного Байкала, в настоящей статье рассмотрим весенний период.

## 2. Обсуждение результатов

Период весеннего прогрева, который начинается с освобождением озера ото льда в мае и продолжается почти до конца июля, совпадает со временем годового максимума солнечной радиации, благодаря чему происходят быстрый прогрев поверхностных вод и активное перемешивание по всей водной толще. В этот период заканчивается массовое цветение диатомовых водорослей *Aulacoseira baicalensis* [18], развивавшихся подо льдом.

Если ориентироваться на календарные месяцы года, то применительно к литоральной зоне Южного Байкала весенний гидрологический сезон, по сути, может быть разбит на три составляющие: май – переходный от зимнего к весеннему сезону; июнь – наиболее характерный весенний период; июль – переход от «весны» к «лету».

### 2.1. Суточный ход концентрации химических компонентов

Быстрое изменение гидрологических характеристик и содержания планктона определяет и дина-

мику внутри этого сезона всех составляющих процесса газообмена.

Как следует из рис. 2 и 3, с середины мая по июль в поверхностной воде меняются не только концентрации основных химических компонентов, контролируемых в наших наблюдениях, но и амплитуды их внутрисуточных вариаций.

В мае амплитуды суточного хода концентраций  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{NO}_3^-$  и  $\text{PO}_4^{3-}$  (разность между утренним максимумом и дневным минимумом) невелики, но к июлю заметно увеличиваются. Среднесуточная концентрация углекислого газа в мае около 1,23 мг/л и постепенно снижается к июлю (в июне – 1,05 мг/л, в июле – 0,92 мг/л). Также в этот период наблюдается и постепенное снижение средней концентрации нитратов (май – 0,25 мг/л, июнь – 0,24 мг/л и июль – 0,22 мг/л). В мае и июне содержание нитратов в воде в ночное время одинаково, а в светлое время в июне концентрация нитратов значительно ниже, чем в мае, и соответственно амплитуда возрастает в 1,5 раза.

В июле как содержание нитратов, так и амплитуда их суточных изменений уменьшаются. Содержание кислорода в поверхностной воде максимально в мае, снижается в июне, а в июле немного повышается (май – 12,6 мг/л, июнь – 12,2 мг/л и июль – 12,3 мг/л).

Амплитуда суточных изменений концентрации  $\text{O}_2$  возрастает к июню в 4 раза и сохраняется практически на этом уровне в июле.

Концентрация фосфатов и амплитуда их изменений в течение суток в поверхностной воде увеличиваются к июню, в июле содержание их повышается незначительно.

Очевидно, что изменения средних концентраций химических компонентов от мая к июлю обусловлены биотическим фактором [18]. В мае – июне заканчивается вегетация еще подледного сообщества водорослей (максимум развития приходится на апрель [18]), фотосинтетическая деятельность которых в течение марта – апреля привела к понижению концентрации углекислого газа в воде. Этим процессом, а также низкими значениями температуры воды обуславливается и высокое насыщение воды кислородом (98%).

В июне уже начинается отмирание комплекса подледных водорослей, которое в определенной степени замедляет скорость спада концентрации  $\text{CO}_2$  в воде.

Разложение органического вещества снижает концентрацию растворенного  $\text{O}_2$  и, несмотря на рост температуры воды, препятствует увеличению насыщения воды кислородом (96%). В конце июня – июле начинает развиваться новый комплекс как планктонных, так и бентосных водорослей и вклад продукции преобладает над деструкцией комплекса подледных водорослей [19], что в совокупности обуславливает дальнейшее снижение концентрации углекислого газа и нитратов, небольшой рост средней концентрации  $\text{O}_2$ , а также, благодаря повышению температуры, и высокое насыщение воды кислородом (104%).

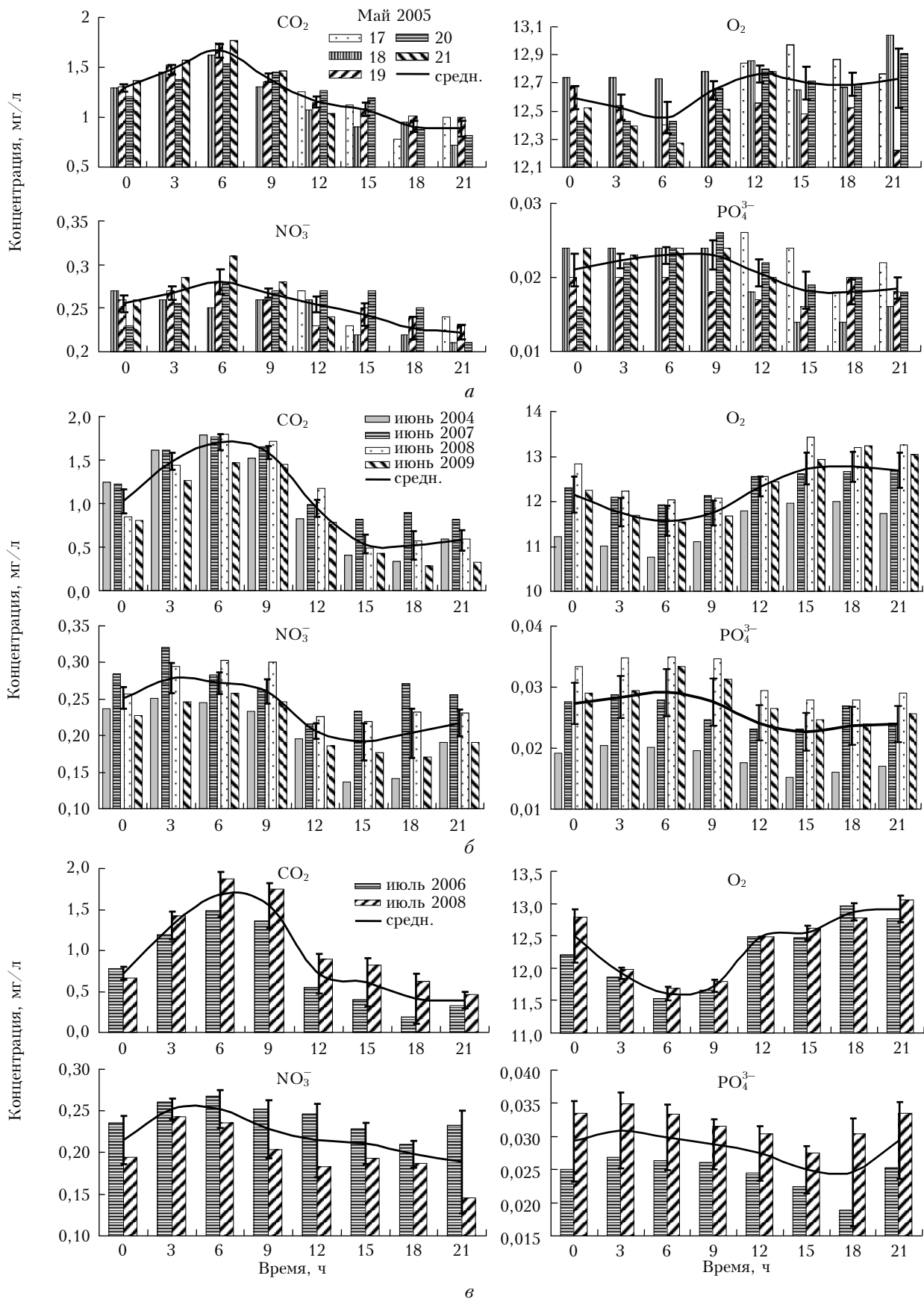


Рис. 2. Суточный ход концентрации  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{NO}_3^-$  и  $\text{PO}_4^{3-}$  в поверхностной воде литорали оз. Байкал в период «гидрологической весны»: май (*a*), июнь (*б*) и июль (*в*)

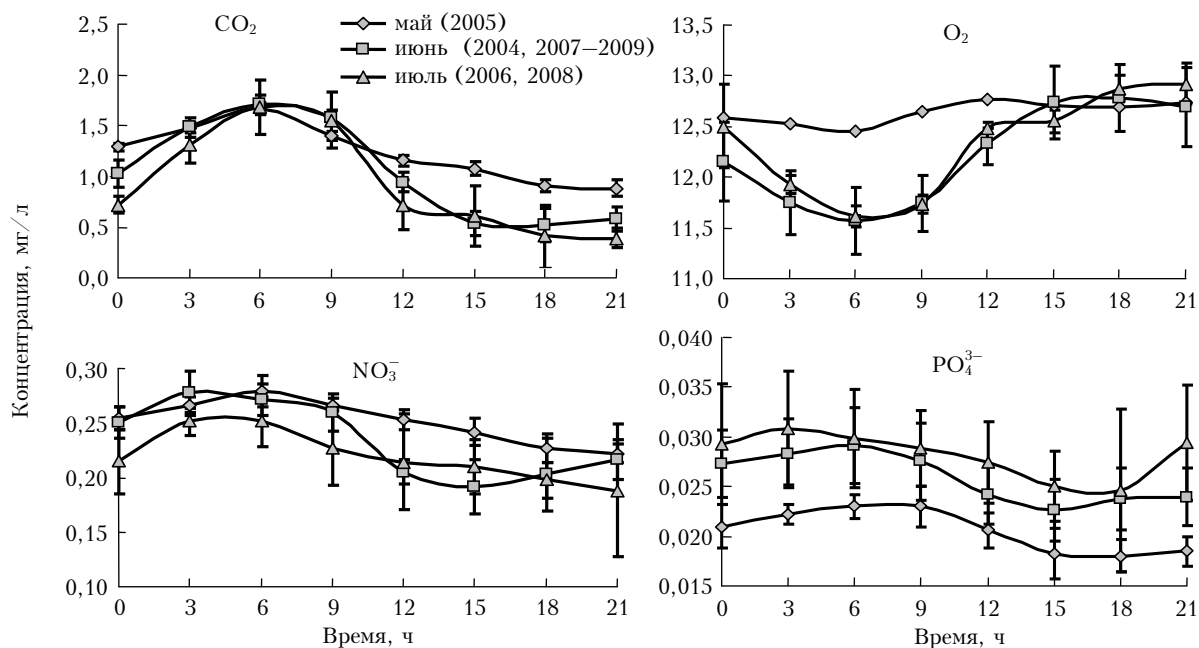


Рис. 3. Динамика суточного хода концентрации  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{NO}_3^-$  и  $\text{PO}_4^{3-}$  в поверхностной воде литорали оз. Байкал в период «гидрологической весны»

## 2.2. Суточный ход потока углекислого газа

В проведенных майских (2005 г.) измерениях нам не удалось корректно выявить суточный ход потока  $\text{CO}_2$  с помощью вентилируемой камеры. Это было обусловлено тем, что нами применялась методика проветривания камеры в каждом часовом цикле. Формальный анализ результатов показал, что в каждом часовом цикле величина потока близка к 0, а его знак меняется хаотически от случая к случаю. При относительно небольшой амплитуде изменения парциального давления углекислого газа в воде и, следовательно, его накопления (или стока) в объеме камеры за этот часовой период погрешность измерений используемого в этот период газоанализатора порядка  $20 \text{ млн}^{-1}$  не позволила оценить поток газа с необходимой точностью.

Естественно, что, располагая экспериментальными данными о парциальном давлении углекислого газа в воде и в атмосфере, для оценки потоков можно было бы применить какой-либо из методов расчета, например [20–23]. Известно, что величина потока может быть рассчитана как произведение коэффициента обмена  $k$  (зависящего от скорости ветра, температуры и солености воды) и разности парциальных давлений  $\text{CO}_2$  в поверхностной воде и в приводной атмосфере  $\Delta p\text{CO}_2$ . Но необходимо подчеркнуть, что имеющиеся в публикациях у разных авторов эмпирические формулы определения коэффициента обмена настолько расходятся (оценка коэффициента  $k$  у разных авторов может различаться в несколько раз [24]), что вряд ли позволит оценить суточный баланс слабых потоков углекислого газа.

Данные, полученные с помощью закрытой (непроветриваемой) камеры, также не могут дать пол-

ного представления о величине суточного баланса потока. В процессе измерения суточного хода при накоплении (или убыли) углекислого газа в объеме камеры с определенного момента происходит выравнивание парциального давления  $\text{CO}_2$  между атмосферой камеры и поверхностной водой. Отсюда следует, что оценка потока газа с помощью закрытой камеры возможна только на ограниченных промежутках времени по линейным участкам характеристики  $\text{CO}_2$  во время роста или спада парциального давления.

В то же время сопоставление суточной динамики содержания углекислого газа в воде и приводной атмосфере, на основе которого вычисляется разность парциального давления  $\Delta p\text{CO}_2$ , и данных, полученных в закрытой накопительной камере (рис. 4), дает возможность оценить, что в среднем ночной поток  $\text{CO}_2$  в атмосферу с поверхности воды превышает его дневной сток. Следовательно, можно заключить, что в мае суммарный за сутки небольшой поток углекислого газа в основном направлен в атмосферу.

Как уже было сказано, июнь — это наиболее характерный период «гидрологической весны». Поэтому именно в этот период измерения проводятся ежегодно. В июне существенный рост амплитуды суточного хода парциального давления углекислого газа в воде, обусловленный фотосинтезом планктона, уже дает возможность в полной мере использовать результаты измерений с вентилируемой камерой. Более того, проведенная в мае 2007 г. модернизация газоанализатора позволила снизить погрешность измерения  $\text{CO}_2$  до 3%, что заметно увеличило чувствительность метода определения потоков. На рис. 5, а приведен средний суточный ход потоков углекислого газа для июньских наблюдений в 2007–2009 гг.

Как видим, здесь суточный ход потока проявляется отчетливо. В ночное время поток углекислого

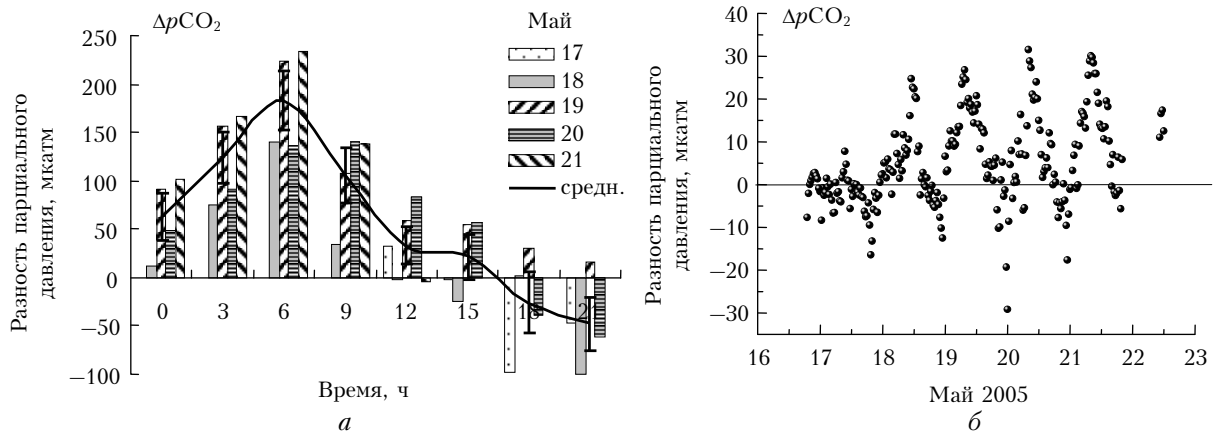


Рис. 4. Суточный ход разности парциального давления углекислого газа в поверхностной воде (по данным химического анализа) и атмосфере в мае 2005 г. (а) и разности парциального давления углекислого газа в закрытой камере и в при-водной атмосфере (б)

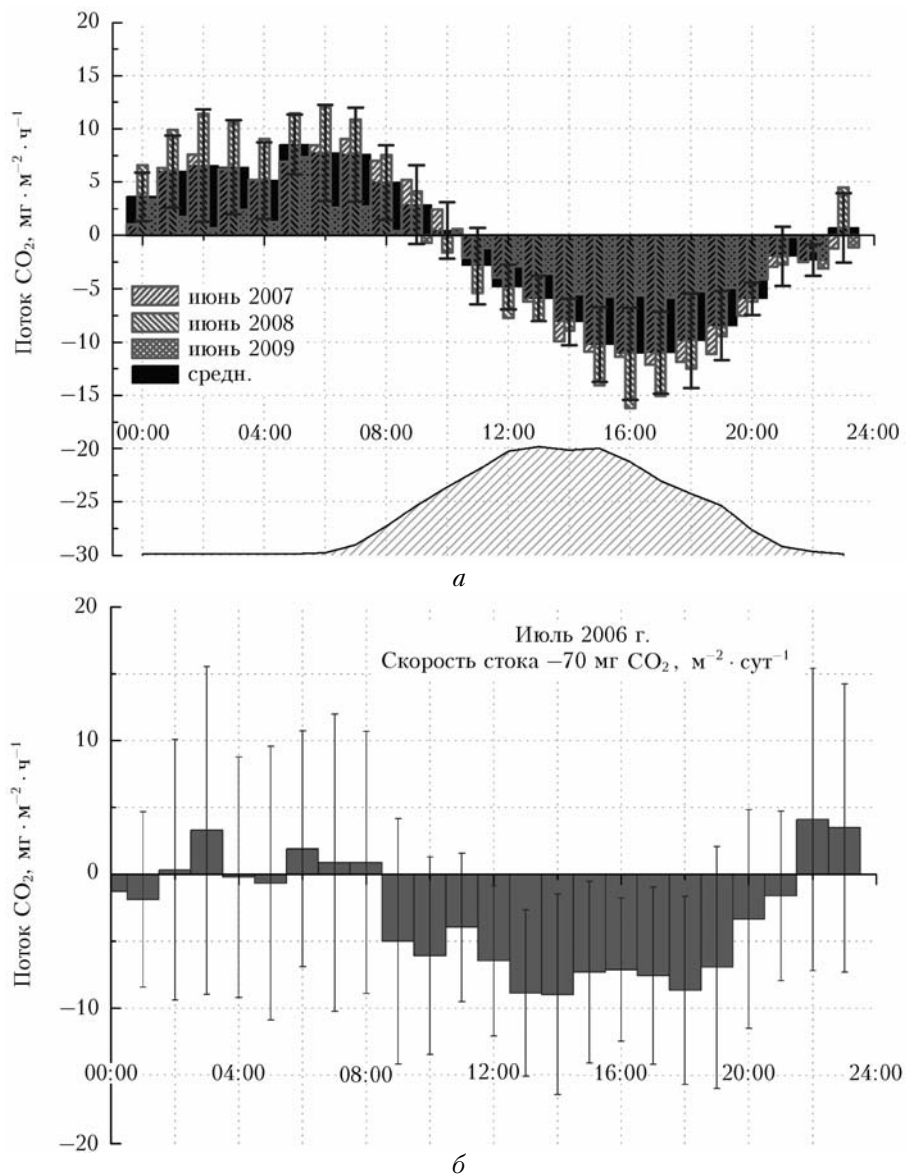


Рис. 5. Средний суточный ход потоков углекислого газа. Отрицательные значения потока соответствуют стоку на водную поверхность (заштрихованная область внизу а – относительная интенсивность инсоляции)

газа направлен в атмосферу, с восходом солнца выход снижается, и с 10 ч начинает наблюдаться сток, который достигает своего максимального значения к 16 ч. Оценивая среднесуточный баланс потоков CO<sub>2</sub>, отметим, что, несмотря на хорошо выраженный суточный ход газообмена, в июне (ночной выход и дневной сток) суммарный суточный баланс потока еще не велик. В частности, в июне 2007 г. средний суточный сток углекислого газа из атмосферы составил 1,5 мг CO<sub>2</sub> м<sup>-2</sup> · сут<sup>-1</sup>, в 2008 г. — 11 мг CO<sub>2</sub> м<sup>-2</sup> · сут<sup>-1</sup> и в 2009 г. — 27 мг CO<sub>2</sub> м<sup>-2</sup> · сут<sup>-1</sup>.

В июле наблюдается дальнейшее увеличение амплитуд суточного хода концентрации растворенных в воде газов (см. рис. 3). Обратим внимание, что при увеличении температуры поверхностной воды должно увеличиваться и парциальное давление углекислого газа. Но быстрое снижение концентрации CO<sub>2</sub> в воде, обусловленное интенсивностью процесса фотосинтеза водной биоты, приводит к увеличению стока углекислого газа из атмосферы на водную поверхность, и ко второй половине июля средний суточный сток углекислого газа на водную поверхность может достигать около 70 мг CO<sub>2</sub> м<sup>-2</sup> · сут<sup>-1</sup> (рис. 5, б).

### Заключение

Суммируя результаты работы, отметим, что в период «гидрологической весны» в литорали оз. Байкал наблюдается наибольшая перестройка всех составляющих процесса газообмена углекислого газа водной поверхности с атмосферой. С мая по июль увеличивается амплитуда суточного хода концентраций CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, NO<sub>3</sub> в воде. Среднесуточный поток углекислого газа, который в середине мая направлен в атмосферу, уже в июне меняет направление, и начинает наблюдаться отчетливый сток CO<sub>2</sub> на водную поверхность. Однако, поскольку интенсивность и продолжительность выхода CO<sub>2</sub> из воды соизмеримы со стоком, суммарный поток за сутки невелик — средний сток в июне в период 2007–2009 гг. составил 22 мг CO<sub>2</sub> м<sup>-2</sup> · сут<sup>-1</sup>. Тенденция увеличения амплитуды суточного хода CO<sub>2</sub> в воде и усиления стока углекислого газа из атмосферы на водную поверхность продолжается, и к середине июля средний сток уже может достигать 70 мг CO<sub>2</sub> м<sup>-2</sup> · сут<sup>-1</sup>.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 08-05-00258), Программы фундаментальных исследований Отделения наук о Земле РАН № 10.1 и экспедиционных грантов СО РАН.

1. *Изменение климата*, 2001 г. Обобщенный доклад. Вклад рабочих групп 1, 2 и 3 в подготовку Третьего доклада об оценке Межправительственной группы экспертов по изменению климата. ВМО, ЮНЕП. Норвегия: Изд-во студии дизайна «ГРИД-Арендал», 2003. 219 с.
2. Emerson S. Chemically enhanced CO<sub>2</sub>, gas exchange in an eutrophic lake; a general model // *Limnol. and Oceanogr.* 1975. V. 20, N 5. P. 743–753.
3. Butler J.H., Elkins J.W. An automated technique for the measurement of dissolved N<sub>2</sub>O in natural waters // *Mar. Chem.* 1991. V. 34, iss. 1–2. P. 47–61.

4. Wanninkhof R., Knox M. Chemical enhancement of CO<sub>2</sub>, exchange in natural waters // *Limnol. and Oceanogr.* 1996. V. 41, N 4. P. 689–697.
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. P. 304–311.
6. Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Иноуёе Г., Краснов О.А., Максюттов Ш., Мачида Т., Фофонов А.В., Шимояма К. Пространственная и временная изменчивость концентрации CO<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub> в приземном слое воздуха на территории Западной Сибири // *Оптика атмосф. и океана.* 2009. Т. 22, № 2. С. 183–192.
7. Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Иноуёе Г., Максюттов Ш., Мачида Т., Фофонов А.В. Вертикальное распределение парниковых газов над Западной Сибирью по данным многолетних измерений // *Оптика атмосф. и океана.* 2009. Т. 22, № 5. С. 457–464.
8. WMO Greenhouse Gas Bulletin. 2007. N 3. 4 p.
9. Грачев М.А., Домьшева В.М., Ходжер Т.В., Коровякова И.В., Голобокова Л.П., Погодаева Т.В., Верещин А.Л., Гранин Н.Г., Гнатковский Р.Ю., Косторнова Т.Я. Глубинная вода озера Байкал — природный стандарт пресной воды // *Химия в интересах устойчивого развития.* 2004. № 12. С. 417–429.
10. Мизандронцев И.Б., Шимараев М.Н., Голобокова Л.П., Домьшева В.М., Коровякова И.В., Мизандронцева К.Н., Жданов А.А., Гнатковский Р.Ю., Цехановский В.В., Чубаров М.П. Особенности газообмена Байкала с атмосферой при переходе от весеннего прогрева к летнему // *Геогр. и природ. ресурсы.* 2000. № 3. С. 55–62.
11. Домьшева В.М., Пестунов Д.А., Панченко М.В., Хохрова О.М., Мизандронцев И.Б., Шмаргунов В.П., Ходжер Т.В., Белан Б.Д. О связи ритмов изменения содержания углекислого газа в приводном слое воздуха и химического состава воды озера Байкал // *Докл. РАН.* 2004. Т. 399, № 6. С. 825–828.
12. Заворуев В.В., Панченко М.В., Домьшева В.М., Сакирко М.В., Белых О.И., Поповская Г.И. Суточный ход газообмена CO<sub>2</sub> и интенсивности фотосинтеза в поверхностной воде оз. Байкал // *Докл. РАН.* 2007. Т. 413, № 3. С. 1–5.
13. Панченко М.В., Домьшева В.М., Пестунов Д.А., Сакирко М.В., Заворуев В.В., Новицкий А.Л. Экспериментальные исследования процессов газообмена CO<sub>2</sub> в системе «атмосфера — водная поверхность» оз. Байкал (постановка эксперимента) // *Оптика атмосф. и океана.* 2007. Т. 20, № 5. С. 448–452.
14. Пестунов Д.А., Шмаргунов В.П., Панченко М.В. Измеритель содержания CO<sub>2</sub>, растворенного в воде // *Приборы и техн. эксперим.* 2008. № 5. С. 143–145.
15. Сакирко М.В., Панченко М.В., Домьшева В.М., Пестунов Д.А. Суточные ритмы концентрации диоксида углерода в приводном слое воздуха и в поверхностной воде оз. Байкал в разные гидрологические сезоны // *Метеорол. и гидрол.* 2008. № 2. С. 79–86.
16. Мизандронцев И.Б., Горбунова Л.А., Домьшева В.М., Мизандронцева К.Н., Шимараев М.Н. Газообмен Байкала с атмосферой в период весеннего прогрева // *Геогр. и природ. ресурсы.* 1996. № 2. С. 74–84.
17. Мизандронцев И.Б., Горбунова Л.А., Домьшева В.М., Мизандронцева К.Н., Томберг П., Шимараев М.Н. Газообмен Байкала с атмосферой в осенний период // *Геогр. и природ. ресурсы.* 1998. № 1. С. 61–70.
18. Вотинцев К.К., Мецеракова А.И., Поповская Г.И. Круговорот органического вещества в озере Байкал. Новосибирск: Наука, 1975. 189 с.

19. Nagata T., Takai K., Kawanobe K., Kim D., Nakazato R., Gusebnikova N., Bondarenko N., Mologawaya O., Kostornova T., Drucker V., Satoh Ya., Watanabe Ya. Autotrophic picoplankton in southern Lake Baikal: abundance, growth and grazing mortality during summer // J. Plankton Res. 1994. V. 16, N 8. P. 945–959.
20. Wanninkhof R., McGillis W.R. 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.
21. Wanninkhof R. Relationship between wind speed and gas exchange over the ocean // J. Geophys. Res. C. 1992. V. 97, N 5. P. 7373–7382.
22. Liss P., Merlivat L. Air–sea gas exchange rates: introduction and synthesis // The role of air–sea gas exchange in geochemical cycling. Washington: Reidel, 1986. P. 113–129.
23. Nightingale P.D., Malin G., Law C.S., Watson A.J., Liss P.S., Liddicoat M.I., Boutin J., Upstill-Goddard R.C. In situ evaluation of air–sea gas exchange parameterizations using novel conservative and volatile tracers // Global Biogeochemical Cycles. 2000. V. 14, N 1. P. 373–387.
24. Бютнер Э.К. Планетарный газообмен O<sub>2</sub> и CO<sub>2</sub>. Л.: Гидрометеониздат, 1987. 232 с.

*V.M. Domysheva, M.V. Sakirko, D.A. Pestunov, M.V. Panchenko.* **Seasonal behavior of the CO<sub>2</sub> gas exchange process in the “atmosphere – water” system of the littoral zone of Southern Baikal. 1. Hydrological spring.**

Analysis of the mechanisms, determining the direction and intensity of CO<sub>2</sub> fluxes in the “atmosphere – water” system, seems to be important in the framework of the problem of increasing of the content of one of the greenhouse gases (carbon dioxide) in the atmosphere. The present paper starts the cycle of publications, devoted to analysis of seasonal peculiarities of the CO<sub>2</sub> gas exchange process in the littoral zone of Southern Baikal and presents the results, obtained in spring.

It is shown that the greatest transformation of all components of the carbon dioxide gas exchange process between the water surface in the atmosphere is observed during hydrological spring in the littoral zone of Lake Baikal. The amplitude of the diurnal behaviors of the concentrations of CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> and NO<sub>3</sub><sup>-</sup> in water increases from May to June. The daily mean CO<sub>2</sub> flux, which is directed to the atmosphere in the middle of May, changes its direction in June, and the well pronounced sink of CO<sub>2</sub> to the water surface is observed. The tendency of increasing of the amplitude of the diurnal behavior of CO<sub>2</sub> and intensification of the sink of carbon dioxide from the atmosphere to the water surface continues, and, on the average, by the middle of June, the sink can reach a value of 70 mg CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> · day<sup>-1</sup>.