

РАДИАЦИЯ И БИОСФЕРА

УДК 551.431.1

Сезонный ход процесса газообмена CO₂ в системе «атмосфера–вода» в литорали Южного Байкала. 3. Осень

В.М. Домышева¹, М.В. Сакирко¹, Д.А. Пестунов², М.В. Панченко^{2*}

¹Лимнологический институт СО РАН
664033, г. Иркутск, ул. Улан-Баторская, 3

²Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

Поступила в редакцию 1.03.2012 г.

Статья продолжает цикл публикаций по анализу сезонных особенностей процесса газообмена углекислого газа в литорали Южного Байкала для периода открытой воды и посвящена результатам, полученным в осенний период.

Показано, что осенью в воде литорали Байкала характер изменения концентраций растворенных газов и биогенных элементов в поверхностной воде озера противоположен процессу, наблюдающемуся в весенне-летний период. Концентрации углекислого газа, кислорода, нитратов и фосфатов возрастают от второй половины сентября к декабрю.

В начале октября в литорали Байкала еще наблюдается сток CO₂ из атмосферы на водную поверхность, суточный бюджет которого сравним по величине со среднесуточным стоком в период гидрологического лета. В ноябре среднесуточная величина потока CO₂ 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 ледоставного периода. В начале этого периода в литоральной зоне можно ожидать поступления небольшого дополнительного количества углекислого газа в атмосферу за счет процесса предутреннего замерзания и последующего таяния льда.

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

Введение

Продолжая анализ результатов исследования процесса газообмена CO₂ в системе «атмосфера–вода» в литорали Южного Байкала для периода открытой воды [1, 2], рассмотрим осенний период.

Очевидно, для того чтобы достаточно корректно выделить физические, химические и биологические составляющие в сложном процессе газообмена, необходим контроль химических компонентов воды, участвующих в процессах фотосинтеза водной растительности.

Напомним, что для разбиения массива полученных данных нами выбран весьма условный критерий, где в качестве границы между сезонами использовано значение температуры поверхностной воды 10 °С.

Процесс газообмена CO₂ в системе «вода–атмосфера» зависит как от физического состояния поверхностной воды, ее химического состава, так и от жизнедеятельности биоты. Известно, что годовой

цикл температурных изменений в водах оз. Байкал тесно связан с изменениями внешнего теплообмена и динамическими процессами в водной толще [3–6]. Авторы этих работ выделяют два периода, принципиально различные по направлению процессов: период нагревания и охлаждения. Период охлаждения включает в себя два этапа: осеннее и предзимнее охлаждение. Осеннее охлаждение начинается обычно с середины сентября, когда тепловой баланс поверхности становится отрицательным. К предзимнему охлаждению относится интервал времени с момента перехода температуры поверхности воды через 4 °С, как правило, с ноября и до замерзания озера. В свою очередь, при исследовании биологических объектов рассматриваются собственные внутригодовые циклы жизни гидробионтов. Например, М.М. Кожов в работе [7] в период охлаждения выделяет биологическую осень (октябрь, ноябрь) и биологическую зиму (декабрь, январь).

Гидрологические и биологические ритмы в определенной степени коррелированы между собой, но, с другой стороны, имеют свой внутренний сезонный ход и межгодовую изменчивость. Это обстоятельство, применительно к изучаемым процессам, определяет условность нашего разбиения по сезонам. Фактически в период открытой воды на

* 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).

Байкале все время идут переходные гидрологические и биологические процессы — 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. После публикаций [1, 2] мы получили справедливые замечания по поводу не совсем корректного использования термина «гидрологический сезон». Соглашаясь с этой критикой, в данном тексте будем понимать условность нашего разбиения, поскольку и иные попытки поиска одного или нескольких простых параметров для однозначного выделения каких-либо устойчивых сезонов, например, «гидробиологических», вряд ли возможны.

Обсуждение результатов

В соответствии с выбранным нами критерием, к осени мы отнесли период со второй половины сентября до установления ледового покрова на озере. В это время происходит значительное снижение температуры и повышение прозрачности воды. В первой половине осени (сентябрь–октябрь) завершается вегетация летнего комплекса водорослей, но видовой состав их еще весьма разнообразен. Вторая половина осени характеризуется слабым развитием фитопланктона, и состоит он преимущественно из диатомовых водорослей [8].

Исходя из выбранной методики организации наблюдений, с 2005 г. ежегодно проводились двух-

недельные циклы комплексных измерений в сентябре и во второй половине декабря. В осенний период 2010 г. был организован ежемесячный цикл наблюдений. На рис. 1 приведены среднемесячные значения концентраций растворенного углекислого газа, кислорода и биогенных элементов в осенний период (для сентября и декабря средние выполнены по данным с 2005 по 2010 г., для октября и ноября по результатам 2010 г.).

Видно, что характер изменения концентраций растворенных газов и биогенных элементов в поверхностной воде озера противоположен процессу, наблюдавшемуся в весенне-летний период [1, 2]. Концентрации углекислого газа, кислорода, нитратов и фосфатов возрастают от второй половины сентября к декабрю. Отметим, что распад органического вещества, продуцированного в летний период, приводит к тому, что процент насыщения воды кислородом падает. Снижение активности процесса фотосинтеза и усиление процесса деструкции органического вещества могли бы привести и к уменьшению концентрации кислорода, но охлаждение воды и, соответственно, рост растворимости газа обуславливают увеличение содержания O_2 от месяца к месяцу (рис. 1).

Разложение отмерших водорослей в водной толще и в донных осадках также ярко отражается на содержании минерального азота и фосфора. Средняя концентрация нитратов в конце сентября составляет 0,08 мг/л, в октябре — 0,11 мг/л, в ноябре — 0,24 мг/л и в декабре — 0,38 мг/л, средняя концентрация фосфатов соответственно 0,010; 0,015;

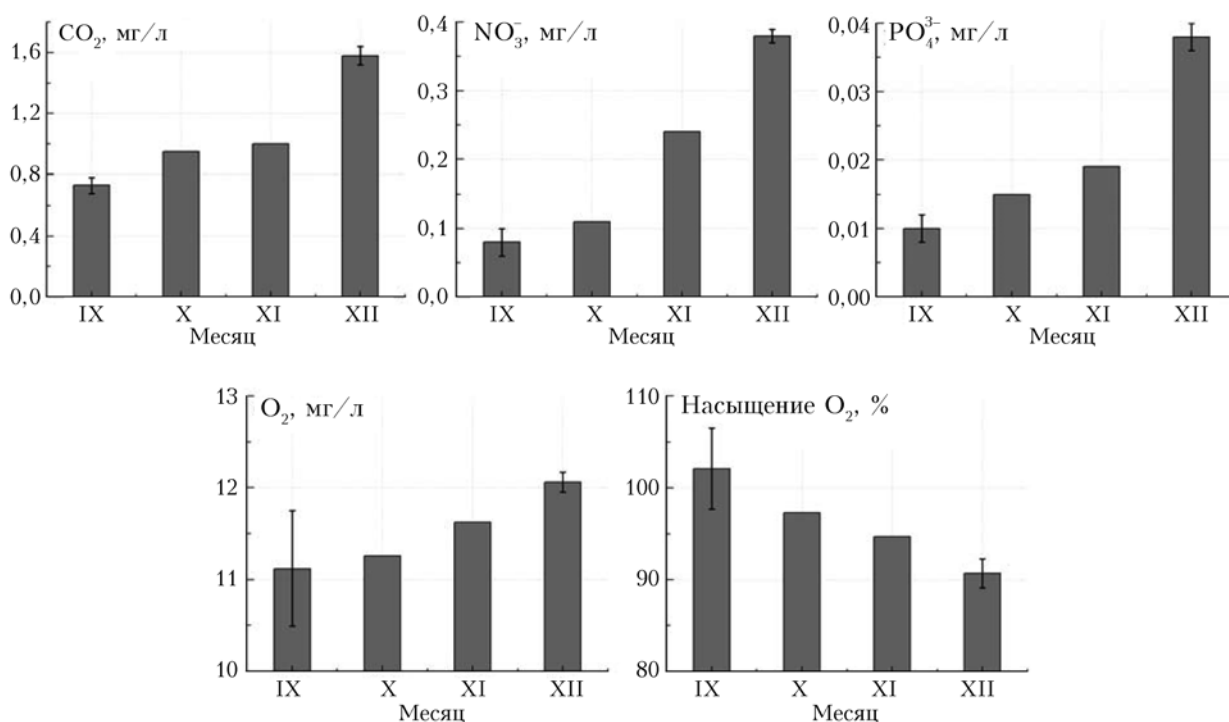


Рис. 1. Среднемесячные значения концентраций растворенного кислорода, углекислого газа и биогенных элементов, а также насыщения кислородом в осенний период

0,019 и 0,038 мг/л. Содержание кремния также увеличивается от 0,62 мг/л в сентябре до 0,68 мг/л в декабре. Диатомовые водоросли являются основным представителем осеннего фитопланктона [8], но их количество невелико. В то же время, несмотря на существенное уменьшение количества водорослей, его фотосинтетическая деятельность достаточно отчетливо проявляется в суточных ритмах изменения концентрации исследуемых составляющих поверхностной воды на всем протяжении осеннего сезона вплоть до становления льда. Для примера на рис. 2 представлен средний суточный ход концентрации углекислого газа в поверхностной воде для декабрьских измерительных циклов 2005–2010 гг., из которого следует, что, несмотря на естественную межгодовую изменчивость, суточный ход отчетливо выражен для всех лет наблюдений.

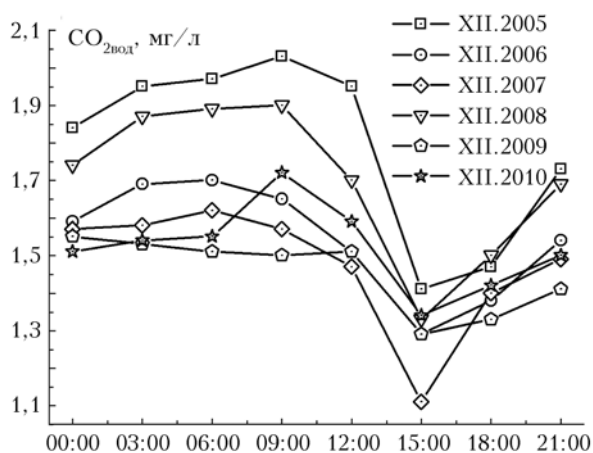


Рис. 2. Средний суточный ход концентрации углекислого газа в воде (декабрь)

Как следует из приведенных на рис. 2 данных, в декабре, с восхода солнца и до 15:00 концентрация углекислого газа в поверхностной воде уменьшается в среднем на 0,3–0,5 мг/л.

Углекислый газ будет поглощаться водой или выделяться в атмосферу, если его парциальное давление в воде водоема отличается в ту или иную сторону от парциального давления CO_2 в атмосфере. Наши измерения показывают, что суточный ход парциального давления углекислого газа в приводной атмосфере для этого периода года выражен слабо [9]. Эти результаты хорошо согласуются с данными многолетних наблюдений в атмосфере бореальной зоны Сибири [10, 11] как по абсолютным среднесуточным значениям, так и по амплитудам суточного хода.

Осенью в период охлаждения воды уменьшается вегетативная деятельность водорослей. В это время в воде Байкала протекают два встречных процесса, определяющих знак и интенсивность газообмена. С одной стороны, при снижении температуры поверхностной воды по мере охлаждения и постоянном содержании углекислого газа в воде должно уменьшаться его парциальное давление,

обусловленное увеличением растворимости. С другой стороны, с начала осеннего периода и вплоть до ледостава распад органического вещества и внедрение воды с пелагиали озера, где происходит сезонный подъем глубинных вод, обогащенных углекислым газом, определяют рост концентрации CO_2 в воде. Прирост концентрации углекислого газа в воде настолько велик, что повышение растворимости не компенсирует увеличение его парциального давления.

На рис. 3 приведены среднесуточные значения величины разности между парциальным давлением углекислого газа в поверхностной воде и атмосфере ΔPCO_2 для каждого осеннего месяца (здесь давление CO_2 в приводной атмосфере измерено газоанализатором, а расчет давления CO_2 в воде осуществлен на основе результатов химического анализа [12]).

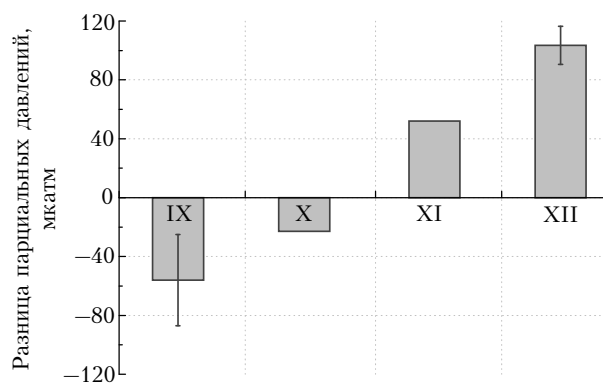


Рис. 3. Среднемесячные значения разности парциального давления углекислого газа в атмосфере и поверхностной воде (2010 г.)

Соответственно, неуклонный рост парциального давления CO_2 в поверхностной воде и слабое увеличение его содержания в атмосфере в осенний период сказываются и на характере изменения суточного хода ΔPCO_2 , который представлен на рис. 4.

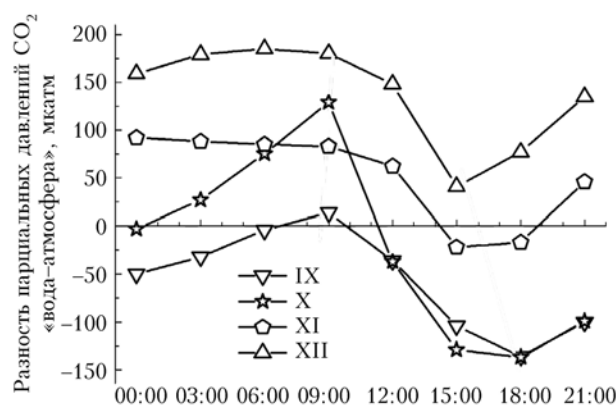


Рис. 4. Средний суточный ход разности парциального давления углекислого газа между водой и атмосферой ΔPCO_2 в осенний период 2010 г.

В сентябре на протяжении суток наблюдаются, как правило, отрицательные значения ΔPCO_2 , а минимальные значения регистрируются около 18:00. Далее по мере увеличения концентрации углекислого газа в поверхностной воде в среднем суточном ходе разности парциальных давлений ΔPCO_2 происходит смещение от отрицательных значений этой величины в сентябре к ее положительным значениям в декабре, которые уже наблюдаются в течение всего времени суток. Сезонное сокращение светлого времени суток обуславливает и сдвиг времени наступления минимальных значений ΔPCO_2 с 18:00 в сентябре к 15:00 в декабре (см. рис. 2, 4).

Естественно, что такой сезонный ход изменения соотношения между парциальными давлениями углекислого газа в воде озера и приводной атмосфере полностью отражается и на характере процесса газообмена. Фрагмент временного хода потоков углекислого газа (рис. 5), измеренных в октябре–декабре 2010 г., иллюстрирует внутрисезонную перестройку интенсивности и преимущественного направления потоков в системе «водная поверхность–атмосфера».

На рис. 6 приведен средний суточный ход потоков углекислого газа в системе «вода–атмосфера» для 3 мес рассматриваемого сезона. Видно, что в начале октября в литорали Байкала еще наблюдается сток CO_2 из атмосферы на водную поверхность, суточный бюджет примерно около -100 мг/м^2 и сравним по величине со среднесуточным стоком в период гидрологического лета.

Далее, как уже было показано, в ноябре процессы деструкции органического вещества и внедрение воды с пелагиали озера, обогащенной углекис-

лым газом в результате сезонного подъема глубинных вод, уже настолько увеличивают концентрацию CO_2 и, соответственно, его парциальное давление, что среднесуточный бюджет потока CO_2 изменяет знак и поверхность озера становится источником поступления углекислого газа в приводную атмосферу (среднесуточный выход примерно 20 мг/м^2), выход которого продолжает усиливаться и достигает своих максимальных значений в декабре (среднесуточный выход около 100 мг/м^2) вплоть до начала ледоставного периода.

Перед полным закрытием акватории ледяным покровом в литорали озера в холодные предзакатные часы наблюдается образование ледяных фрагментов у берега или иных объектов, расположенных на поверхности воды (в нашем случае измерительных камер), которые, обеспечивая сток излишней энергии при переходе воды из жидкого в твердое состояние, служат своеобразными центрами кристаллизации. В декабре 2009 г. нам удалось зафиксировать выход CO_2 во время образования льда в месте расположения камер (рис. 7).

Видно, что после начала замерзания поверхности воды в камере происходит выброс углекислого газа в атмосферу, величина которого составляет $40\text{--}90 \text{ мг/м}^2$. После восхода солнца происходит таяние льда. Исходя из приведенных данных, можно ожидать, что некоторое дополнительное количество углекислого газа в предледоставный период спорадически будет поступать в атмосферу до момента полного закрытия водной поверхности. Предположим, что в идеализированном случае идет одновременное образование льда на всей акватории озера,

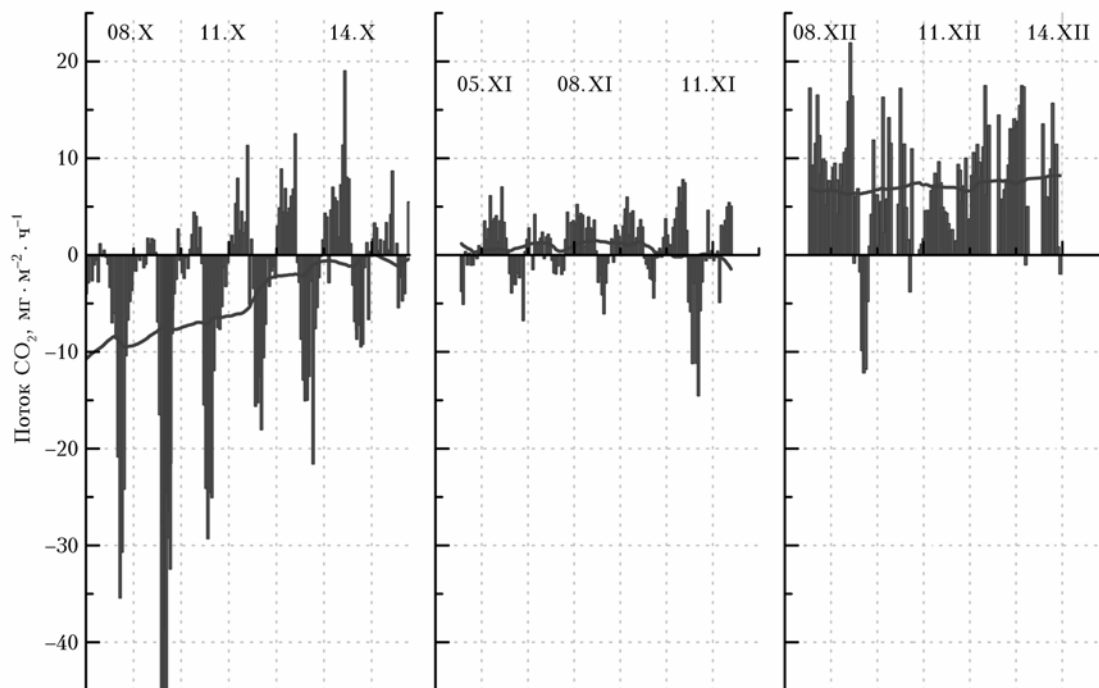
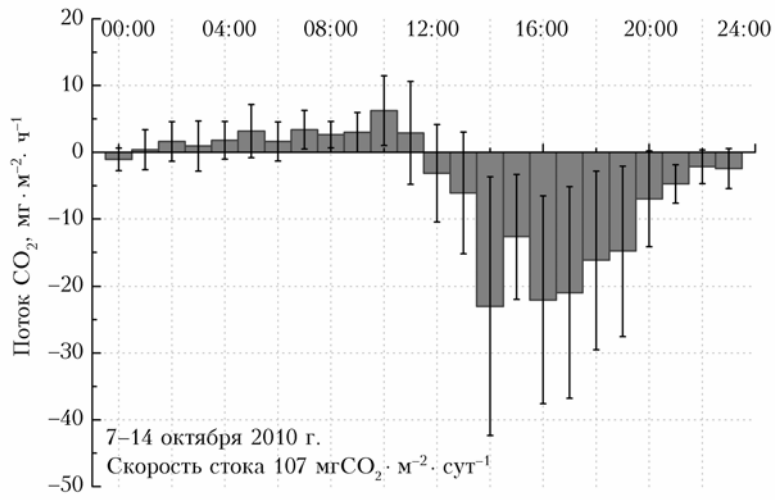
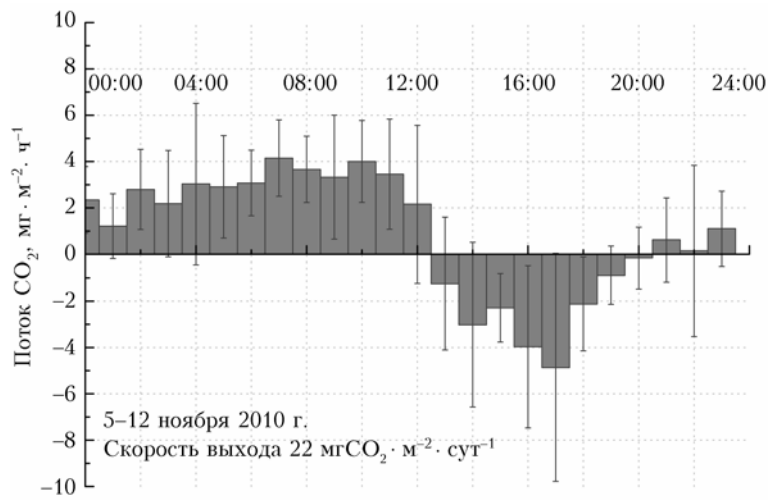


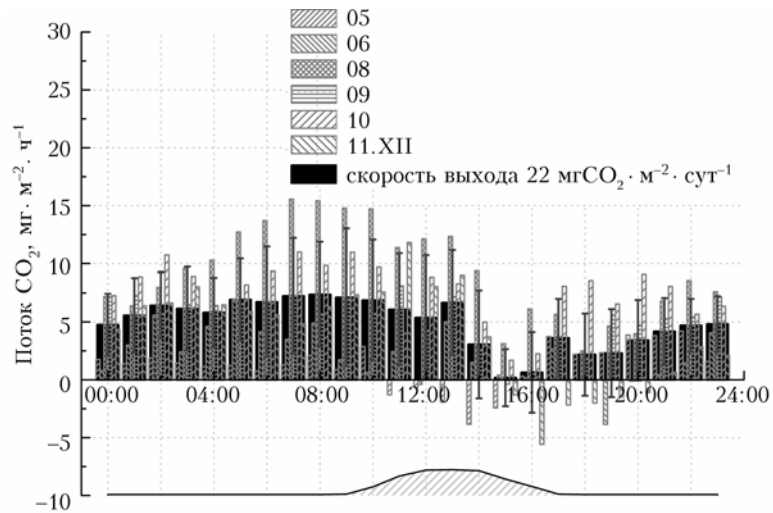
Рис. 5. Временная развертка потоков углекислого газа с октября по декабрь 2010 года (отрицательные значения – поток направлен из атмосферы на водную поверхность)



a



б



в

Рис. 6. Средний суточный ход потоков углекислого газа (отрицательные значения — поток направлен из атмосферы на водную поверхность): *a* — октябрь, *б* — ноябрь и *в* — декабрь (заштрихованная область показывает относительную интенсивность и длительность инсоляции)

тогда в атмосферу поступит порция углекислого газа, сравнимая со среднесуточным декабрьским бюджетом потока ($40\text{--}100\text{ мг/м}^2$).

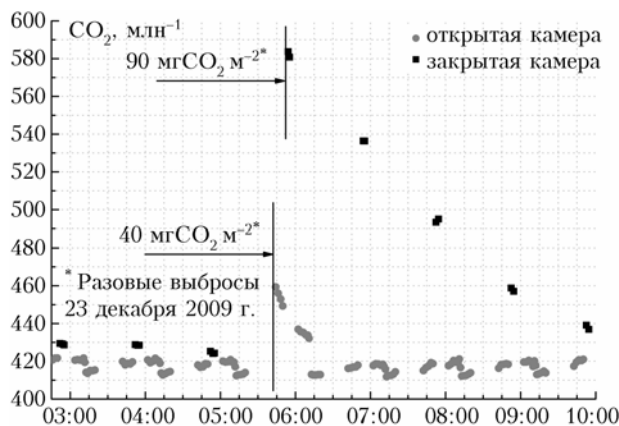


Рис. 7. Выбросы CO_2 , зафиксированные с помощью камер 23 декабря 2009 г. Стрелками показаны моменты образования льда в камерах

Далее, по мере роста ледяного покрова, образующийся при кристаллизации воды CO_2 уже будет выделяться в воду и, создавая подо льдом избыточное парциальное давление, определит изменение направления потока от нижней кромки льда в глубь озера, что вполне соответствует имеющимся представлениям о характере этого процесса для морских условий [13].

Заключение

Суммируя результаты, отметим, что осенью в воде литорали Байкала характер изменения концентраций растворенных газов и биогенных элементов в поверхностной воде озера противоположен процессу, наблюдающемуся в весенне-летний период. Концентрации углекислого газа, кислорода, нитратов и фосфатов возрастают от второй половины сентября к декабрю. Несмотря на существенное уменьшение количества планктона, его фотосинтетическая деятельность достаточно отчетливо проявляется в суточных ритмах изменения концентрации исследуемых компонентов на всем протяжении осеннего сезона вплоть до становления льда.

Рост парциального давления CO_2 в поверхностной воде, обусловленный как деструкцией органического вещества, так и гидродинамическими процессами, и слабое увеличение его содержания в атмосфере в осенний период определяют характер суточного хода потоков углекислого газа в системе «вода—атмосфера».

В начале октября в литорали Байкала еще наблюдается сток CO_2 из атмосферы на водную поверхность, суточный бюджет которого сравним по величине со среднесуточным стоком в период гидрологического лета. В ноябре среднесуточный бюджет потока CO_2 изменяет знак и поверхность озера становится источником поступления углекис-

лого газа в приводную атмосферу, выход которого продолжает усиливаться и достигает своих максимальных значений в декабре, вплоть до начала ледоставного периода. В начале ледоставного периода в литоральной зоне можно ожидать некоторого поступления небольшого дополнительного количества углекислого газа в атмосферу за счет процесса прудуренного замерзания и последующего таяния льда.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 08-05-00258), Программы фундаментальных исследований Отделения наук о Земле РАН № 10.1, экспедиционных грантов СО РАН и госконтрактов Минобрнауки РФ № 02.740.11.0674 и 14.740.11.0204.

1. Домышева В.М., Сакирко М.В., Пестунов Д.А., Панченко М.В. Сезонный ход процесса газообмена CO_2 в системе «атмосфера—вода» в литорали Южного Байкала. 1. Гидрологическое лето // Оптика атмосф. и океана. 2010. Т. 23, № 12. С. 1067–1074.
2. Домышева В.М., Сакирко М.В., Пестунов Д.А., Панченко М.В. Сезонный ход процесса газообмена CO_2 в системе «атмосфера—вода» в литорали Южного Байкала. 2. Гидрологическое лето // Оптика атмосф. и океана. 2011. Т. 24, № 9. С. 737–742.
3. Верещагин Г.Ю. Основные черты вертикального распределения динамики водных масс на Байкале // Юбилейный сб. памяти акад. В.И. Вернадского. Л.: Изд-во АН СССР, 1936. Ч. 2. С. 1207–1230.
4. Россолмо Л.Л. Температурный режим озера Байкал // Труды Байкальской лимнологической станции АН СССР. Т. 16. М.: Наука, 1957. С. 551.
5. Верболов В.И., Сокольников В.М., Шимараев М.Н. Гидрометеорологический режим и тепловой баланс озера Байкал. М.; Л.: Наука, 1965. 374 с.
6. Шимараев М.Н. Элементы теплового режима озера Байкал. Новосибирск: Наука, 1977. 149 с.
7. Кожов М.М. Биология озера Байкал. М.: Изд-во АН СССР, 1962. 340 с.
8. Бондаренко Н.А. Экология и таксономическое разнообразие планктонных водорослей в озерах горных областей Восточной Сибири: Автореф. дис... докт. биол. наук: 03.00.18. Борок: Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН, 2009. 46 с.
9. Сакирко М.В., Панченко М.В., Домышева 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.
10. Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Иноуи Г., Краснов О.А., Максюттов Ш., Мачида Т., Фофанов А.В., Шимояма К. Пространственная и временная изменчивость концентрации CO_2 и CH_4 в приземном слое воздуха на территории Западной Сибири // Оптика атмосф. и океана. 2009. Т. 22, № 2. С. 183–192.
11. Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Иноуи Г., Максюттов Ш., Мачида Т., Фофанов А.В. Вертикальное распределение парниковых газов над Западной Сибирью по данным многолетних измерений // Оптика атмосф. и океана. 2009. Т. 22, № 5. С. 457–464.
12. Домышева В.М., Заворуев В.В., Новицкий А.Л., Панченко М.В., Пестунов Д.А., Сакирко М.В. Экспериментальное исследование процессов газообмена CO_2 в системе «атмосфера—водная поверхность» оз. Байкал

(постановка эксперимента) // Оптика атмосф. и океана. 2007. Т. 20, № 5. С. 448–452.
13. *Rysgaard S., Bendtsen J., Delille B., Dieckmann G.S., Glud R.N., Kennedy H., Mortensen J., Papadimit-*

riou St., Thomas D.N., Tison J.-L. Sea ice contribution to the air–sea CO₂ exchange in the Arctic and Southern Oceans // *Tellus. B.* 2011. Т. 63 P. 823–830.

V.M. Domyшева, M.V. Sakirko, D.A. Pestunov, M.V. Pancheko. **Seasonal behavior of the CO₂ gas exchange process in the «atmosphere–water» system of the littoral zone of Southern Baikal. 3. Autumn.**

The paper continues the cycle of publications devoted to analysis of seasonal peculiarities of the carbon dioxide gas exchange process in the littoral zone of Southern Baikal during the open water period. In this paper we consider the results obtained in autumn.

It is shown that the manner of variations of the concentrations of dissolved gases and biogenic elements in the littoral zone of lake Baikal in autumn is opposite to the process observed in spring and summer. The concentrations of carbon dioxide, oxygen, nitrates, and phosphates increase since the second half of September till December.

In the beginning of October, the sink of CO₂ from the atmosphere to the water surface is still observed. Its budget is comparable to the daily mean sink during hydrological summer. In November, the daily mean of CO₂ flux changes sign, and the lake surface becomes a source of emission of carbon dioxide to the near-water atmosphere. Its yield increases and reaches maximum in December, right up till the freezing-over period. In the beginning of the ice formation period one can expect some small additional emission of CO₂ into the atmosphere due to the process of morning freezing and subsequent melting of ice.