

Сезонный ход процесса газообмена CO₂ в системе «атмосфера – вода» в литорали Южного Байкала. 2. Гидрологическое лето

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 5.05.2011 г.

Продолжается цикл публикаций по анализу сезонных особенностей процесса газообмена углекислого газа в литорали Южного Байкала.

Показано, что в литорали оз. Байкал к концу июля – началу августа активная фотосинтетическая деятельность летнего комплекса водной биоты вызывает снижение содержания биогенных элементов в воде литорали озера и в годовом ходе наблюдаются минимальные значения их концентраций.

Суточный ход CO₂ и O₂ в поверхностном слое воды, обусловленный влиянием водной биоты, отчетливо выражен и превалирует над иными процессами. В литорали озера четкий ритм суточного хода CO₂ наблюдается во всем столбе воды, включая придонные слои.

Фотосинтетическая деятельность биоты, продолжающаяся в период перехода от весеннего сезона к летнему, и развитие летнего сообщества планктона уменьшают концентрацию CO₂. Сильный поток углекислого газа из атмосферы на водную поверхность в дневное время, характерный для этого периода, и увеличение продолжительности светлого времени суток определяют и максимальные значения среднесуточной величины стока углекислого газа в литоральной зоне оз. Байкал в летний гидрологический сезон по сравнению с периодом гидрологической весны.

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

Введение

Обобщая полученные в течение ряда лет материалы о сезонных проявлениях процесса газообмена углекислого газа в системе «атмосфера – вода» в литорали Южного Байкала [1], в настоящей статье рассмотрим летний период.

Начальная стадия летнего периода в литорали характеризуется быстрым повышением температуры воды до максимальных значений за счет поглощения солнечного тепла ограниченной по мощности водной толщей. При максимальном прогреве воды наблюдается летняя вегетация биоты, представленная, в основном, пикопланктонными водорослями [2–4].

Прежде чем приступить к анализу результатов, напомним, что применяемый нами критерий разбиения на сезоны (10 °С) весьма условный и выбран лишь из соображений удобства анализа и изложения

материала. Фактически на Байкале постоянно идут переходные процессы – после вскрытия льда происходит прогрев воды, заканчивается вегетация зимне-весеннего комплекса водорослей, затем при дальнейшем прогреве начинает развиваться их летнее сообщество и, наконец, следует осеннее охлаждение и завершение летней вегетации.

Исходя из выбранного критерия, для анализа данных в период гидрологического лета были объединены циклы измерений в августе и начале сентября 2003–2010 гг. Несмотря на то что средняя температура воды в литорали озера в августе 2010 г. составила 7,5 °С, этот цикл измерений также был отнесен к периоду гидрологического лета.

Обсуждение результатов. Суточный ход концентрации химических компонентов в поверхностной воде

К концу июля – началу августа активная фотосинтетическая деятельность летнего комплекса водной

* 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).

биоты вызывает снижение содержания CO_2 и биогенных элементов в воде литорали озера и в годовом ходе наблюдаются минимальные значения их концентраций.

На рис. 1 представлен среднесуточный ход концентрации CO_2 , O_2 , NO_3^- и PO_4^{3-} в поверхностной воде в литорали оз. Байкал в период гидрологического года (измерительные циклы август 2005, 2007, 2008, 2010 гг., сентябрь 2007 и 2009 гг.).

Как видим из приведенных данных, суточный ход CO_2 и O_2 (рис. 1, *а* и *б* соответственно) в поверхностном слое воды отчетливо выражен. В дневные и вечерние часы концентрация кислорода возрастает, а углекислого газа уменьшается. Ночным и утренним максимумам содержания CO_2 соответствуют минимальные значения концентрации кислорода. Размах концентрации кислорода за сутки составляет 0,4–0,8 мг/л, концентрации углекислого газа 0,3–0,8 мг/л.

Содержание нитратов в результате потребления водорослями снижается в августе до минимальных

значений — 0,02–0,04 мг/л, фосфатов до 0,010–0,015 мг/л, и суточная динамика их выражена слабо. Такое уменьшение концентрации биогенных элементов может ограничивать дальнейшее развитие водной биоты. Отметим, что в августе 2010 г. наблюдалось высокое содержание кислорода, фосфатов и особенно нитратов, концентрация которых была в 3–4 раза выше, чем в другие измерительные циклы этого сезона, что обусловлено низкой температурой воды. К середине сентября содержание нитратов возрастает за счет минерализации их из детрита.

В рассматриваемом сезоне при минимальных значениях концентраций нитратов и фосфатов уже заметно сказывается их изменчивость под воздействием иных процессов (например, нагоны воды с пелагиали озера).

Это обстоятельство существенно размывает картину среднего суточного хода (рис. 1, *в*, *г*). В то же время в устойчивых погодных ситуациях суточный ход нитратов и фосфатов проявляется вполне отчетливо.

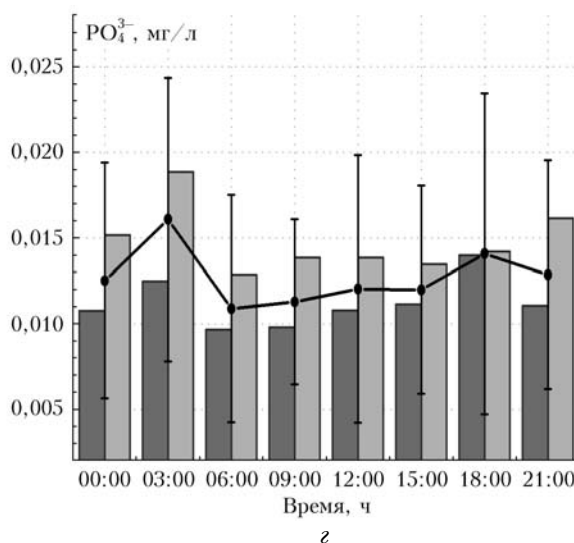
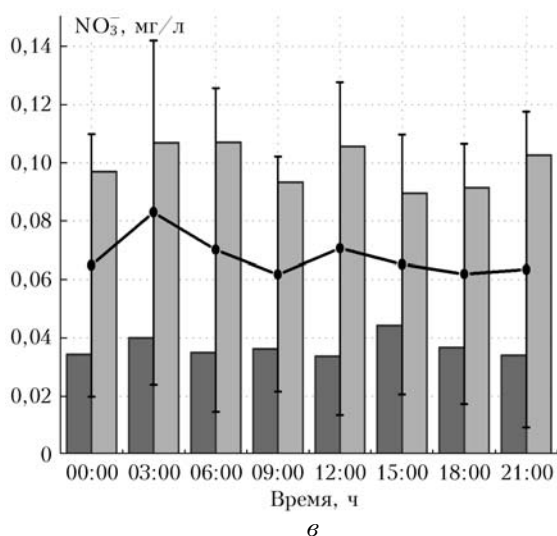
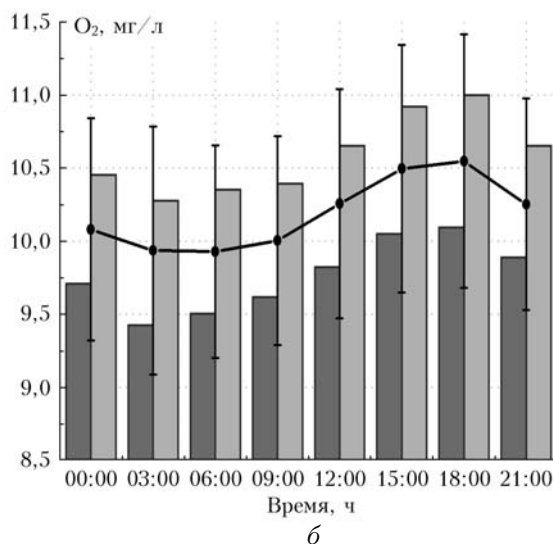
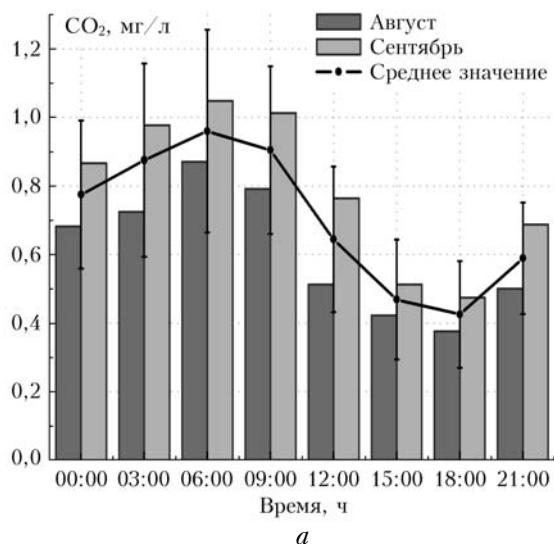


Рис. 1. Среднесуточный ход концентрации CO_2 , O_2 , NO_3^- и PO_4^{3-} в поверхностной воде литорали оз. Байкал (период гидрологического года)

Суточный ход концентрации углекислого газа и биоты в поверхностной воде

Тот факт, что изменения концентрации углекислого газа и кислорода находятся в противофазе, убедительно свидетельствует о том, что они обусловлены единым механизмом. Главным фактором, определяющим суточные колебания их содержания, служат процессы фотосинтеза и деструкции органического вещества [6]. Подробное описание суточного процесса фотосинтеза выходят далеко за рамки данной работы, а применительно к Байкалу экспериментальные данные о связи содержания углекислого газа с фотосинтетической активностью биоты обсуждаются в работе [6]. На рис. 2 представлено сравнение суточного хода концентрации углекислого газа с общей численностью (тыс. клеток на литр) и биомассой водорослей (фитопланктон и фитобентос) в поверхностной воде литорали озера.

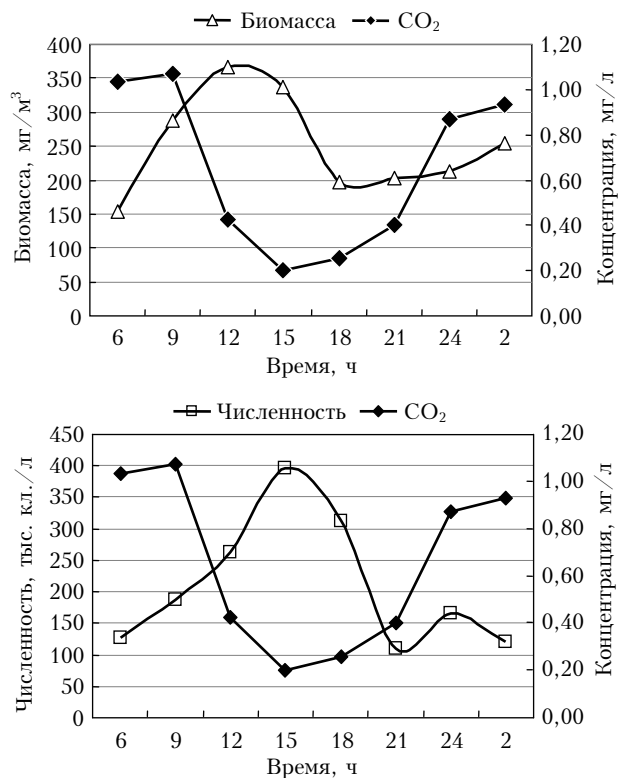


Рис. 2. Изменение содержания углекислого газа, биомассы водорослей и общей численности фитопланктона и фитобентоса в поверхностной воде в сентябре 2004 г.

Как видим, с восходом солнца происходит быстрый рост биомассы и общей численности биоты в поверхностном слое воды. Отметим, что максимум биомассы в сентябре 2004 г. зафиксирован в полдень, в то время как общая численность достигает максимума к 15 ч дня. Соответственно в это время в несколько раз снижается концентрация углекислого газа, минимум которой наблюдается как раз около 15 ч.

Суточный ход и вертикальное распределение углекислого газа

Чтобы оценить, в какой мере наблюдающийся в поверхностном слое воды суточный ход концентрации углекислого газа распространяется по глубине, во всех измерительных сезонах с 2005 по 2007 г. каждые 3 ч нами производился отбор проб с разных глубин для изучения вертикального распределения растворенных газов. Для этого был использован специально разработанный зонд. На твердой основе зонда были закреплены силиконовые шланги, нижний конец которых фиксировался на расстоянии 0, 10, 20, 50, 70, 110 см от верхней границы. Вся конструкция крепилась на измерительной камере. С помощью шприца объемом 350 мл оператор производил отбор проб. Такая конструкция зонда обеспечивала отбор на фиксированных глубинах из слоя воды в несколько сантиметров.

Камера, на которой был размещен зонд, находилась на удалении 20 м от берега. Глубина в месте отбора проб воды составила 120 см.

Анализ накопленных данных показал, что для коротких серий измерений в устойчивых погодных условиях относительное постоянство температуры воды и концентрации гидрокарбонат-иона дает возможность для описания внутрисуточных ритмов изменчивости углекислого газа в воде использовать только один параметр — рН воды [7] (логарифм концентрации CO_2 в воде при постоянстве температуры и ее химического состава обратно пропорционален рН воды).

На рис. 3 приведен 5-суточный фрагмент измерений вертикального профиля рН (здесь для иллюстрации выбран отрезок времени, когда в поверхностном слое воды наблюдались самые большие амплитуды суточного хода).

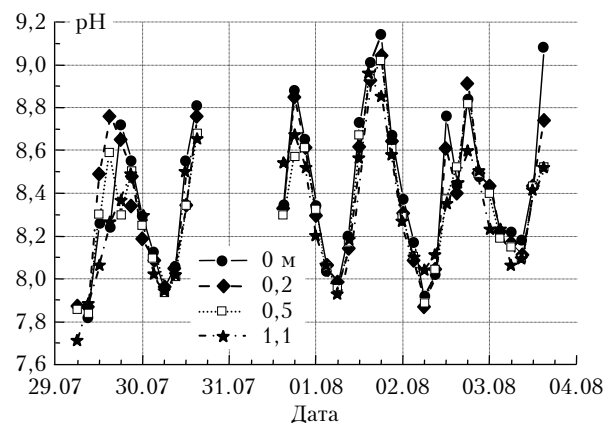


Рис. 3. Вертикальный профиль рН воды в литорали озера (июль–август 2006 г.)

Видим, что изменения рН в течение суток происходят во всем столбе воды, включая придонные слои, а значения рН по глубине различаются слабо (рис. 3). Обратим внимание лишь на одно важное обстоятельство. Наибольшие значения рН в суточном ходе (а следовательно, минимальная концентрация CO_2), как правило, наблюдаются в верхнем 20-см

слое, и, наоборот, их минимальные значения (соответственно максимум концентрации углекислого газа) — в придонном слое. Этот факт объективно свидетельствует о том, что фотосинтетическая активность биоты в первую половину светлого времени суток наиболее интенсивно проявляется в самом верхнем слое воды. Повышение концентрации углекислого газа в ночное время в придонной области во многом определяется деструкцией органического вещества, включая дыхание гидробионтов.

На рис. 4 приведена полная временная развертка измерений парциального давления CO_2 в поверхностной воде с помощью эквипратора [8] (отбор пробы на глубине 30–50 см) в измерительном цикле 2007 г.

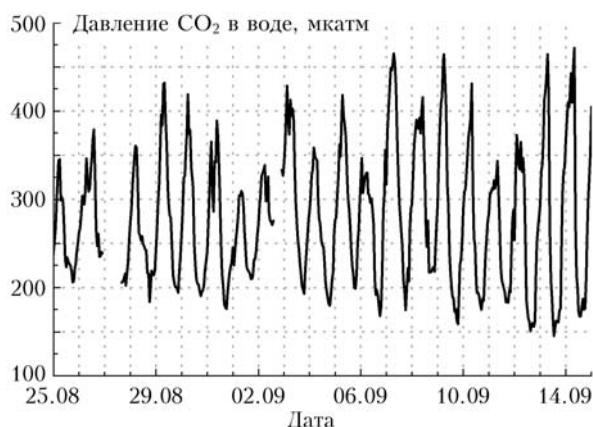


Рис. 4. Парциальное давление углекислого газа в верхнем слое воды, измеренное с помощью эквипратора, 25 августа — 16 сентября 2007 г.

Очевидно, что столь ярко выраженный суточный ход проявляется не во всех измерительных циклах, в определенной степени его сбивают нагоны воды, атмосферные осадки [5] как в поверхностном слое воды, так и по вертикальному разрезу. В отличие от суточной динамики биогенных компонентов, в период гидрологического лета изменения концентрации углекислого газа в воде, обусловленные суточными циклами биоты, превалируют над изменениями содержания CO_2 , связанными с другими процессами.

Поскольку основным процессом формирования суточного цикла газообмена является деятельность водных биологических объектов, которые имеют свои собственные межгодовые ритмы, то целесообразно рассмотреть и межгодовую изменчивость процессов газообмена.

Межгодовая изменчивость концентрации углекислого газа в воде и атмосфере в период гидрологического лета

Для сравнения суточных ритмов концентрации углекислого газа в воде и в приводной атмосфере для разных лет предварительно была проведена обработка данных. Чтобы снизить влияние межсуточ-

ной изменчивости, мы воспользовались следующим приемом. Сначала вычисляли среднее значение рассматриваемой величины для каждого суток. Далее каждое измеренное внутри данных суток значение нормировали на соответствующее среднее. Такая обработка позволяет снизить влияние вариации анализируемых характеристик под воздействием внешних факторов, которые не связаны с суточным ритмом.

Прежде всего, обратим внимание, что размах суточных колебаний парциального давления углекислого газа в воде [9] для всех измерительных циклов составляет более $\pm 20\%$ от среднесуточного значения. Аналогичная обработка данных измерений в приводном слое атмосферы показала: их амплитуда не превышает $\pm 5\%$, что хорошо соответствует и результатам многолетних измерений в атмосфере бореальной зоны Сибири в летние месяцы года [10, 11]. Приведенное на рис. 5 сравнение нормированных амплитуд суточного хода в воде и приводной атмосфере убедительно свидетельствует о том, что какой-либо выраженный тренд не проявляется, а основные факторы, которые определяют межгодовую изменчивость амплитуд суточного хода углекислого газа в воде, связаны именно с внутренними процессами жизнедеятельности водной биоты.

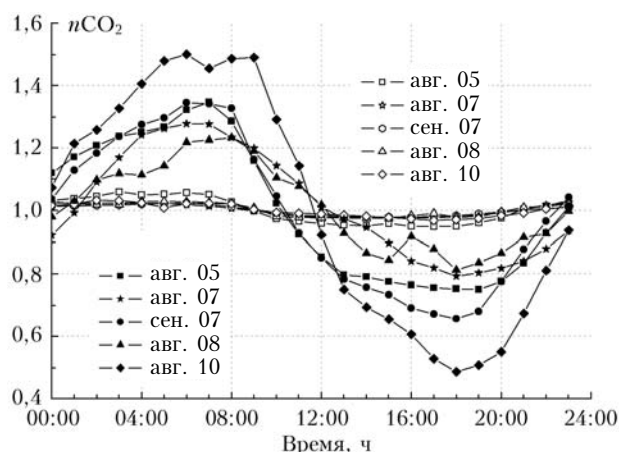


Рис. 5. Нормированный суточный ход концентрации CO_2 в поверхностной воде, полученный с помощью эквипратора (темные значки), и в приводном слое атмосферы на уровне 1 м от поверхности воды (светлые значки) для разных лет наблюдений

Суточный ход потока углекислого газа

Как видим, в период гидрологического лета внутрисуточные амплитуды изменения концентрации углекислого газа в воде заметно превышают атмосферные. Но в отличие от весеннего сезона [1], в котором при сравнительно большом размахе амплитуд суммарный суточный поток (ночной выход и дневной сток) невелик, здесь уже четко превалирует стоковый режим газообмена. Для иллюстрации на рис. 6 приведены временные развертки потоков углекислого газа для двух циклов измерений.

Такой режим обусловлен следующими процессами. С одной стороны, при увеличении температуры

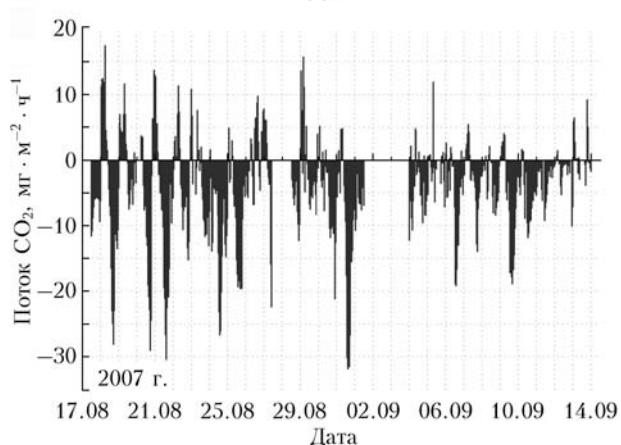
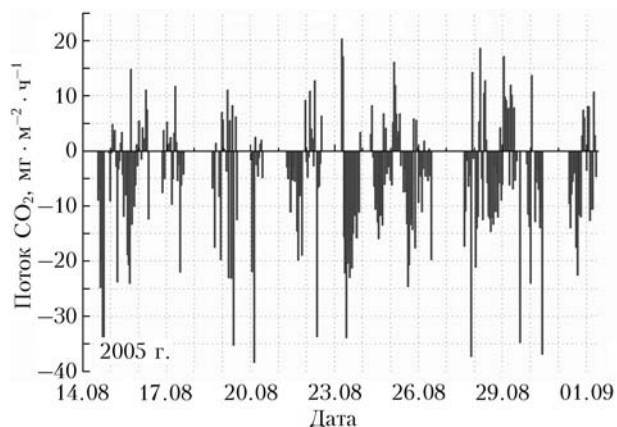


Рис. 6. Поток углекислого газа в системе «атмосфера – вода» для двух циклов измерений (отрицательные значения соответствуют стоку на водную поверхность)

поверхностной воды по мере летнего прогрева при постоянном содержании углекислого газа в воде должно увеличиваться его парциальное давление, обусловленное уменьшением растворимости. При характерном снижении парциального давления CO_2 в атмосфере летом [10, 11] этот процесс мог бы привести к потоку углекислого газа из воды.

С другой стороны, развитие летнего сообщества планктона, максимум которого приходится на вторую половину августа, и его интенсивная фотосинтетическая деятельность обуславливают снижение концентрации CO_2 в воде. Как показано в [1], в весенний период средняя концентрация углекислого газа составляла в мае около 1,23 мг/л, в июне – 1,05 мг/л, в июле – 0,92 мг/л, а в рассматриваемом массиве данных (в августе – первой половине сентября) средняя концентрация уменьшилась до 0,65 мг/л. Падение концентрации углекислого газа в воде настолько существенно, что изменение растворимости не компенсирует снижение его парциального давления. Именно такое уменьшение концентрации CO_2 в поверхностной воде приводит к тому, что практически на протяжении всего периода суток атмосферное парциальное давление углекислого газа превышает давление CO_2 в воде и обуславливает сток углекислого газа из атмосферы (рис. 7).

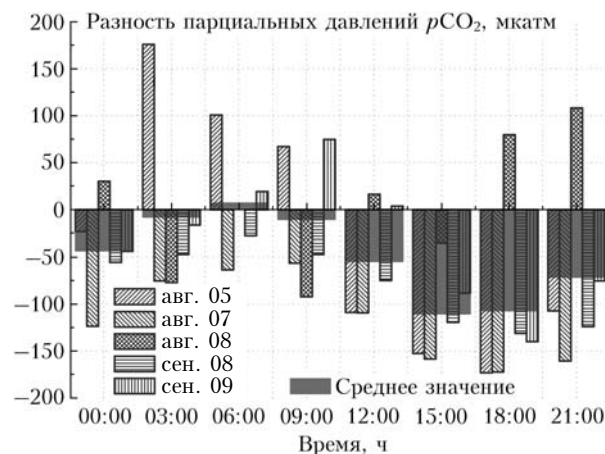


Рис. 7. Суточный ход разности парциальных давлений углекислого газа в системе «атмосфера – вода» в период гидрологического лета

На рис. 8 приведен средний суточный ход потоков углекислого газа для всех циклов измерений периода гидрологического лета.

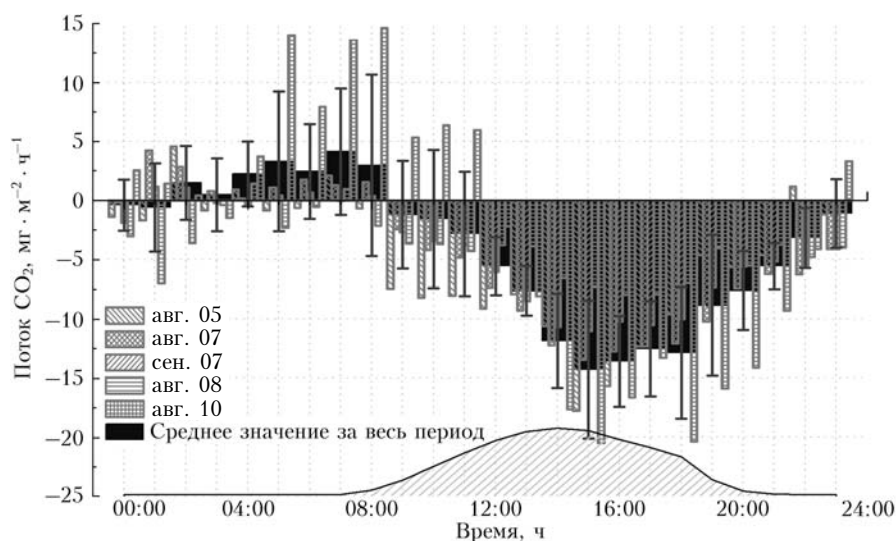


Рис. 8. Средний суточный ход потоков углекислого газа (отрицательные значения соответствуют стоку на водную поверхность). Внизу – относительная интенсивность и продолжительность инсоляции

Как видим из рис. 8, суточный ход потока проявляется отчетливо. В частности, среднесуточный сток из атмосферы составил в августе 2007 г. $120 \text{ мг CO}_2 \text{ м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$, в августе – сентябре 2008 г. $95 \text{ мг CO}_2 \text{ м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$, в августе 2010 г. $65 \text{ мг CO}_2 \text{ м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$.

Таким образом, по данным наших измерений средний сток углекислого газа на поверхность литорали Байкала из атмосферы в период гидрологического лета составил $93 \text{ мг CO}_2 \text{ м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$, тогда как средний сток для июня составлял $22 \text{ мг CO}_2 \text{ м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$ [1].

Заключение

Суммируя результаты, отметим, что в период гидрологического лета в воде литорали озера наблюдаются минимальные значения концентрации биогенных элементов, изменения содержания нитратов и фосфатов в течение суток незначительные. Суточный ход CO_2 и O_2 в поверхностном слое воды, обусловленный влиянием водной биоты, отчетливо выражены и превалирует над иными процессами. В литорали озера четкий ритм суточного хода CO_2 наблюдается во всем столбе воды, включая придонные слои. Размах суточных колебаний парциального давления углекислого газа в воде для всех измерительных циклов составляет более $\pm 20\%$ от среднесуточного значения, в то время как в приводном слое атмосферы их амплитуда не превышает $\pm 5\%$.

Фотосинтетическая деятельность биоты, продолжающаяся в период перехода от весеннего сезона к летнему, и развитие летнего сообщества планктона уменьшают концентрацию CO_2 . Его парциальное давление практически на протяжении почти всего времени суток становится ниже атмосферного, и, соответственно, увеличивается продолжительность стока углекислого газа.

Сильный поток углекислого газа из атмосферы на водную поверхность в дневное время, характерный для этого периода, и увеличение продолжительности стока в течение суток определяют и максимальные значения среднесуточного стока углекислого газа в литоральной зоне оз. Байкал в летний гидрологический сезон по сравнению с периодом гидрологической весны.

Эксперименты выполнены при финансовой 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 14.740.11.0202.

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. Гидрологическая весна // Оптика атмосф. и океана. 2010. Т. 23, № 12. С. 1067–1074.
2. Nagata T., Takai K., Kawanobe K., Kim D., Nakazato R., Guseynikova 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.
3. Back R.C., Bolgrin D.W., Guseynikova N.E., Bondarenko N.A. Phytoplankton photosynthesis in Southern Lake Baikal // J. Great Lakes Res. 1991. V. 17, N 2. P. 194–202.
4. Кожова О.М., Кобанова Г.И. Новые данные о составе планктонной флоры // Сиб. экол. ж. 1998. Т. 5, № 2. С. 131–135.
5. Домышева В.М., Панченко М.В., Пестунов Д.А., Сакирко М.В. Влияние атмосферных осадков на процесс газообмена CO_2 с водной поверхностью озера Байкал // Докл. РАН. 2007. Т. 414, № 5. С. 690–693.
6. Заворуев В.В., Панченко М.В., Домышева В.М., Сакирко М.В., Белых О.И., Поповская Г.И. Суточный ход газообмена CO_2 и интенсивности фотосинтеза в поверхностной воде озера Байкал // Докл. РАН. 2007. Т. 413, № 3. С. 403–407.
7. Домышева 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.
8. Пестунов Д.А., Панченко М.В., Шмаргунов В.П. Измеритель содержания CO_2 , растворенного в воде // Приборы и техн. эксперим. 2008. № 5. С. 143–145.
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.

V.M. Domyshva, M.V. Sakirko, D.A. Pestunov, M.V. Panchenko. Seasonal behavior of the CO_2 gas exchange process in the “atmosphere – water” system of the littoral zone of Southern Baikal. 2. Hydrological summer.

This paper continues the cycle of publications presenting analysis of the seasonal peculiarities of the carbon dioxide gas exchange process in the littoral zone of Southern Baikal and is devoted to the results obtained in summer.

It is shown that photosynthetic activity of water biota at the end of July – the beginning of August causes the decrease of the content of biogenic elements in water in littoral zone of the lake, and minimum values of their concentrations are observed in the annual behavior.

Diurnal behavior of CO_2 and O_2 in the near-surface water layer caused by the effect of water biota is well pronounced and prevails over other processes. In the littoral zone of the lake, the well pronounced diurnal behavior of CO_2 is observed in the whole water column, including near-bottom layers.

Photosynthetic activity of biota continuing in the period of transition from spring to summer and development of the summer population of plankton decrease the CO_2 concentration. Strong flux of carbon dioxide from the atmosphere to the water surface in the daylight time, characteristic of this period, and the increase of duration of the sink during a day determine the maximum values.