

АППАРАТУРА И МЕТОДЫ ОПТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 551.501.4

Суточный ход потока и парциального давления углекислого газа в поверхностной воде в координатах «солнечного времени» (период открытой воды в литорали Южного Байкала 2004–2015 гг.)

**Д.А. Пестунов^{1,2}, А.М. Шамрин¹, В.М. Домышева³,
М.В. Сакирко³, М.В. Панченко^{1*}**

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

²*Национальный исследовательский Томский политехнический университет
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30*

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

Поступила в редакцию 2.11.2016 г.

Продолжительная серия регулярных измерений концентрации углекислого газа в поверхностной воде и потоков CO₂ в литоральной зоне Байкала показала, что в течение всего периода открытой воды (май–декабрь) явно проявляется суточный ритм, который связан с процессами фотосинтетической деятельности планктона. Для того чтобы на фоне воздействия множества факторов различной природы на изменение концентрации углекислого газа в поверхностной воде и его потоков в системе «атмосфера–вода» выделить роль только процесса фотопериодичности, в работе рассматривается схема суточного хода CO₂ в период открытой воды в 2007–2015 гг. в литоральной зоне Южного Байкала в координатах продолжительности солнечного сияния, которое рассчитывалось исходя из теоретически возможной продолжительности солнечного сияния (от восхода до захода солнца при условии ясного неба и открытом горизонте).

Предложенная схема параметризации, восстановления значения этих характеристик для каждого момента времени, может найти применение при проведении оценочных расчетов в моделях цикла углерода и будет полезна при планировании оптимального режима исследований биологических и химических процессов в оз. Байкал.

Ключевые слова: углекислый газ, парциальное давление, поток, инсоляция, суточный ход, фотосинтез, деструкция, планктон, оз. Байкал; carbon dioxide, partial pressure, flux, solar radiation, diurnal variation, photosynthesis, destruction, plankton, Lake Baikal.

Введение

Для выяснения причин неуклонного роста углекислого газа в атмосфере необходима постановка широкого круга измерений различного пространственно-временного масштаба [1]. Огромная территория и разнообразие природных комплексов Сибири — факторы, которые во всех сценариях рассматриваются как одни из важнейших регуляторов углеродного цикла в Северном полушарии [2–4]. В частности, до сих пор в различных модельных оценках бюджета углерода [4] практически не используются сведения о вкладе бо-

реальных озер России, в то время как зарубежные специалисты уделяют этому вопросу значительное внимание [5–10].

В Сибири одним из природных объектов мирового значения, несомненно, является оз. Байкал [11]. Очевидно, что выбор Байкала для наших исследований [12] процесса газообмена CO₂ в первую очередь обусловлен необходимостью учета его влияния на изменение парниковых газов в атмосфере, по крайней мере в региональном масштабе. Следует отметить, что Байкал является и уникальной природной лабораторией для изучения циклов углеродосодержащих газов в системе «атмосфера — водная поверхность». Из-за исключительной чистоты байкальской воды [13] набор различных составляющих сложного комплекса факторов, воздействующих на процесс газообмена в системе «атмосфера — водная поверхность», значительно меньше по сравнению с Мировым океаном.

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

Для того чтобы на фоне воздействия множества факторов различной природы на изменение концентрации углекислого газа в поверхностной воде и его потоков в системе «атмосфера–вода» выделить роль только процесса фотопериодичности в жизнедеятельности планктона, в работе рассматривается схема суточного хода CO_2 в период открытой воды в 2004–2015 гг. в литоральной зоне Южного Байкала в координатах продолжительности солнечного сияния.

Материалы и методы

Регулярные наблюдения проводились в литорали озера на западном побережье Южного Байкала ($51^\circ 54'$ с.ш. и $105^\circ 04'$ в.д.) на территории Научного стационара ЛИН СО РАН измерительными циклами продолжительностью 2–3 нед. в разные гидрологические сезоны. Исходя из поставленной задачи комплексного исследования физических, химических и биологических составляющих процесса газообмена «атмосфера–вода» в литорали озера из различных методов измерения потоков газа был выбран камерный метод [12]. Концентрация растворенного углекислого газа определялась как по химическому составу поверхностной воды, так и с применением эквивалента [12]. Выносной пункт, на котором проводятся измерения, располагается на оконечности пирса на расстоянии 30 м от берега.

Суточный ход газообмена в системе «атмосфера–вода» и фотосинтез

Для определения иерархии физических, химических и биологических составляющих в процессе газообмена нами в основу анализа положен суточный ход измеряемых характеристик. Суточный ход CO_2 в приводной атмосфере и в воде формируется в результате совокупного воздействия внешних межгодовых, сезонных, гидрометеорологических условий на биологические ритмы продуцирования и деструкции органического вещества [14], а для растворенных в воде газов еще и на интенсивность физико-химических процессов перехода газов через водную поверхность [15, 16]. Несомненно, что важным фактором, влияющим на сезонные изменения и суточный ход содержания растворенных в воде Байкала газов, служат встречные процессы: с одной стороны, фотосинтез, при котором идет поглощение CO_2 , с другой – дыхание гидробионтов и разложение органического вещества (выделение CO_2) [17–21]. Продолжительная серия регулярных прямых измерений концентрации углекислого газа в поверхностной воде и потоков CO_2 в литоральной зоне Байкала показала, что в течение всего периода открытой воды (май–декабрь) на фоне межгодовой и сезонной изменчивости явно проявляется суточный ритм [22–28], который, очевидно, связан именно с процессами жизнедеятельности планктона.

Хорошо известно, что «каждому пункту земной поверхности свойствен свой световой ритм, который отражается в биологии растений, животных и микроорганизмов. Реакция организмов на суточный ритм поступления солнечной энергии, т.е. на соотношение светлого и темного периодов суток, получила название фотопериодизма...» [29]. Фотопериодизм выражается в том, что организмы разных географических широт на протяжении многих лет адаптировались к определенному циклу солнечного освещения, а длина светового дня здесь выступает и как условие роста и развития, и как сигнал для наступления иных процессов в их жизнедеятельности [29]. В водной среде после восхода солнца с увеличением интенсивности инсоляции начинается процесс фотосинтеза (потребление CO_2), но после достижения некоторого (специфичного для разных видов планктона) уровня, так называемой ингибирующей освещенности, активность фотосинтеза начинает снижаться [30–33].

В это же время в воде непрерывно идет и встречный процесс выделения углекислого газа в результате дыхания водных организмов и деструкции органического вещества. Продолжительность и интенсивность приходящего солнечного излучения, гидрометеорологические условия, видовой и количественный состав планктона [14] в течение года изменяются, соответственно, существенно меняется и соотношение вклада этих встречных процессов в формирование суточного хода растворенных газов [33].

Анализ массива данных наших измерений с 2004 по 2015 г. [34] позволяет выявить следующую устойчивую картину суточного хода для всего периода открытой воды: после восхода солнца происходит снижение концентрации углекислого газа в воде (т.е. потребление CO_2 при фотосинтезе превалирует над его поступлением в воду), которое прекращается в послеполуденное время. И с этого момента до следующего восхода идет увеличение содержания CO_2 , обусловленное дыханием биоты и разложением органического вещества. И даже в предлестовый период (декабрь), для которого характерны наиболее высокие значения парциального давления углекислого газа P_{CO_2} в поверхностной воде, значительно превышающие его величину в атмосфере, суточный ход проявляется вполне достоверно (рис. 1, а).

Учитывая, что во все сезоны в приводной атмосфере суточный ход P_{CO_2} даже в летние месяцы выражен слабо (вариации составляют около 5% от среднесуточного значения [24]), очевидно, что повышение и снижение P_{CO_2} в поверхностной воде проявляются и в суточном ходе потоков углекислого газа. Для периода с мая по начало ноября характерными являются ночной выход углекислого газа в атмосферу и дневной сток, а в декабре на фоне постоянной эмиссии CO_2 с водной поверхности отчетливо наблюдается уменьшение величины потока в дневное время (рис. 1, б).

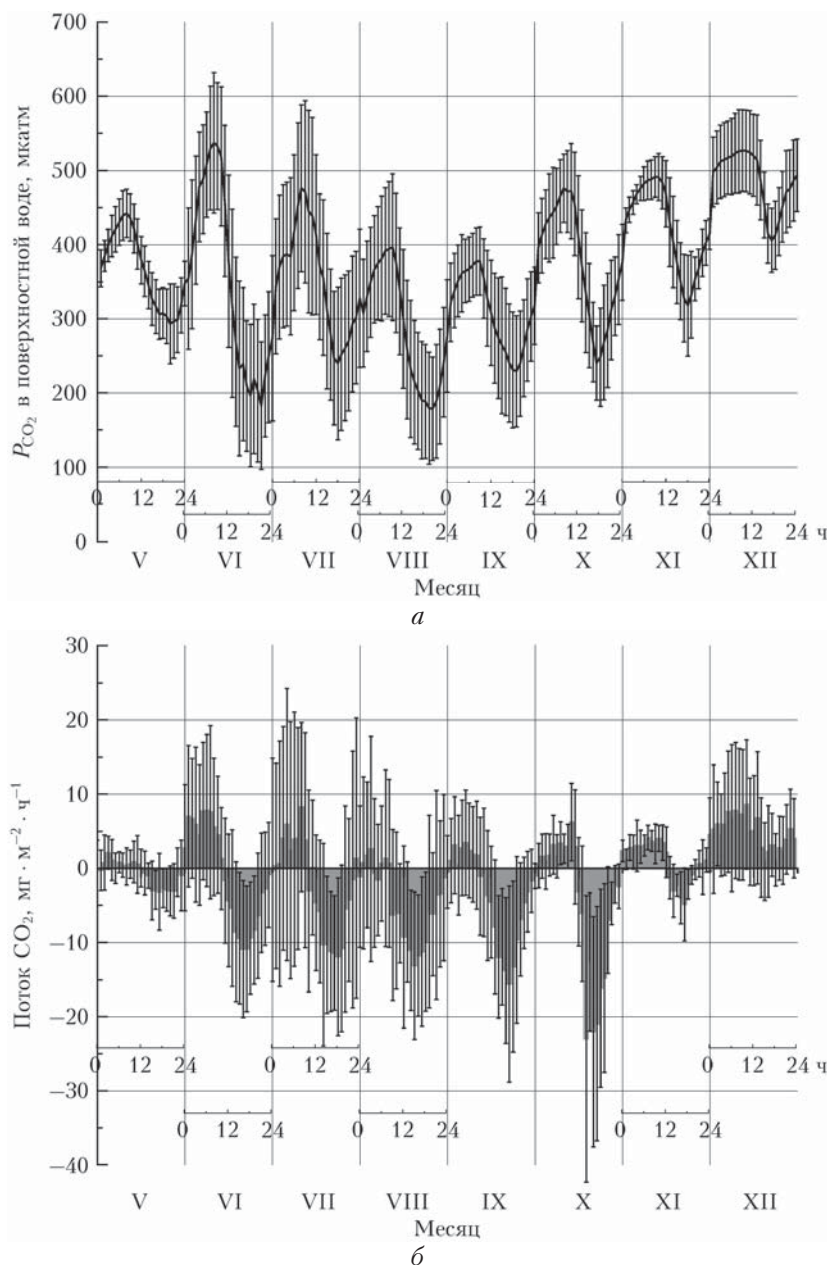


Рис. 1. Средний суточный ход и СКО в период открытой воды (осреднение по всем измерительным циклам с 2004–2015 гг.): *a* – парциальное давление углекислого газа в поверхностной воде; *б* – поток углекислого газа (здесь и далее отрицательные значения потока соответствуют направлению потока CO_2 из атмосферы на водную поверхность)

Суточный ход потока и парциального давления CO_2 в поверхностной воде в координатах «солнечного времени»

В период открытой воды в литорали озера Байкал в разные месяцы года закономерно изменяются как средние значения потоков и парциального давления CO_2 , так и амплитуда и временной интервал между их максимумами и минимумами в суточном ходе (см. рис. 1).

Очевидно, что амплитуда и временной интервал анализируемых характеристик в суточном ходе главным образом зависят от величины падающего на

поверхность озера солнечного потока (прямой и рассеянной радиации), необходимого для запуска и завершения процесса фотосинтеза [32, 33].

Чтобы наглядно продемонстрировать роль фотопериодичности жизнедеятельности водной биоты в изменении концентрации углекислого газа в поверхностной воде и его потоков в системе «атмосфера–вода» на фоне воздействия множества факторов различной природы, была предложена процедура описания суточного хода этих характеристик для всего периода открытой воды в едином масштабе.

Сначала в координатах поясного времени в абсолютных единицах был рассчитан средний суточный ход P_{CO_2} и потока CO_2 для каждого месяца

периода открытой воды (см. рис. 1). Далее вычислялись разность между максимумом и минимумом в среднем суточном ходе (размах) и среднее значение анализируемых характеристик в целом за 24 ч. Результаты для каждого месяца приведены в табл. 1.

Перевод календарного времени в «солнечные координаты»

Для того чтобы представить суточный ход для разных сезонов в единой временной шкале, был осуществлен перевод календарного времени в «солнечное время», которое рассчитывалось исходя из теоретически возможной продолжительности солнечного сияния (от восхода до захода солнца при условии ясного неба и открытом горизонте, см. www.esrl.noaa.gov/gmd/grad/solcalc/).

Сначала для заданных координат (51,90° с.ш. и 105,06° в.д.) рассчитывалось время восхода и захода солнца за горизонт для каждого дня года [35]. Затем календарные сутки были разделены на 24 «сол-

нечных часа», время восхода солнца было принято за 06:00 «солнечного времени», захода — за 18:00, а полученные временные промежутки дневного и ночного периодов были разбиты на 12 равных частей. Очевидно, что при таком описании длительность солнечного часа в светлое и темное время суток различна и меняется в течение года.

На рис. 2 показано распределение солнечных часов для каждого дня года. Для локального поясного времени здесь и далее принимаем сдвинутое на 7 ч вперед всемирное координированное время (UTC+7). В этом случае в точке измерения полуденное солнце достигает максимальной высоты в 12:00.

Затем ранее определенный средний суточный ход в координатах поясного времени в абсолютных единицах был переведен в координаты «солнечного времени». Пример среднего для циклов наблюдений (2007–2015 гг.) суточного хода парциального давления CO₂ в воде в июне и декабре до и после перехода на «солнечную» шкалу времени представлен на рис. 3.

Таблица 1

Средние значения и амплитуда (размах) суточного хода парциального давления и потоков CO₂

Месяц	Парциальное давление в воде, мкاتم		Поток CO ₂ , мг · м ⁻² · ч ⁻¹	
	Среднее значение	Размах	Среднее значение	Размах
Май	371	144	-0,7	4,3
Июнь	365	328	-0,9	18,7
Июль	362	202	-2,3	20,2
Август	289	216	-4,5	15,8
Сентябрь	308	162	-3,9	19,1
Октябрь	376	217	-4,5	29,2
Ноябрь	420	167	0,9	9,0
Декабрь	482	121	4,9	7,7

Примечание. Отрицательные значения — поток направлен из атмосферы на водную поверхность.

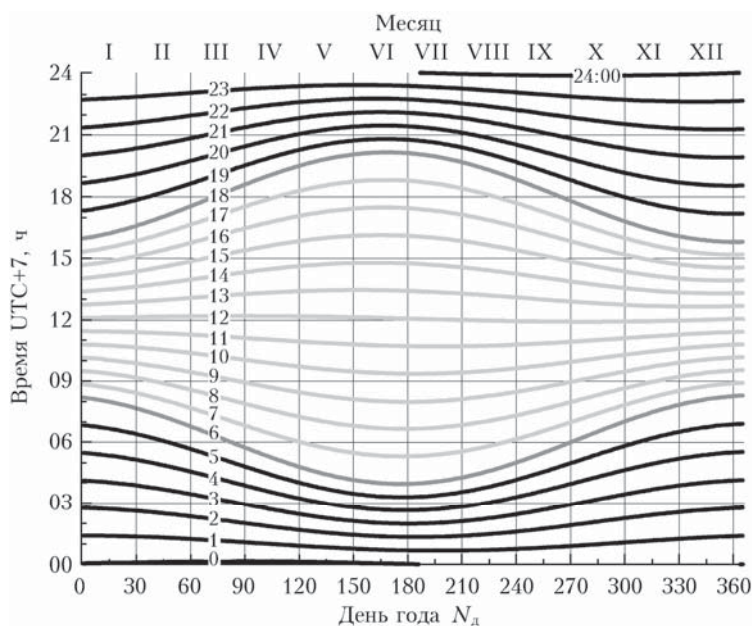


Рис. 2. График перехода из поясного времени в «солнечное» для каждого дня года N_d в измерительной точке (51,90° с.ш. и 105,06° в.д.)

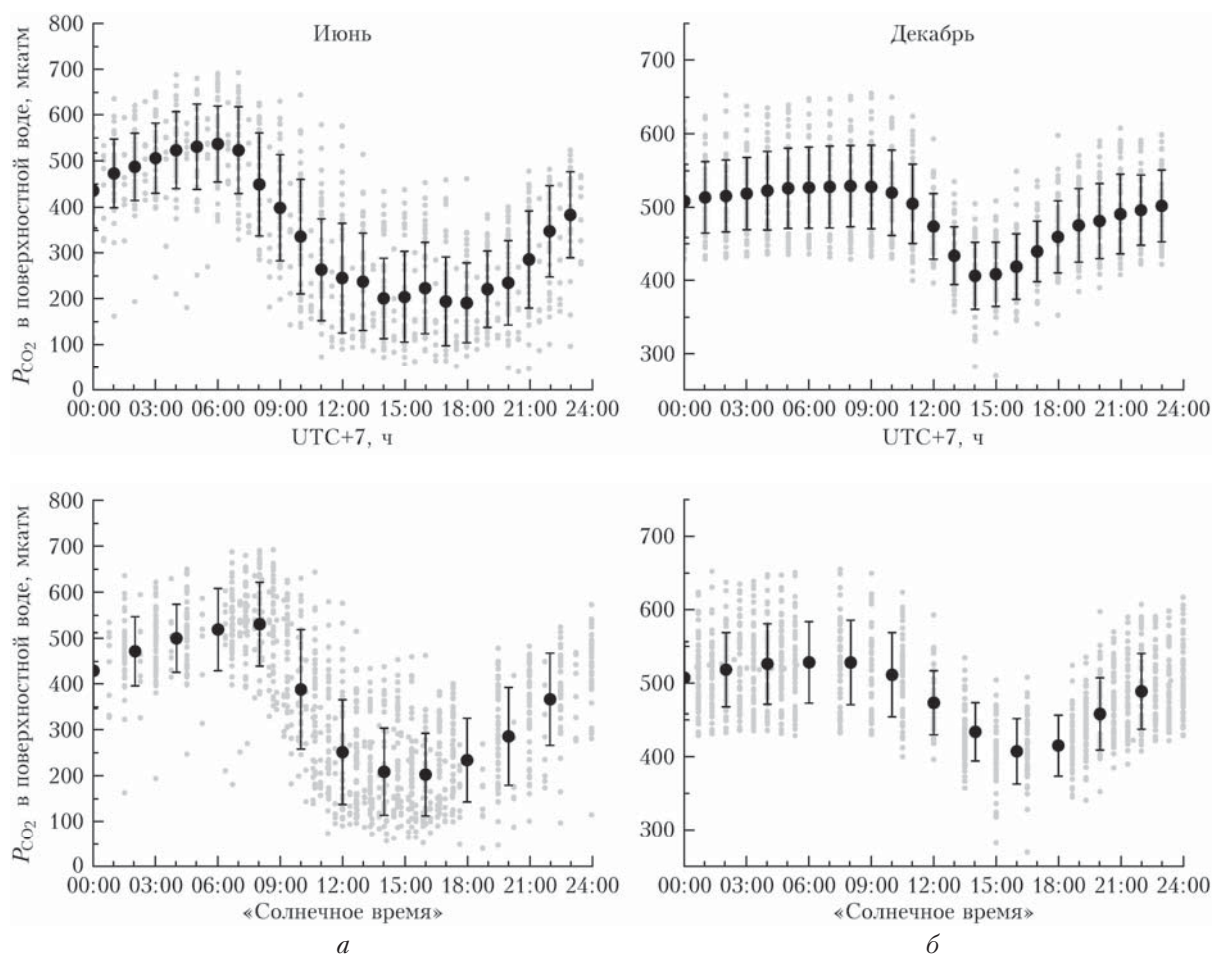


Рис. 3. Среднесуточный ход парциального давления CO_2 в поверхностной воде по данным измерений 2007–2015 гг. за июнь (а) и декабрь (б) по поясному времени UTC+7 (вверху) и в «солнечных координатах» (внизу)

Нормировка суточного хода в «солнечных координатах»

После перевода данных в «солнечное время» была проведена нормировка парциального давления и потоков CO_2 следующим образом: для каждого месяца среднего суточного хода (уже в «солнечных координатах») вычиталась соответствующая величина его среднесуточного значения (см. табл. 1), а полученная разность делилась на размах суточного хода.

Реализация перевода календарного времени в «солнечные координаты» и описанного приема нормировки обеспечила возможность представления суточного хода парциального давления и потоков CO_2 для всех месяцев периода открытой воды (рис. 4, табл. 2) в едином масштабе.

Как видно из рис. 4, во все месяцы в период открытой воды в таком представлении наглядно проявляется именно суточный ход процесса фотосинтеза, действие которого начинается с восходом солнца (в 06:00 «солнечного времени»). Отметим, что нормированный суточный ход парциального давления CO_2 в воде в «солнечных координатах» описывается

с меньшей погрешностью, чем поток углекислого газа в системе «атмосфера–вода». Это вполне ожидаемый результат, поскольку по сравнению с процедурой определения парциального давления газа в воде погрешность измерения потока с применением камерного метода выше и сам процесс газообмена в системе «атмосфера–вода» зависит от большего числа факторов (см. применение камерного метода в [36]).

Предложенная схема параметризации с определенной точностью может быть использована для оценки значения этих характеристик для каждого момента времени. В табл. 2 представлен средний нормированный суточный ход в координатах солнечного времени для всего периода открытой воды, рассчитанный по данным, представленным на рис. 4.

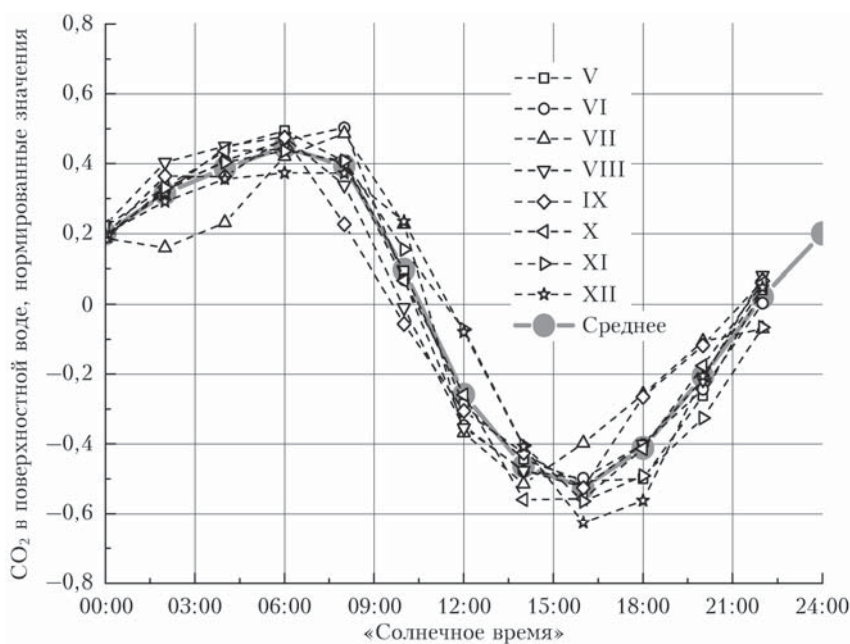
Восстановление парциального давления в воде и потока CO_2 для заданной даты и времени проводится в следующем порядке:

1) сначала исходя из заданных времени и даты рассчитывается «солнечное время», для этого можно воспользоваться графиком (см. рис. 1);

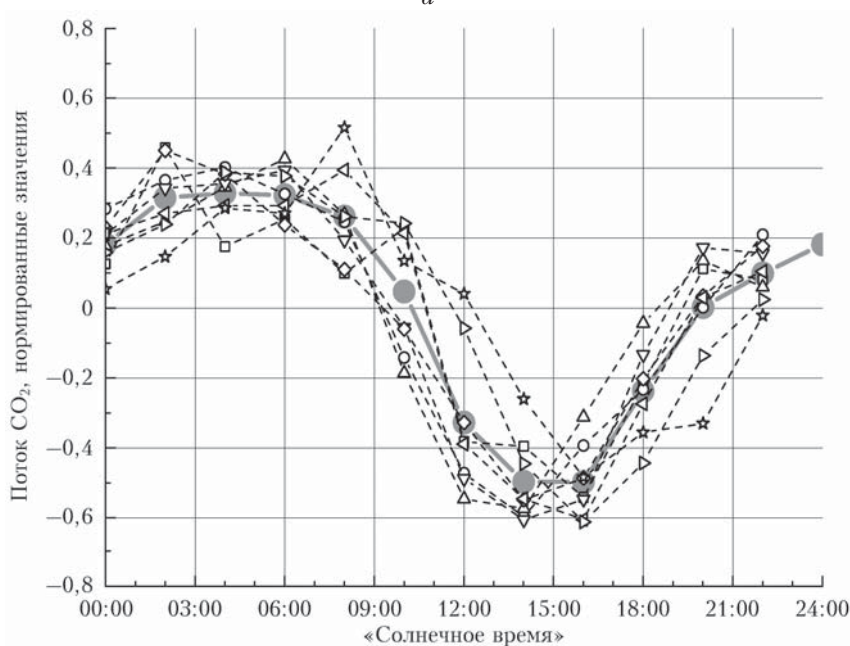
2) по табл. 2 определяется соответствующее этому времени значение нормированного суточного хода;

3) полученное в п. 2) значение умножается на размах в соответствующий месяц года (см. табл. 1), а к произведению прибавляется его среднее значение.

Пример восстановленного суточного хода потоков углекислого газа в системе «атмосфера–вода» для всего периода открытой воды приведен на рис. 5.



а



б

Рис. 4. Нормированный суточный ход парциального давления CO_2 в поверхностной воде (а) и потока CO_2 в системе «вода–атмосфера» (б) в «солнечном времени» для всех месяцев в период открытой воды

Таблица 2

Средний нормированный суточный ход в координатах «солнечного времени» для всего периода открытой воды

«Солнечное время»	00:00	02:00	04:00	06:00	08:00	10:00	12:00	14:00	16:00	18:00	20:00	22:00
P_{CO_2} в воде	0,200	0,316	0,387	0,448	0,393	0,098	-0,259	-0,463	-0,524	-0,411	-0,206	0,021
Поток CO_2	0,182	0,315	0,329	0,323	0,261	0,047	-0,328	-0,496	-0,498	-0,238	0,003	0,099

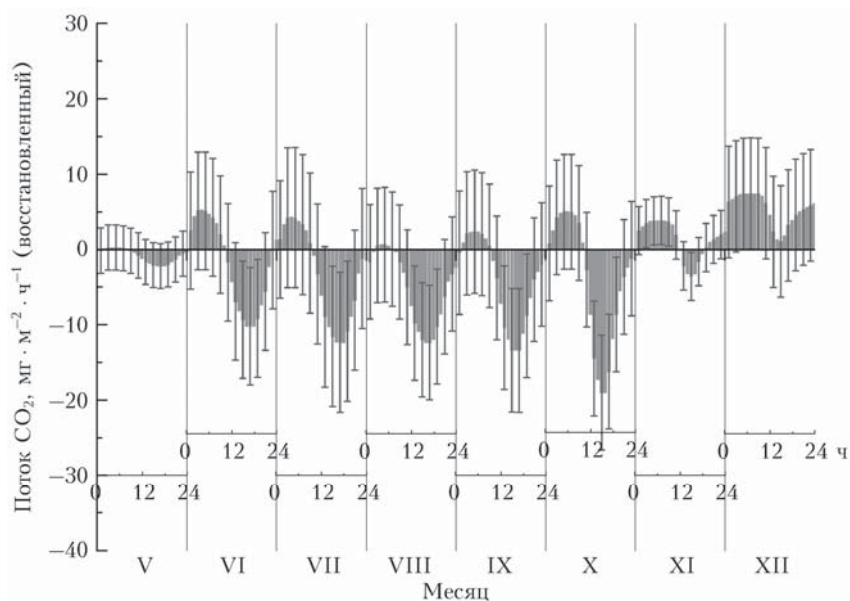


Рис. 5. Восстановленный суточный ход и СКО потоков углекислого газа на 15-е число каждого месяца в период открытой воды. Время UTC+7

Обсуждение результатов

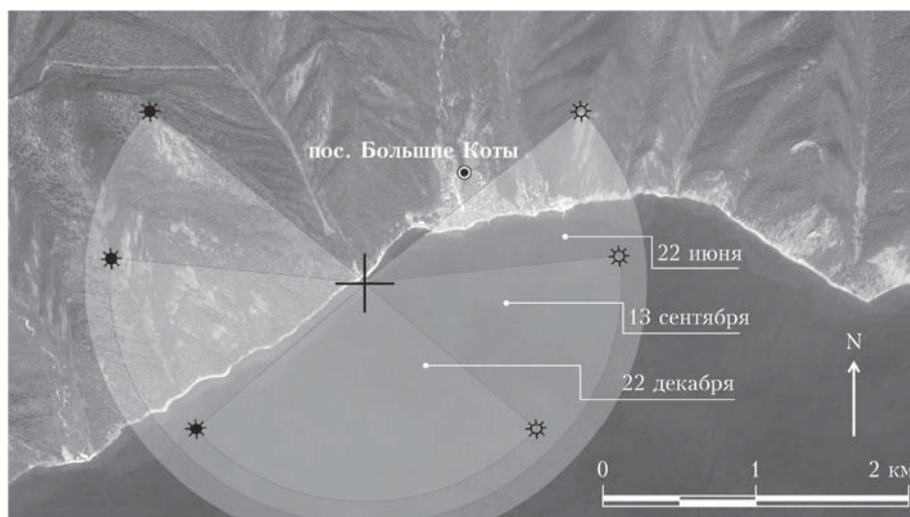
Как уже было сказано, суточный ход фотосинтеза зависит от падающего на поверхность озера суммарного потока прямой и рассеянной радиации [32, 33], величина которого обусловлена сезонным ходом, изменчивостью оптического состояния атмосферы [35, 37–40], а для конкретного места наблюдения — и степенью закрытости горизонта ландшафтом. Наш наблюдательный пункт с северо-востока и запада окружен горной грядой (рис. 6, а). Как видно, с июня по сентябрь в моменты восхода и захода солнца окружающий ландшафт препятствует поступлению прямого солнечного потока в точку измерений. И только в декабре (до завершения периода открытой воды) прямой поток поступает на водную поверхность на протяжении всего дня. В то же время сопоставление непосредственных показаний пиранометра с расчетными данными о поступающей суммарной солнечной радиации (рис. 6, б) (подчеркнем, что расчет производился для открытого горизонта) показывает, что в момент восхода влияние ландшафта практически не сказывается на величине поступающего потока радиации в течение всего анализируемого периода. А вот при закате уход солнца за горный массив в июне и сентябре (см. рис. 6, б) явно проявляется на показаниях пиранометра.

Для того чтобы показать, в какой мере ландшафт оказывает влияние на суточный ход анализируемых характеристик, обратимся к данным о P_{CO_2} в воде, представленным на рис. 4, а. Как видно, в период с мая по октябрь с 06:00 ч «солнечного времени» (расчетное время восхода) наблюдается снижение содержания CO_2 в воде, обусловленное фотосинтетической деятельностью планктона. Следовательно, в эти месяцы уже сразу после восхода солнца падающего потока рассеянной радиации (прямой поток закрыт горным массивом) вполне

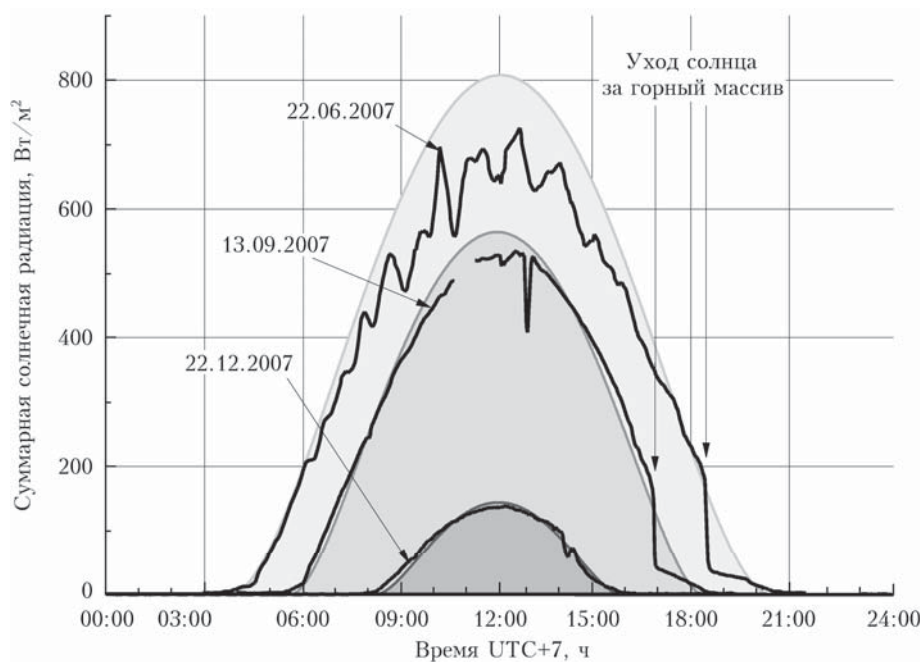
достаточно для начала интенсивного фотосинтеза, а это значит, что влияние ландшафта практически не сказывается на этом процессе. В то же время в ноябре и декабре в период отсутствия затенения ландшафтом начало изменения парциального давления углекислого газа в воде наблюдается на 1,5–2 ч позже восхода (см. рис. 4, а). По-видимому, это свидетельствует о том, что в первые утренние часы при низком положении Солнца над горизонтом потока солнечной радиации (см. рис. 6, б) еще не хватает для необходимой мощности фотосинтетического процесса, при котором потребление CO_2 смогло бы ощутимо превысить поступление углекислого газа в воду в результате действия деструкции и дыхания. Подчеркнем, что именно в эти последние месяцы периода открытой воды парциальное давление углекислого газа в воде значительно превышает атмосферное, а его поток направлен в атмосферу (см. табл. 1).

Также из данных на рис. 4, а следует, что во все месяцы снижение содержания углекислого газа в воде в течение светлого времени суток наблюдается до 15:00–16:00 ч в «солнечных координатах», а затем начинается его рост, т.е. интенсивное потребление CO_2 водным планктоном прекращается. Отсюда можно заключить, что в период захода солнца ограничение падающего потока горным массивом, окружающим пункт измерения, уже не сказывается на суточном ходе.

Рассматривая описание средних характеристик в «солнечных часах», рассчитанных исходя из теоретически возможной продолжительности солнечного сияния (при условии ясного неба и открытом горизонте), следует отметить, что в предложенном варианте отражены лишь наиболее устойчивые (регулярно воспроизводимые) черты суточного хода, которые преимущественно регулируются фотосинтезом.



a



б

Рис. 6. Угловое положение восхода и захода солнца 22 июня, 13 сентября и 22 декабря в пункте измерения, обозначенного черным знаком «+» (*a*). Показания пиранометра 22 июня, 13 сентября и 22 декабря в 2007 г. (*б*) и расчетное значение потока суммарной радиации без учета ландшафта для этих дней (серый фон)

В литоральной зоне Байкала в каждой конкретной реализации на суточный ход анализируемых характеристик наряду с биологическими ритмами накладывается воздействие еще ряда других процессов, которые зависят от продолжительности и интенсивности солнечной инсоляции.

Например, в солнечный день и в условиях, близких к штилевым, поверхностная вода к послеполуденному времени прогревается на 1–3°, что приводит (при условии постоянной концентрации CO₂) к повышению его парциального давления в среднем на 3–5%, в результате этого величина потока углекислого газа из атмосферы снижается. В отсутствие или при слабом ветре какого-либо преимущественного

направления в прибрежных условиях в 10:00–11:00 ч начинается действие бризовой циркуляции (ветер с озера), а затем, после вечерней паузы в 17:00–18:00 ч, направление ветра меняется на противоположное. С увеличением скорости ветра усиливается и волнение, которое обеспечивает хорошее перемешивание воды в прибойной зоне. В свою очередь, перемешивание заметно снижает влияние дневного повышения температуры поверхностного слоя на содержание CO₂ в воде, уменьшает возможный вклад вертикальной миграции биоты и включает в механизм газообмена всех участников фотосинтеза от фитопланктона до фитобентоса в водной толще. Как видим, бризовый режим, имеющий явно выраженный суточный цикл,

также оказывает влияние на процесс газообмена в системе «атмосфера–вода» в литоральной зоне Байкала.

Понятно, что вклад этих и, вероятно, ряда других процессов в разной степени отражается на количественных значениях продолжительности и амплитуд суточного хода парциального давления и потоков CO₂ при осреднении большого массива наших данных.

Заключение

Представленное описание суточного хода потоков и парциального давления CO₂ в поверхностной воде в «солнечных координатах», на наш взгляд, наглядно демонстрирует роль фотосинтетической деятельности фитопланктона в процессе газообмена в системе «атмосфера–вода» в литоральной зоне Южного Байкала в период открытой воды.

Полагаем, что предложенная схема параметризации, которая с определенной точностью может быть использована для восстановления значения этих характеристик для каждого момента времени, может найти применение при проведении оценочных расчетов в моделях цикла углерода. Эти результаты также будут полезны при планировании оптимального режима исследований биологических и химических процессов в оз. Байкал.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 14-05-00277а) и Программы П.2П/IX.135-5 фундаментальных исследований отделения наук о Земле РАН.

1. *Climate Change 2014: Synthesis Report*. Core Writing Team / Eds. R.K. Pachauri, L.A. Meyer. Geneva: IPCC, 2014. 151 p.
2. *Ciais P., Sabine C., Bala G., Bopp L., Brovkin V., Canadell J., Chhabra A., DeFries R., Galloway J., Heimann M., Jones C., Le Quéré C., Myneni R.B., Piao S., Thornton P.* Carbon and other biogeochemical cycles // *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* / Eds. T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P.M. Midgley. Cambridge, NY: Cambridge University Press, 2013. P. 465–570. DOI: 10.1017/SBO9781107415324.015.
3. *Le Quéré C., Moriarty R., Andrew R.M.* Global carbon budget 2014 // *Earth Syst. Sci. Data*. 2015. V. 7. P. 47–85. DOI: 10.5194/essd-7-47-2015.
4. *Quegan S., Beer C., Shvidenko A., McCallum I., Handoh I.C., Peylin P., Rödenbeck C., Lucht W., Nilsson S., Schimmlius C.* Estimating the carbon balance of central Siberia using landscape-ecosystem approach, atmospheric inversion and dynamic global vegetation models // *Glob. Change Biol.* 2011. V. 17. P. 351–365. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2010.02275.x.
5. *Tranvik L.J., Downing J.A., Cotner J.B., Loiselle S.A., Striegl R.G., Ballatore T.J., Dillon P., Finlay K., Fortino K., Knoll L.B., Kortelainen P.L., Kutser T., Larsen S., Laurion I., Leech D.M., McCallister S.L., McKnight D.M., Melack J.M., Overholt E., Porter J.A., Prairie Y., Renwick W.H., Roland F., Sherman B.S., Schindler D.W., Sobek S., Tremblay A., Vanni M.J., Verschoor A.M., von Wachenfeldt E., Weyhenmeyer G.A.* Lakes and res-

- ervoirs as regulators of carbon cycling and climate // *Limnol. Oceanogr.* 2009. V. 54. P. 2298–2314.
6. *Rantakari M., Kortelainen P.* Interannual variation and climatic regulation of the CO₂ emission from large boreal lakes // *Glob. Change Biol.* 2005. V. 11. P. 1368–1380. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2005.00982.x.
7. *Sobek S., Algesten G., Bergstrom A.K., Jansson M., Tranvik L.J.* The catchment and climate regulation of P_{CO₂} in boreal lakes // *Glob. Change Biol.* 2003. V. 9. P. 630–641.
8. *Emerson S.* Gas exchange rates in small Canadian Shield lakes // *Limnol. Oceanogr.* 1975. V. 30. P. 754–761.
9. *Huotari J., Ojala A., Peltomaa E., Pumpanen J., Hari P., Vesala T.* Temporal variations in surface water CO₂ concentration in a boreal humic lake based on high-frequency measurements // *Boreal Environ. Res.* 2009. V. 14, suppl. A. P. 48–60.
10. *Huotari J., Ojala A., Peltomaa E., Nordbo A., Laumainen S., Pumpanen J., Rasilo T., Hari P., Vesala T.* Long-term direct CO₂ flux measurements over a boreal lake: Five years of eddy covariance data // *Geophys. Res. Lett.* 2011. V. 38. L18401. DOI: 10.1029/2011GL048753.
11. *Вотинцев К.К., Мещерякова А.И., Поповская Г.И.* Круговой оборот органического вещества в озере Байкал. Новосибирск: Наука, 1975. 189 с.
12. *Панченко М.В., Домышева В.М., Пестунов Д.А., Сакирко М.В., Заворуев В.В., Новицкий А.Л.* Экспериментальные исследования процессов газообмена CO₂ в системе «атмосфера–водная поверхность» оз. Байкал (постановка эксперимента) // *Оптика атмосф. и океана*. 2007. Т. 20, № 5. С. 448–452.
13. *Грачев М.А., Домышева В.М., Ходжер Т.В., Коровякова И.В., Голобокова Л.П., Погодаева Т.В., Верещин 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.
14. *Поповская Г.И.* Годовые изменения фитопланктона // *Тр. Лимнол. ин-т. СО АН СССР*. 1971. Т. 12(32). С. 158–169.
15. *Панин Г.Н.* Тепло и массообмен между водоемом и атмосферой в естественных условиях. М.: Наука, 1985. 206 с.
16. *Бютнер Э.К.* Планетарный газообмен O₂ и CO₂. Л.: Гидрометеониздат, 1986. 239 с.
17. *Мизандронцев И.Б., Горбунова Л.А., Домышева В.М., Мизандронцева К.Н., Шимараев М.Н.* Газообмен Байкала с атмосферой в осенний период // *Геогр. и природ. ресурсы*. 1998. № 1. С. 61–70.
18. *Мизандронцев И.Б., Домышева В.М., Мизандронцева К.Н.* О короткопериодной динамике состояния карбонатной системы трофогенного слоя Байкала // *Геогр. и природ. ресурсы*. 2003. № 3. С. 78–85.
19. *Мизандронцев И.Б., Домышева В.М., Мизандронцева К.Н.* Суточный ход интенсивности газообмена оз. Байкал с атмосферой // *Водные ресурсы*. 2003. Т. 30, № 3. С. 289–296.
20. *Мизандронцев И.Б., Домышева В.М., Мизандронцева К.Н., Томас К.* О суточной динамике концентраций свободной углекислоты и кислорода в воде Байкала // *Геогр. и природ. ресурсы*. 2002. № 1. С. 73–78.
21. *Мизандронцев И.Б., Домышева В.М., Шимараев М.Н., Голобокова Л.П., Коровякова И.В., Мизандронцева К.Н., Жданов А.А., Гнатовский 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.

22. 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.
23. Заворуев В.В., Панченко М.В., Домышева В.М., Сакирко М.В., Белых О.В., Поповская Г.И. Суточный ход газообмена CO₂ и интенсивности фотосинтеза в поверхностной воде озера Байкал // Докл. РАН. 2007. Т. 413, № 3. С. 403–407.
24. 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.
25. Домышева В.М., Сакирко М.В., Пестунов Д.А., Панченко М.В. Сезонный ход процесса газообмена CO₂ в системе «атмосфера–вода» в литорали Южного Байкала. 1. Гидрологическая весна // Оптика атмосф. и океана. 2010. Т. 23, № 12. С. 1067–1074; Domysheva V.M., Sakirko M.V., Pestunov D.A., Panchenko M.V. Seasonal behavior of the CO₂ gas exchange process in the “atmosphere–water” system of the littoral zone of Southern Baikal. 1. Hydrological spring // Atmos. Ocean Opt. 2011. V. 24, N 3. P. 253–260.
26. Домышева В.М., Сакирко М.В., Пестунов Д.А., Панченко М.В. Сезонный ход процесса газообмена CO₂ в системе «атмосфера–вода» в литорали Южного Байкала. 2. Гидрологическое лето // Оптика атмосф. и океана. 2011. Т. 24, № 9. С. 737–742; Domysheva V.M., Sakirko M.V., Pestunov D.A., Panchenko M.V. Seasonal behavior of the CO₂ gas exchange process in the “atmosphere–water” system of littoral zone of Southern Baikal. 2. Hydrological summer // Atmos. Ocean Opt. 2013. V. 26, N 2. P. 163–169.
27. Домышева В.М., Сакирко М.В., Пестунов Д.А., Панченко Д.А. Сезонный ход процесса газообмена CO₂ в системе «атмосфера–вода» в литорали Южного Байкала. 3. Осень // Оптика атмосф. и океана. 2012. Т. 25, № 9. С. 826–832; Domysheva V.M., Sakirko M.V., Pestunov D.A., Panchenko M.V. Seasonal behavior of the CO₂ gas exchange process in the “atmosphere–water” system of the littoral zone of Southern Baikal. 3. Autumn // Atmos. Ocean Opt. 2013. V. 26, N 3. P. 252–258.
28. 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. V. 4. P. 1339–1345.
29. Одум Ю. Экология. Т. 1–2. М.: Прогресс, 1986. 620 с.
30. *The Daily Growth Cycle of Phytoplankton* / Eds. T. Berman, H.J. Gons, L.R. Mur // Proc. Fifth International Workshop of the Group for Aquatic Primary Productivity (GAP), held at Breukelen, The Netherlands 20–28 April. 1990. V. 76. P. 1–35.
31. Back R.C., Bolgrin D.W., Guselnikova N.E., Bondarenko N.A. Phytoplankton photosynthesis in Southern Lake Baikal // J. Great Lakes Res. 1991. V. 17, N 2. P. 194–202.
32. Бондаренко Н.А., Гусельникова Н.Е., Перова Т.С., Показилова Т.Н. Световые оптимумы для фотосинтеза фитопланктона в Байкале // Круговорот вещества и энергии в водоемах: Тез. докл. V Всесоюз. лимнол. совещ. Листвничное-на-Байкале, 2–4 сент. 1981 г. Иркутск, 1981. Вып. 1. С. 44–45.
33. Бондаренко Н.А., Евстафьев В.К. Солнечные ритмы фитопланктона озера Байкал // II съезд биофизиков России: Тез. докл. 1999. Т. III. С. 864–865.
34. Пестунов Д.А., Панченко М.В., Шамрин А.М. База данных содержания углекислого газа в атмосфере и в воде и потоков углекислого газа в системе «атмосфера–вода» в литорали озера Байкал: Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2015620798. Заяв. 22.06.2015.
35. Матвеев Л.Т. Курс общей метеорологии. Физика атмосферы. 2-е изд. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 752 с.
36. Домышева В.М., Пестунов Д.А., Сакирко М.В., Шамрин А.М., Панченко М.В. К оценке бюджета потоков углекислого газа в системе «атмосфера–вода» в литорали Южного Байкала с применением метода плавающих камер // Оптика атмосф. и океана. 2015. Т. 28, № 6. С. 552–560; Domysheva V.M., Pestunov D.A., Sakirko M.V., Shamrin A.M., Panchenko M.V. Estimation of CO₂ fluxes in the “atmosphere–water” system in the South Lake Baikal littoral with the floating chamber method // Atmos. Ocean Opt. 2015. V. 28, N 6. P. 543–550.
37. Панова Г.П. Спектральная и интегральная прозрачность атмосферы на озере Байкал. Новосибирск: Наука, 1980. 73 с.
38. Мартыанова Г.Н. Радиационно-оптическая характеристика атмосферы на южном побережье озера Байкал // Геогр. и природ. ресурсы. 1992. № 4. С. 68–84.
39. Мартыанова Г.Н. Изменчивость прозрачности атмосферы в котловине озера Байкал и ее влияние на приход радиации в отдельных участках спектра // Геогр. и природ. ресурсы. 1994. № 1. С. 76–82.
40. Заяханов А.С., Жамсуева Г.С., Нагулаев С.А., Цыдыпов В.В., Сакерин С.М., Кабанов Д.М., Тацилин М.А. Результаты исследований аэрозольной оптической толщи атмосферы в Байкальском регионе // Оптика атмосф. и океана. 2010. Т. 23, № 6. С. 466–470.

D.A. Pestunov, A.M. Shamrin, V.M. Domysheva, M.V. Sakirko, M.V. Panchenko. Diurnal behavior of the flux and partial pressure of carbon dioxide in the surface water in “solar time” coordinates (the period of open water in littoral of the South Baikal in 2004–2015).

The long-term series of regular measurements of the carbon dioxide concentration in the surface water and CO₂ fluxes in the littoral zone of Lake Baikal has shown that diurnal variations are observed during all open-water period (May through December), which are related to the processes of photosynthetic activity of plankton. In order to isolate the role of photoperiodic process on the background of the effect of many factors of different nature on the change of the concentration of carbon dioxide in the surface water and its fluxes in the atmosphere–water system, the scheme of diurnal behavior of the concentration and fluxes of CO₂ in the littoral zone of Southern Baikal in 2004–2015 is considered in the coordinates of the sunshine duration. It was calculated on the basis of the theoretically possible sunshine duration (from sunrise until sunset under cloudless sky and open horizon conditions).

The proposed parameterization algorithm for retrieval of the values of these characteristics for any time moment can be used in the models of the carbon dioxide cycle and will be useful for planning the study of biological and chemical processes in Lake Baikal.