

РАДИАЦИЯ И БИОСФЕРА

УДК 551.506.5, 551.4. 022, 556.551

## Оценка первичной биопродукции в воде прибрежной зоны оз. Байкал на основе суточного хода концентрации CO<sub>2</sub> в разные сезоны 2005–2021 гг.

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

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

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

Поступила в редакцию 19.04.2022 г.;

после доработки 4.05.2022 г.;

принята к печати 15.06.2022 г.

Впервые в России проведена оценка валовой и чистой первичной биопродукции на основе многолетних серий комплексных измерений концентраций CO<sub>2</sub> в приземной атмосфере, поверхностной и придонной воде, а также потоков в системе «вода – атмосфера» для наиболее характерных сезонных циклов в жизнедеятельности байкальского планктона. Расчеты проведены по схеме, используемой в diel-методе. Применительно к условиям прибрежной зоны осуществлен анализ методических аспектов, неучет которых может приводить к существенной неопределенности характеристик. Показано, что в этой схеме, располагая только данными измерений концентрации CO<sub>2</sub>, корректно оценить величину чистой первичной продукции не удастся, и для периодов открытой воды ее расчет проведен по среднесуточной величине потока CO<sub>2</sub>. Результаты оценки биопродуктивности для отдельных серий измерений в разные периоды вполне адекватно отражают основные особенности и согласуются с данными многолетних наблюдений.

**Ключевые слова:** озеро Байкал, углекислый газ, поток «вода – атмосфера», суточный ход, парциальное давление, валовая первичная и чистая биопродукция, фитопланктон; lake Baikal, carbon dioxide, water–atmosphere flux, diurnal variation, partial pressure, gross primary and net production, phytoplankton.

### Введение

Современные климатические проблемы обуславливают необходимость изучения газообмена углеродсодержащих газов в системе «атмосфера – подстилающая поверхность» в глобальном, региональном и локальном масштабах [1]. Углекислый газ (CO<sub>2</sub>) – второй по значимости после водяного пара парниковый газ, чей постоянный рост концентрации в атмосфере рассматривается как важный фактор глобального потепления в большинстве климатических сценариев [2, 3]. Кроме того, углекислый газ – основной компонент глобального цикла углерода в системе «атмосфера – подстилающая поверхность», который определяет производство биомассы на суше и в мировом океане [3]. Природные комплексы Сибири являются одним из основных регуляторов кругооборота углекислого газа в Северном полушарии [4], но в настоящее время в прогности-

ческих моделях вклад сибирских пресных водоемов в этот процесс практически не учитывается [5–8]. Озеро Байкал – один из наиболее уникальных объектов мирового значения. Процессы, определяющие функционирование экосистемы озера и ее устойчивость к внешним воздействиям, требуют особого изучения.

Байкал можно рассматривать и как уникальную природную лабораторию для изучения углеродного цикла. С одной стороны, исключительная чистота байкальской воды, сохраняющаяся на протяжении многих лет, позволяет существенно снизить набор контролируемых параметров в процессе изучения газообмена. С другой – сама водная биота озера, которая и обеспечивает сохранность чистой воды, сильно зависит от устойчивости «привычного» цикла углерода в системе «атмосфера – водная поверхность», поскольку в трофической цепи озера основную роль играет процесс поглощения CO<sub>2</sub> в ходе фотосинтеза.

К настоящему времени исследователи располагают большим объемом знаний о Байкальском фитопланктоне (см., например, [9–17]). Но, учитывая современные глобальные и региональные климатические изменения, необходимость детального

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

изучения биопродуктивности озера по-прежнему актуальна, поскольку подробные сведения о всех составляющих углеродного цикла крайне важны для совершенствования прогноза состояния окружающей среды и возможных негативных последствий.

Для исследований метаболизма в водных системах применяются методы, большинство из которых требует предварительной подготовки, организации отбора проб воды и последующих лабораторных измерений (например, [13, 15]). Из-за большой трудоемкости таких методов серьезно ограничена возможность проведения продолжительных круглосуточных наблюдений.

Уместно напомнить, что выдающийся ученый Г.Ю. Верещагин, основатель лимнологических исследований на Байкале, уже в 1930-е гг. выделил важность проблемы изучения именно суточного хода: «*Вопрос о суточном ходе гидрологических элементов раньше разрабатывался, главным образом, по отношению к температуре поверхности воды. Если, однако, и здесь вопрос нельзя считать достаточно выясненным, то это тем более относится к растворенным в воде газам — кислороду и свободной углекислоте. Между тем, нам представляется, что явление суточного хода, главным образом,  $O_2$  и  $CO_2$  необходимо считать очень важным в жизни водоема и имеющим большое лимнологическое значение...*» [9]. Не может не вызывать восхищения тот факт, что, располагая лишь ограниченным набором приборов тех лет, Г.Ю. Верещагин смог провести уникальную серию экспериментов и определить роль фотосинтеза и особенности формирования суточного хода  $O_2$  и  $CO_2$  в воде [9].

На современном этапе развития технологий и создания высокоточных датчиков для непрерывных измерений концентраций  $O_2$  и  $CO_2$  в мировой практике начал применяться новый метод изучения этих процессов *in situ*, в основе которого лежит анализ суточного хода  $O_2$  или  $CO_2$  с высоким временным разрешением, — diel-метод [18, 19].

Наша исследовательская группа располагает статистически обеспеченным набором данных о сезонных и суточных вариациях концентраций  $CO_2$ ,  $O_2$ , биогенных элементов в воде прибрежной зоны Южного Байкала в разные периоды 2005–2021 гг. [20–25]. В настоящей работе определен средний суточный ход для разных периодов и проведена оценка валовой первичной продукции по результатам продолжительных серий измерений концентрации  $CO_2$  в поверхностной и придонной воде с временным разрешением 1 ч.

## Аппаратура и методы

Все измерения были проведены на западном побережье Южной котловины оз. Байкал на территории Научного стационара ЛИН СО РАН вблизи пос. Большие Коты (Байкальская атмосферно-лимнологическая обсерватория, 51°54' с.ш., 105°05' в.д.). Отдавая дань уважения первопроходцам, отметим, что именно здесь летом 1927 г. были выполнены первые наблюдения суточного хода некоторых гидрологических показателей [26].

Поскольку все применяемые нами методы и приборы подробно представлены в предыдущих публикациях [20–22], здесь в сжатой форме опишем устройство, данные которых использованы в настоящей работе.

Газоаналитический комплекс располагался в выносном пункте обсерватории, на пирсе. Величина потока газа в системе «атмосфера — водная поверхность» оценивалась с применением полупогружной проветриваемой камеры, которая размещалась на поверхности воды в 40–45 м от берега. Расчет концентрации  $CO_2$  в поверхностной и придонной воде проводился по данным измерений равновесных давлений углекислого газа в герметичных камерах двух идентичных 3-каскадных эквипраторов при прокачке воды.

Непрерывный отбор проб воды осуществлялся двумя погружными насосами, ниже верхней кромки воды на 25–50 см и на высоте 5 см от дна. Глубина озера в месте отбора придонной воды варьировалась в диапазоне 2–3 м. Концентрация  $CO_2$  измерялась газоанализатором Picarro-G2301-f. В течение каждого часа через систему клапанов по заданной программе в газоанализатор поочередно направлялся воздух из приводной атмосферы, двух эквипраторов и полупогружной камеры. Управление всем газоаналитическим комплексом полностью автоматизировано.

Обратим внимание на весьма важный методический момент. В наших исследованиях для измерения концентрации  $CO_2$  в воде применяются эквипраторы, принцип работы которых заключается в следующем: при непрерывной прокачке воды со скоростью 4 л/мин и ее распылении в герметичном объеме камеры через некоторое время устанавливается равновесное давление газа. Далее расчет концентрации проводится с учетом растворимости газа при температуре прокачиваемой воды; температура непрерывно измеряется непосредственно в каждом приборе. Отбор проб воздуха из эквипратора производится в течение 15 мин в каждом часовом цикле. Первые 5 мин необходимы для проветривания подводных трубок, а в следующие 10 мин осуществляется непрерывная регистрация сигнала. Следовательно, расчет концентрации  $CO_2$  для каждого часа соответствует его среднему значению для объема воды ~ 40 л. Это, на наш взгляд, является важным преимуществом методов определения продуктивности *in situ* в водоеме по сравнению с методами, связанными с отбором проб и измерениями в лабораторных условиях.

## Схема расчета биопродуктивности на основе анализа суточного хода $CO_2$ в воде

В практике исследования продуктивности водных объектов первичная продукция подразделяется на валовую и чистую. Валовая первичная продукция  $G_C$  — это общая масса валового органического углерода, создаваемая в единицу времени при определенной скорости фотосинтеза, включая траты на дыхание ( $R_C$ ). Чистая первичная продукция  $N_C$

— это валовая продукция  $G_C$  за вычетом затрат само-го продуцента на дыхание [15, 18, 19]:

$$N_C = G_C - R_C. \quad (1)$$

Суточный ход  $CO_2$  в воде формируется в результате совокупного воздействия внешних межгодовых, сезонных, гидрометеорологических условий на собственные биологические ритмы продуцирования и деструкции органического вещества [20, 23] и в определенной степени зависит от интенсивности газообмена на границе «вода — атмосфера» [15, 18].

В рамках метода diel для определения продуктивности по скорости изменения концентрации углекислого газа  $CO_2$  [18] предполагается, что, кроме продуцирования и дыхания планктона, всеми иными источниками и стоками растворенного  $CO_2$  можно пренебречь. Стандартная процедура расчета валовой первичной продукции по результатам измерения суточного хода концентраций растворенного углекислого газа  $G_{dC}$  предполагает, что скорость дыхания  $dR_{dC}$  постоянна в течение суток [18], и  $G_{dC}$  равна нулю в ночное время. Дыхания  $dR_{dC\_night}$  рассчитывается по средней скорости роста концентрации  $CO_2$  в темный период суток. За начало темного времени суток принимается время спустя час после вечерних сумерек  $t_{dusk}$ , а окончание — за час до наступления утренних сумерек  $t_{dawn}$ . Такая процедура предполагает, что расчет проведен для действительно темного времени, когда фотосинтетическая активность планктона отсутствует, т.е.  $G_{dC} = 0$ . Скорость дыхания  $dR_{dC\_night}$  относится ко всему периоду до следующего заката.

### Оценка продуктивности по данным измерений суточного хода $CO_2$ в поверхностной и придонной воде прибрежной зоны в разные периоды

Многолетняя серия измерений показала, что суточный ход концентрации  $CO_2$  в воде литоральной

зоны Байкала проявляется с февраля по декабрь на фоне межгодовой и сезонной изменчивости [20–24] (рис. 1). Представленные на рис. 1 средние значения и среднеквадратичные отклонения концентраций  $CO_2$  в поверхностной и придонной воде в массиве данных измерений с 2005 по 2021 гг. для каждого месяца статистически обеспечены поразному. В частности, майский цикл был осуществлен лишь однажды, в 2011 г.; измерения в придонной воде были начаты в августе 2013 г.

Во всех суточных циклах с восходом солнца наблюдается снижение концентрации  $CO_2$  в воде, т.е. потребление  $CO_2$  при фотосинтезе превалирует над его поступлением в воду, которое прекращается в послеполуденное время (рис. 1). С этого момента до следующего восхода идет увеличение содержания  $CO_2$ , обусловленное дыханием биоты и разложением органического вещества. И даже в конце периода открытой воды (декабрь), для которого характерен сильный поток  $CO_2$  из воды в атмосферу, суточный ход выражен вполне отчетливо. В период ледового покрытия суточный (подледный) ход концентрации  $CO_2$  в поверхностной воде проявляется относительно слабо, а в придонном слое во всех реализациях суточный ритм  $CO_2$  хорошо выражен.

На первом этапе анализа были проведены расчеты во всех сериях измерений строго по схеме метода diel для каждого дня. Практически в каждой конкретной реализации в отдельные моменты наблюдался сбой суточного хода из-за внешних факторов, не связанных с суточным ритмом, например порывы ветра, благодаря которым происходило кратковременное перемешивание, нагоны воды с пелагиали, выпадение осадков, изменение освещенности зоны отбора воды в облачные дни и т.п. Такие сбои суточного хода снижают точность оценки  $R_{dC}$  и  $G_{dC}$ . В прибрежных условиях при отсутствии ветра или слабом ветре какого-либо преимущественного направления после утреннего затишья начинает развиваться бризовая циркуляция (ветер с озера), а затем, после вечерней паузы, направление ветра

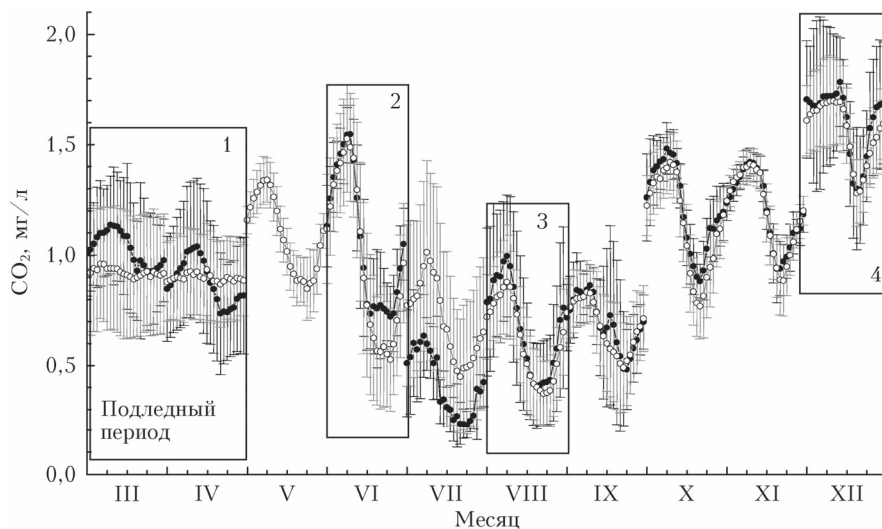


Рис. 1. Средний суточный ход концентраций  $CO_2$  в поверхностной ( $\circ$ ) и придонной ( $\bullet$ ) воде прибрежной зоны в 2005–2021 гг.; выделены наиболее характерные периоды жизнедеятельности байкальского фитопланктона [13]

меняется на противоположное. Понятно, что с увеличением скорости ветра усиливается и волнение водной поверхности, которое обеспечивает перемешивание воды в прибойной зоне. Бризовый ветровой режим является неперменным атрибутом суточного хода, хотя напрямую не связан с биопродуктивностью. Однако по данным измерений в открытой воде он влияет на значения  $R_{dc}$  и  $G_{dc}$ . Это обстоятельство является одним из важных достоинств метода diel, поскольку серьезным недостатком скляночного метода многие специалисты считают отсутствие естественного перемешивания воды в склянках, происходящего в водоеме [15].

**Методические аспекты расчета продуктивности на основе суточного хода концентрации  $CO_2$  в воде прибрежной зоны.** В годовом цикле жизнедеятельности байкальского фитопланктона специалисты выделяют несколько характерных этапов: 1) начало и расцвет весенней вегетации (конец марта – первые числа апреля); 2) фаза завершения весеннего развития (июнь); 3) пик летней вегетации (конец августа – сентябрь); 4) завершение осеннего развития (декабрь) [13]. Именно в эти периоды нами проведено наибольшее количество измерений (см. рис. 1).

Следует обратить внимание на то, что в прибрежной зоне ярко выражена сезонность суточного хода амплитуды и направления потока углекислого газа. Именно это обстоятельство определяет необходимость обсуждения ряда методических моментов, которые не рассматриваются в стандартной схеме метода diel, но учет которых будет полезен для корректной оценки  $R_C$  и  $G_C$ .

Принимая во внимание значительную межсуточную изменчивость углекислого газа в системе «вода – атмосфера» в прибрежной зоне, обсудим основные особенности оценки продуктивности на основе среднего суточного хода концентраций  $CO_2$ . Для рассмотрения выберем данные из различных серий непрерывных измерений продолжительностью 5–10 сут, в течение которых в прибрежной зоне отсутствовали какие-либо экстремальные явления (нагон воды с пелагиали, шторм, продолжительные осадки и т.п.).

**Март–апрель 2014. Подледный период.** Наблюдения были организованы следующим образом. Зона водоотбора располагалась на удалении 40–50 м от берега, где была сделана отдельная лунка отбора проб воды для анализа содержания растворенного кислорода и биогенных элементов в поверхностном слое. Пробы объемом 5–10 л брались каждые 3 ч. В непосредственной близости устанавливались насосы для непрерывной подачи воды в эквиваленты с поверхностного и придонного горизонтов. Здесь же на высоте 1,5 м над поверхностью льда находилось заборное устройство для измерения концентрации атмосферного  $CO_2$ .

Отметим, что во время подледных измерений отсутствует ряд процессов, с влиянием которых необходимо считаться в период открытой воды (газообмен с атмосферой, бризовая циркуляция, развитое волнение и т.п.), что позволяет провести расчеты по стандартной процедуре.

На рис. 2 приведен средний суточный ход содержания  $CO_2$  в поверхностной и придонной воде в конце марта – начале апреля 2014 г. Представленные данные вполне отражают характерные особенности всех серий регулярных наблюдений (2014–2020 гг.) в подледный период: суточный ход в поверхностной воде проявляется очень слабо, но значительно выражен в придонной области.

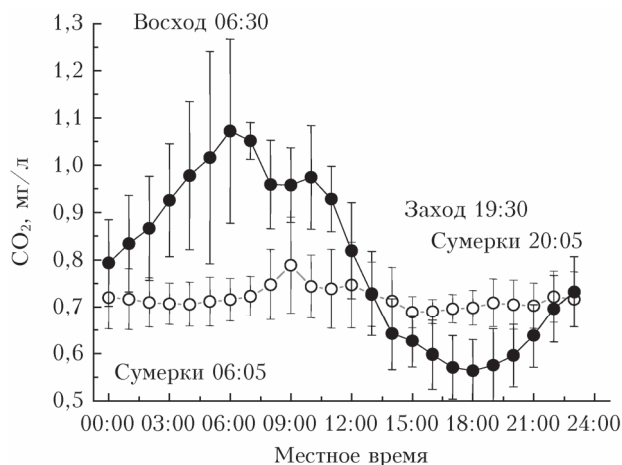


Рис. 2. Средний суточный ход концентраций углекислого газа в поверхностной (○) и придонной (●) воде прибрежной зоны с 29 марта по 4 апреля 2014 г.

Различия амплитуд суточного хода концентрации  $CO_2$  между водой у нижней кромки льда и в придонной области определяются свойствами развития байкальского планктона в этот период [27], когда по мере увеличения биомассы водорослей в капиллярах льда их колонии «протаивают» лед и затем оседают на дно. Отчетливо выраженный суточный ход концентрации  $CO_2$  в придонном слое (рис. 2) демонстрирует, что поступающего солнечного излучения вполне достаточно для их активной фотосинтетической деятельности.

На рис. 2 отмечено время начала вечерних и утренних сумерек, восхода и захода солнца для даты, приходящейся на середину измерительного цикла. Видно, что с 21:00 до 05:00 концентрация  $CO_2$  в воде растет от 0,60 до 1,02 мг · л<sup>-1</sup>. Для этого промежутка времени была оценена скорость дыхания:  $dR_{dc\_night} = 0,047$  мг · л<sup>-1</sup> · ч<sup>-1</sup> (здесь и далее расчет проводится по средним значениям концентраций  $CO_2$  для каждого часа с учетом среднеквадратичного отклонения). В придонной воде с 06:00 до 18:00 измеренная концентрация  $CO_2$  снижается от 1,07 до 0,56 мг · л<sup>-1</sup> ( $\Delta CO_2^{6-18} = 0,51$  мг · л<sup>-1</sup>). Но при скорости дыхания 0,047 мг · л<sup>-1</sup> · ч<sup>-1</sup> за этот 12-часовой период в воду должно было выделиться 0,56 мг · л<sup>-1</sup>  $CO_2$ . Следовательно, с 06:00 до 18:00 на фотосинтез суммарно было израсходовано 1,07 мг · л<sup>-1</sup> углекислого газа ( $G_{dc}^{6-18}$ ). То есть в этом цикле величина суточной валовой первичной продукции в поверхностной воде  $G_d = 1,1$  мг · л<sup>-1</sup>, или в пересчете на углерод  $G_{dc} = 0,3$  мг · л<sup>-1</sup>.



На основе ранее проведенного анализа данных различных серий измерений мы выяснили, что величина валовой первичной продукции  $G_C$ , рассчитанная по изменению концентрации  $CO_2$  в темный и светлый периоды, определяется вполне достоверно (неопределенность величины не превышает 30%). Но попытка корректно оценить величину чистой первичной продукции  $N_C$  оказывается неудачной, ее значение оказывается близко к нулю, что, по-видимому, в первую очередь обусловлено большой неопределенностью diel-метода, в котором принято допущение о том, что вычисленное в предыдущую ночь значение скорости дыхания  $R$  (дыхание плюс деструкция органического вещества) при определении  $G_C$  распространяется на последующий светлый период.

**Июнь 2014.** На рис. 3, а представлен средний суточный ход концентраций  $CO_2$  в поверхностной и придонной воде по данным измерений в июне 2014 г.

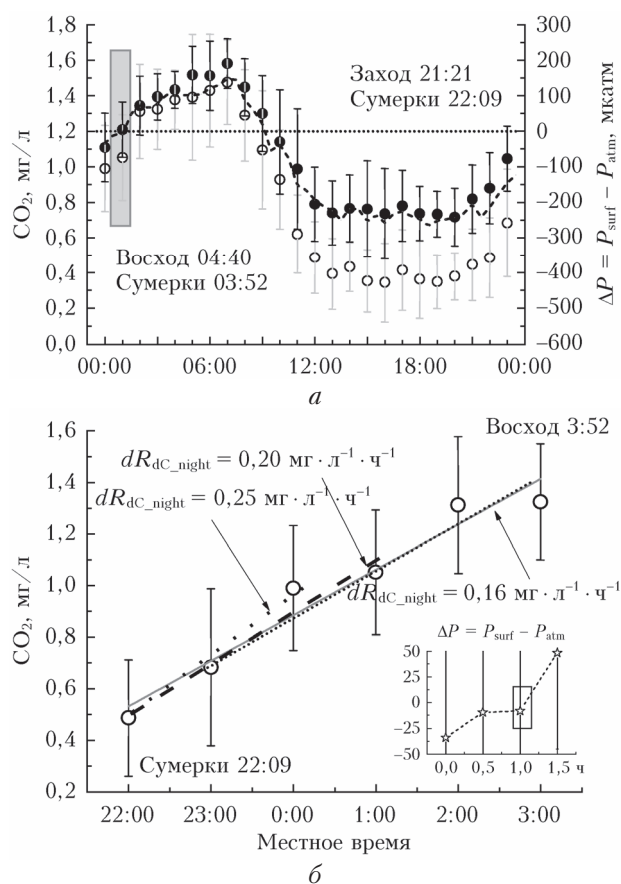


Рис. 3. Средний суточный ход концентраций  $CO_2$  в поверхностной (○) и придонной (●) воде прибрежной зоны с 11 по 19 июня 2014 г. (а): штриховая линия — суточный ход разности парциальных давлений  $CO_2$  в поверхностной воде и атмосфере; прямоугольник — время изменения знака разности парциальных давлений. Пример расчета скорости дыхания в поверхностной воде в разные промежутки ночного времени (б); на врезке — суточный ход разности парциальных давлений  $CO_2$  в поверхностной воде и атмосфере с 22:00 до 03:00

**Поверхность.** Сначала рассмотрим особенности, возникающие при определении скорости дыхания  $dR_{dC} = CO_2/\Delta t$  в поверхностной воде в этом цикле измерений. Как следует из рис. 3, с 19:00 и до 07:00 концентрация  $CO_2$  в воде растет от 0,35 до 1,48 мг·л<sup>-1</sup>. Напомним, что в стандартной процедуре метода diel скорость дыхания  $R_{d\_night}$  определяется как средняя скорость прироста концентрации  $CO_2$  в промежуток времени спустя один час после окончания вечерних сумерек и за один час до наступления утренних сумерек (23:00 и 03:00, соответственно, в данный период), и в этом случае  $dR_{dC\_night} = 0,16$  мг·л<sup>-1</sup>·ч<sup>-1</sup>. Это значение практически не зависит от выбора начала отсчета  $t$ : от времени захода солнца  $t_{dusk} = 22:00$  или от  $t_{dusk} + 1 = 23:00$  (рис. 3, б). Этот факт ожидаем, поскольку на длинной серии измерений флуоресцентных характеристик нами было показано, что в послеполуденное время во все сезоны года к 16:00–18:00 наблюдается минимум коэффициента фотосинтетической активности планктона, и в рассматриваемом массиве данных (рис. 3, а) минимум концентрации  $CO_2$  в поверхностной воде 0,35 мг·л<sup>-1</sup> достигается уже к 19:00.

После 01:00 парциальное давление  $CO_2$  в поверхностной воде становится больше давления в приводной атмосфере (см. рис. 3, а и врезку на рис. 3, б), следовательно, идет выход  $CO_2$  с поверхности в атмосферу. Чтобы определить, как этот процесс влияет на оценку скорости дыхания ( $\Delta CO_2/\Delta t$ ) для следующих отрезков времени: 1) с 23:00 до 03:00,  $dR_{dC\_night} = 0,16$  мг·л<sup>-1</sup>·ч<sup>-1</sup>; 2) с 23:00 до 01:00,  $dR_{dC\_night} = 0,20$  мг·л<sup>-1</sup>·ч<sup>-1</sup>; 3) с 22:00 до 00:00,  $dR_{dC\_night} = 0,25$  мг·л<sup>-1</sup>·ч<sup>-1</sup>. Видим, что по стандартной методике обработки данных ( $t_{dawn} - 1$  ч = 03:00), не учитывающей процесс выхода  $CO_2$  в атмосферу, оцениваемое значение  $dR_{dC\_night}$  на 36% ниже, чем  $dR_{dC\_night} = 0,25$  мг·л<sup>-1</sup>·ч<sup>-1</sup>, которая определена в период между 22:00 и 24:00. Более того, даже при расчете за период с 23:00 до 01:00 (измеренная разность парциальных давлений близка к 0) скорость дыхания меньше максимальной на 20%. Отсюда, по-видимому, целесообразно для дальнейших расчетов использовать  $R_d^{22-24} = 0,25$  мг·л<sup>-1</sup>·ч<sup>-1</sup>.

Далее оценим валовую первичную продукцию (рис. 3, а). С 07:00 до 13:00 концентрация  $CO_2$  в поверхностной воде снижается от 1,48 до 0,39 мг·л<sup>-1</sup> ( $\Delta CO_2^{7-13} = 1,09$  мг·л<sup>-1</sup>). Но при скорости дыхания 0,25 мг·л<sup>-1</sup>·ч<sup>-1</sup> за этот 6-часовой период в воду должно было выделиться 1,50 мг·л<sup>-1</sup> углекислого газа. Следовательно, с 07:00 до 13:00 на фотосинтез суммарно было израсходовано 2,59 мг·л<sup>-1</sup> углекислого газа ( $G^{7-13}$ ). С 13:00 до 22:00 скорость изменения концентрации газа в воде практически нулевая, а это значит, что потребление  $CO_2$  планктоном только компенсирует его поступление в воду в процессе дыхания, и отсюда  $G^{13-22} = 0,25$  мг·л<sup>-1</sup>·ч<sup>-1</sup> · 9 ч = 2,25 мг·л<sup>-1</sup>.

Следовательно, в рассматриваемый период  $G_d = G^{7-13} + G^{13-22} = 4,84 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$ , или, в пересчете на углерод,  $G_{dc} = 1,3 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$ .

**Придонная область.** Как следует из рис. 3, *a* в придонном слое максимальная концентрация  $\text{CO}_2$  ( $1,58 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$ ) регистрируется в 07:00, а минимальная ( $0,70 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$ ) — в 16:00. С 16:00 до 20:00 содержание  $\text{CO}_2$  практически постоянное —  $0,70$ – $0,74 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$ , а потом начинается его рост. В отличие от поверхностной воды, при расчете  $dR_{dc\_night}$  по стандартной схеме, с  $t_{dusk} + 1 \text{ ч} = 23:00$  до  $t_{dawn} - 1 \text{ ч} = 03:00$ , начало выхода газа в атмосферу около 01:00 не сказывается на величине дыхания  $dR_{dc\_night} = 0,09 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1} \cdot \text{ч}^{-1}$ , но уже к 04:00 начинает ощущаться небольшое снижение рассчитанного значения ( $dR_{dc\_night} = 0,08 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1} \cdot \text{ч}^{-1}$ ).

В придонной воде с 07:00 до 12:00 концентрация  $\text{CO}_2$  снижается от  $1,58$  до  $0,74 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$  со скоростью  $0,16 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1} \cdot \text{ч}^{-1}$  ( $\Delta\text{CO}_2^{7-12} = 0,84 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$ ). При скорости дыхания  $0,09 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1} \cdot \text{ч}^{-1}$  за этот 5-часовой период в воду поступило  $0,45 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$  углекислого газа. Следовательно, с 07:00 до 12:00 на фотосинтез суммарно было израсходовано  $G^{7-12} = 0,84 + 0,45 = 1,29 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$  углекислого газа. Далее, с 12:00 до 22:00, концентрация газа в воде не меняется и потребление  $\text{CO}_2$  планктоном только компенсирует его поступление в воду в процессе дыхания. Отсюда  $G^{12-22} = 0,09 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1} \cdot \text{ч}^{-1} \cdot 10 \text{ ч} = 0,90 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$ . Следовательно, с 07:00 до 12:00 величина суточной валовой первичной продукции  $G_d = G^{7-12} + G^{12-22} = 1,29 + 0,90 = 2,19 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$ , или, в пересчете на углерод,  $G_{dc} = 0,6 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$ .

Здесь, как и в поверхностной воде, достоверно определить  $N_C$  не удается, и она оказывается близкой к нулю.

Поскольку в проведенных расчетах сток  $\text{CO}_2$  из атмосферы на водную поверхность не учитывался, полагаем, что ориентировочно  $N_C$  можно оценить по величине потока  $\text{CO}_2$ . В практике изучения биопродуктивности водоемов зачастую рассматривается величина суммарного эффекта фотосинтеза под единицей площади поверхности озера в сутки [11]. По данным измерений в июне 2014 г., среднее значение суммарного потока  $\text{CO}_2$   $F = -72 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$ , и в пересчете на углерод  $N_C = \sim 20 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$ .

**Август 2013 г. Поверхность.** Как и в предыдущем разделе, сначала рассмотрим особенности расчета скорости дыхания  $dR_{dc\_night} = \text{CO}_2/\Delta t$  в поверхностной воде (рис. 4).

С 18:00 и до 07:00 средняя концентрация  $\text{CO}_2$  в воде растет от  $0,37$  до  $0,88 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$ . Но уже около 03:00 парциальное давление  $\text{CO}_2$  в воде начинает превышать давление в атмосфере, т.е.  $\Delta P > 0$ , следовательно, часть  $\text{CO}_2$  с поверхности начинает уходить в атмосферу и скорость накопления  $\text{CO}_2$  в поверхностной воде снижается. Отсюда следует, что и в этом массиве данных применение стандартной процедуры также приведет к заниженным значениям  $R_d$ . Учитывая это, расчет скорости был проведен с 20:00 до 02:00:  $R_d^{20-2} = 0,057 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1} \cdot \text{ч}^{-1}$ .

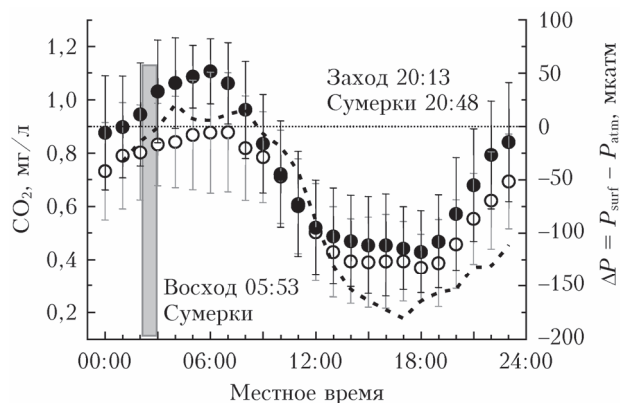


Рис. 4. Средний суточный ход концентраций  $\text{CO}_2$  в поверхностной ( $\circ$ ) и придонной ( $\bullet$ ) воде прибрежной зоны с 17 по 27 августа 2013 г.: штриховая линия — суточный ход разности парциальных давлений  $\text{CO}_2$  в поверхностной воде и атмосфере; прямоугольник — время изменения знака разности парциальных давлений

В поверхностной воде с 07:00 до 14:00 концентрация  $\text{CO}_2$  снижается от  $0,88$  до  $0,39 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$  ( $\Delta\text{CO}_2^{7-14} = 0,49 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$ ). При скорости дыхания  $0,057 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1} \cdot \text{ч}^{-1}$  за 7-часовой период в воду дополнительно поступило  $0,40 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$  углекислого газа. Значит, с 07:00 до 14:00 суммарно было израсходовано  $\sim 0,89 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$  углекислого газа ( $G^{7-14}$ ). С 14:00 до 19:00 концентрация  $\text{CO}_2$  в воде почти постоянная, и по аналогии с предыдущим разделом учтем только компенсированное при фотосинтезе суммарное дыхание  $G^{14-19} = 0,057 \text{ мг} \cdot 5 = 0,28 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$ . Итого в этом августовском цикле величина суточной валовой первичной продукции в поверхностной воде с 07:00 до 19:00  $G_d = G^{7-14} + G^{14-19} = 0,89 + 0,28 = 1,17 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$ , или, в пересчете на углерод,  $G_C = 0,3 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$ .

**Придонная область.** В рассматриваемом примере слабый поток  $\text{CO}_2$  в атмосферу в утренние часы ( $\Delta P > 0$ , рис. 4) практически не сказывается на динамике роста его концентрации в придонной воде в темный период суток. Поэтому можно использовать стандартную методику оценки скорости дыхания  $dR_{dc\_night} = R^{21-4} = 0,043 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1} \cdot \text{ч}^{-1}$ . В придонной воде с 06:00 до 12:00 концентрация  $\text{CO}_2$  снижается и  $\Delta\text{CO}_2^{6-12} = 0,61 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$ . С 12:00 до 18:00  $\Delta\text{CO}_2^{12-18} = 0,08 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$ . За период с 06:00 до 18:00 при скорости дыхания  $0,043 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1} \cdot \text{ч}^{-1}$  в воду дополнительно поступило  $0,52 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$  углекислого газа. Таким образом,  $G_{dc} = G^{6-12} + G^{12-18} + R^{6-18} = 0,61 + 0,08 + 0,52 = 1,21 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$ .

Итого в этом августовском цикле суточная валовая первичная продукция  $\text{CO}_2$  в придонной воде  $G_{dc} = 1,21 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$ , или, в пересчете на углерод,  $G_C = 0,3 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$ .

Обратим внимание, что в рассматриваемом примере в поверхностной и придонной воде величины суточной валовой первичной продукции одинаковы. В придонной и в поверхностной воде достоверно оценить  $N_{dc}$  не удастся, и она оказывается близкой к нулю. Как и в предыдущем примере, оценка  $N_{dc}$  сделана по среднесуточной величине потока  $\text{CO}_2$

$F_{dc} = -93 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$ , и в пересчете на углерод,  $N_C \approx 25 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$ .

**Декабрь 2015 г. Поверхность.** В декабрьских циклах давление  $\text{CO}_2$  в воде всегда выше атмосферного, однако суточный ход концентрации  $\text{CO}_2$  в толще воды выражен отчетливо (рис. 5).

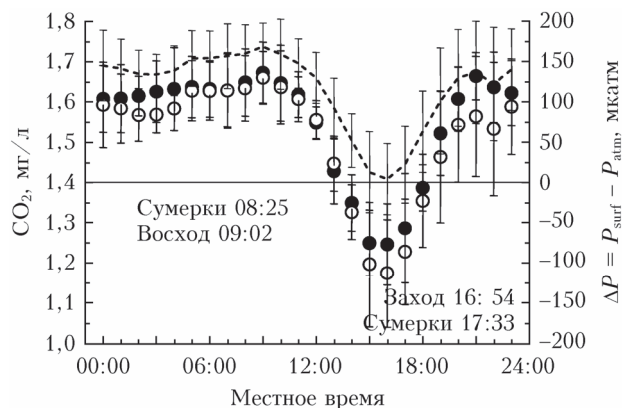


Рис. 5. Средний суточный ход концентраций  $\text{CO}_2$  в поверхностной (○) и придонной (●) воде прибрежной зоны в декабре 2015 г.; штриховая линия – суточный ход разности парциальных давлений  $\text{CO}_2$  в поверхностной воде и атмосфере

В этом цикле скорость дыхания в поверхностной воде  $-0,086 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1} \cdot \text{ч}^{-1}$ , величина суточной валовой первичной продукции  $G_d = 1,09 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1} \cdot \text{сут}^{-1}$ , в пересчете на углерод  $G_{dc} = 0,3 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1} \cdot \text{сут}^{-1}$ . Суммарная суточная величина дыхания  $R_d = 2,06 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$ ,  $G_C = 0,6 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$ .

**В придонной области** скорость дыхания  $0,091 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1} \cdot \text{ч}^{-1}$ ,  $G_{dc} = 1,06 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$ ,  $G_C = 0,3 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1} \cdot \text{сут}^{-1}$ . Суммарная суточная величина дыхания  $R_d = 2,18 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$ ,  $G_C = 0,6 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$ .

По данным измерений в этом массиве данных наблюдался выход  $\text{CO}_2$  в атмосферу и средняя величина потока  $F = +280 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$ , что в пересчете на углерод составляет  $77 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$ . Таким образом, в декабре деструкция намного превышает вклад слабого процесса продуцирования органического углерода.

## Результаты и обсуждение

Результаты оценки биопродуктивности, представленные в работе только для отдельных серий измерений в периоды наиболее характерных сезонных циклов жизнедеятельности байкальского планктона, в целом вполне адекватно отражают основные особенности и согласуются с данными наших многолетних наблюдений (рис. 6).

На рис. 6, а представлена статистика распределения значений валовой первичной продукции в циклах измерений в июне 2007–2009, 2014, 2015 гг.; августе 2005, 2008, 2010–2014, 2021 гг.; декабре 2009–2012, 2014–2016, 2019 гг. Видим, что в массиве июньских измерений в поверхностной воде наблюдается самая высокая валовая продуктивность байкальского фитопланктона (июнь –

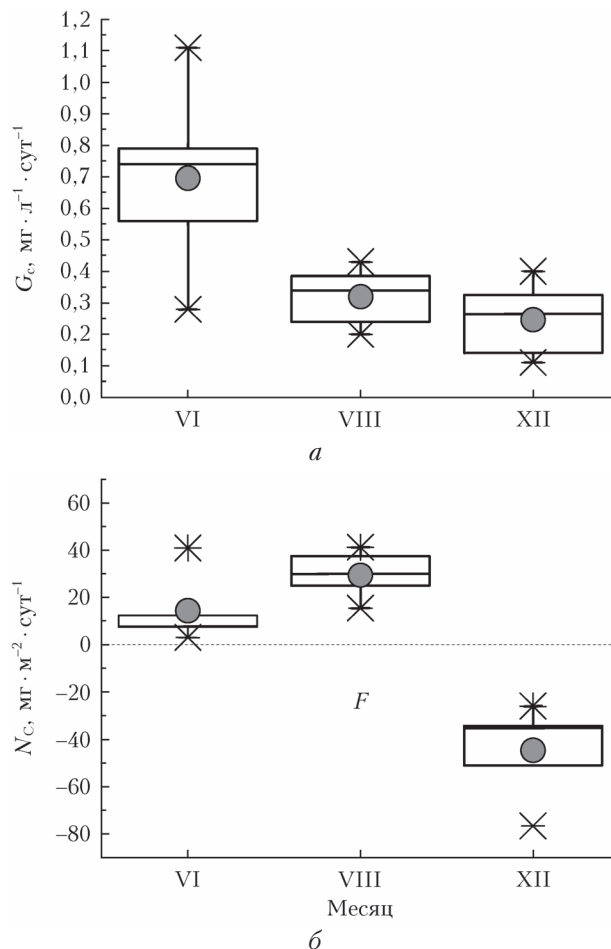


Рис. 6. Распределение значений (минимальное, максимальное, среднее, медиана) валовой первичной продукции  $G_C$  (а);  $N_C$ , определенное по величине потока  $F$  в разных измерительных циклах в период открытой воды (б)

$G_C = 0,7 \pm 0,3 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1} \cdot \text{сут}^{-1}$ , август –  $G_C = 0,3 \pm 0,1 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1} \cdot \text{сут}^{-1}$ , декабрь –  $G_C = 0,25 \pm 0,1 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1} \cdot \text{сут}^{-1}$ ). Но оценка чистой продукции  $N_C$  по среднему суточному потоку (рис. 6, б), показывает, что в августе  $N_C = 29 \pm 8,6 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1} \cdot \text{сут}^{-1}$  заметно превышает июньские значения ( $N_C = 14 \pm 15 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1} \cdot \text{сут}^{-1}$ ). Отсюда можно сделать вывод, что в июне наряду с высокой валовой продуктивностью идет интенсивное разложение органического вещества в прибрежной зоне, которое и определяет ночной выход углекислого газа в атмосферу (см. рис. 3 и 4). В декабре на фоне преобладающего процесса деструкции (поток в атмосферу  $F_{dc} = -45 \pm 20 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1} \cdot \text{сут}^{-1}$ , рис. 6, б)  $G_C = 0,25 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1} \cdot \text{сут}^{-1}$ .

## Заключение

Концентрации  $\text{CO}_2$ , измеренные с хорошим временным разрешением в прибрежной зоне, позволяют вполне достоверно оценить валовую первичную продукцию с применением стандартной схемы только в тех случаях (декабрь и подледный период), когда в течение суток не меняется знак потока



или разности парциальных давлений между водой и атмосферой.

Неучет суточного хода потока  $\text{CO}_2$  (дневной сток и ночной выход в атмосферу) при использовании этой схемы может существенно (до 30–40%) занижать значение скорости дыхания  $R$  и вносить заметную ошибку в значение  $G_C$ .

Показано, что на основании только измерений концентрации  $\text{CO}_2$  корректно оценить величину чистой первичной продукции  $N_C$  в большинстве реализаций не удается. По-видимому, в первую очередь это обусловлено недостатком метода, в котором принято допущение о том, что вычисленное в предыдущую ночь значение скорости дыхания  $R$  при определении  $G$  распространяется на светлый период. В то же время, располагая данными измерений величины стока  $\text{CO}_2$  из атмосферы на водную поверхность, удается оценить величину чистой первичной продукции  $N_C$  в измерительных сериях в июне и августе.

**Благодарности.** Авторы выражают признательность В.П. Шмаргунову за помощь при создании аппаратуры. В измерениях использовался весь приборно-методический потенциал Байкальской атмосферно-лимнологической обсерватории и газоаналитический комплекс, развиваемый при поддержке ЦКП «Атмосфера» ИОА СО РАН.

**Финансирование.** Работа выполнена в рамках государственных заданий ИОА и ЛИИ СО РАН (проекты № 121031500342-0 и № 0279-2021-0014).

## Список литературы

1. *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Core Writing Team, R.K. Pachauri, L.A. Meyer (eds.). Geneva, Switzerland: 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. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P.M. Midgley (eds.). Cambridge, United Kingdom; New York, USA: Cambridge University Press, 2013. P. 465–570. DOI: 10.1017/CBO9781107415324.015.*
3. *Елизеев А.В. Оценка изменений характеристик климата и углеродного цикла в XXI веке с учетом неопределенности значений параметров наземной биоты // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2011. Т. 47, № 2. С. 147–170.*
4. *Friedlingstein P., O'Sullivan M., Jones M.W., Andrew R.M., Hauck J., Olsen A., Peters G.P., Peters W., Pongratz J., Sitch S., Le Quéré C., Canadell J.G., Ciais P., Jackson R.B., Alin S., Aragão L.E.O.C., Arneeth A., Arora V., Bates N.R., Becker M., Benoit-Cattin A., Bittig H.C., Bopp L., Bultan S., Chandra N., Chevallier F., Chini L.P., Evans W., Florentie L., Forster P.M., Gasser T., Gehlen M., Gilfillan D., Gkritzalis T., Gregor L., Gruber N., Harris I., Hartung K., Haverd V., Hough-*
5. *ton R.A., Ilyina T., Jain A.K., Joetzer E., Kadono K., Kato E., Kitidis V., Korsbakken J.I., Landschützer P., Lefuvre N., Lenton A., Lienert S., Liu Z., Lombardozi D., Marland G., Metz N., Munro D.R., Nabel J.E.M.S., Nakaoka S.-I., Niwa Y., O'Brien K., Ono T., Palmer P.I., Pierrot D., Poulter B., Resplandy L., Robertson E., Rödenbeck C., Schwinger J., Séférian I., Skjelvan A.J.P., Smith A.J., Sutton T., Tanhua P.P., Tans H., Tian B., Tilbrook G., van der Werf R., Vuichard N., Walker A.P., Wanninkhof R., Watson A.J., Willis D., Wiltshire A.J., Yuan W., Yue X., Zaehle S. Global carbon budget // Earth Syst. Sci. Data. 2014. V. 7. P. 47–85. DOI: 10.5194/essd-7-47-2015.*
6. *Quegan S., Beer C., Shvidenko A., McCallum I., Handoh I.C., Peylin P., Rödenbeck C., Lucht W., Nilsson S., Schmullius 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.*
7. *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 reservoirs as regulators of carbon cycling and climate // Limnol. Oceanogr. 2009. V. 54. P. 2298–2314.*
8. *Kim J., Kim H.M., Cho C.-H., Boo K.-O., Jacobson A.R., Sasakawa M., Machida T., Arshinov M., Fedoseev N. Impact of Siberian observations on the optimization of surface  $\text{CO}_2$  flux // Atmos. Chem. Phys. 2017. V. 17, N 4. P. 2881–2899.*
9. *Sobek S., Algesten G., Bergstrom A.K., Jansson M., Tranvik L.J. The catchment and climate regulation of  $P_{\text{CO}_2}$  in boreal lakes // Glob. Change Biol. 2003. N 9. P. 630–641.*
10. *Вережанин Г.Ю. Суточный ход некоторых гидрологических элементов на Байкале и его лимнологическое значение // Тр. Байкальской лимнол. станции. Иркутск, 1932. Т. 2. С. 107–200.*
11. *Поповская Г.И. Годовые изменения фитопланктона // Тр. АН СССР. СО. Лимнология придельтовых пространств Байкала. Лимнол. ин-т. 1971. Т. 12. С. 158–169.*
12. *Вотинцев К.К., Мещерякова А.И., Поповская Г.И. Круговорот органического вещества в озере Байкал. Новосибирск: Наука, 1975. 189 с.*
13. *Back R.C., Bolgrin D.W., Gusevnikova N.E., Bondarenko N.A. Phytoplankton photosynthesis in Southern Lake Baikal // J. Great Lakes Res. 1991. V. 17, N 2. P. 194–202.*
14. *Бондаренко Н.А., Гусельникова Н.Е. Продукция фитопланктона Южного Байкала // Изв. СО АН СССР. 1989. Вып. 1. С. 77–80.*
15. *Помазкина Г.В., Белых О.И., Домышева В.М., Сакирко М.В., Гнатовский Р.Ю. Структура и динамика фитопланктона в Южном Байкале (Россия) // Альгология. 2010. Т. 20, № 1. С. 56–72.*
16. *Винберг Г.Г. Первичная продукция водоемов. Минск, 1960. 330 с.*
17. *Бондаренко Н.А., Логачева Н.Ф. Структурные изменения в фитопланктоне прибрежной зоны озера Байкал // Гидробиологический журн. 2016. Т. 52, № 6. С. 17–26.*



17. Bondarenko N.A., Vorobyova S.S., Zhuchenko N.A., Golobokova L.P. Current state of phytoplankton in the littoral area of Lake Baikal, spring 2017 // *J. Great Lakes Res.* 2020. V. 46, N 1. P. 17–28.
18. Peeters F., Atamanchuk D., Tengberg A., Encinas-Fernández J., Hofmann H. Lake metabolism: Comparison of lake metabolic rates estimated from a diel CO<sub>2</sub>- and the common diel O<sub>2</sub>-technique // *PLOS ONE.* V. 11, iss. 12. DOI: 10.1371/journal.pone.0168393.
19. Schindler D.W., Fee E. Diurnal variation of dissolved inorganic carbon and its use in estimating primary production and CO<sub>2</sub> invasion in Lake 227 // *J. Fish Res. Board Canada.* 1973. V. 30. P. 1501–1510.
20. 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.
21. Domysheva V., Panchenko M., Pestunov D., Sakirko M. Air-water carbon dioxide exchange in the littoral zone of Lake Baikal (ice-free period) // *Int. J. Geosci.* 2013. V. 4. P. 1339–1345. DOI: 10.4236/ijg.2013.410130.
22. Домышева В.М., Пестунов Д.А., Сакирко М.В., Шамрин А.М., Панченко М.В. Углекислый газ, кислород и биогенные элементы в подледной воде литорали Южного Байкала (2004–2016 гг.) // *Оптика атмосф. и океана.* 2016. Т. 29, № 12. С. 1073–1079; Domysheva V.M., Pestunov D.A., Sakirko M.V., Shamrin A.M., Panchenko M.V. Carbon dioxide, oxygen, and biogenic elements in subglacial water in the littoral zone of southern Baikal (2004–2016) // *Atmos. Ocean. Opt.* 2017. V. 30, N 3. P. 277–283.
23. Пестунов Д.А., Шамрин А.М., Домышева В.М., Сакирко М.В., Панченко М.В. 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.) // *Оптика атмосф. и океана.* 2017. Т. 30, № 2. С. 160–169; Pestunov D.A., Shamrin A.M., Domysheva V.M., Sakirko M.V., Panchenko M.V. 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 the south Baikal littoral in 2004–2015) // *Atmos. Ocean. Opt.* 2017. V. 30, N 4. P. 372–381.
24. Заворуев В.В., Домышева В.М., Пестунов Д.А., Сакирко М.В., Панченко М.В. Суточный ход потоков CO<sub>2</sub> в системе «атмосфера – вода» и вариабельной флуоресценции фитопланктона в период открытой воды на оз. Байкал по данным многолетних измерений // *Докл. АН.* 2018. Т. 479, № 5. С. 574–577. DOI: 10.7868/S086956521811021X.
25. Panchenko M.V., Domysheva V.M., Pestunov D.A., Sakirko M.V., Shamrin A.M., Shmargunov V.P. Carbon dioxide in the atmosphere – water system and biogenic elements in the littoral zone of Lake Baikal during period 2004–2018 // *J. Great Lakes Res.* 2020. V. 46, N 1. P. 85–94. DOI: 10.1016/j.jglr.2019.10.016.
26. Гортиков Б.М. Гидрохимические исследования лета 1927 г. в районе Байкальской биологической станции в Больших Котах // *Изв. Биол. геогр. научн.-иссл. инст. гос. Ирк. ун-т.* 1927. Вып. 3. С. 25–35.
27. Бондаренко Н.А., Оболкина Л.А., Тимошкин О.А. Лед – хранитель жизни // *Наука из первых рук.* 2004. № 1. С. 76–83.

**V.M. Domysheva, M.V. Panchenko, D.A. Pestunov, M.V. Sakirko, A.M. Shamrin. Estimation of primary production in the water of the coastal zone of the lake Baikal on the basis of the daily variations in CO<sub>2</sub> concentration in different seasons of 2005–2021.**

The paper estimates the gross and net primary production based on long-term series of complex measurements of carbon dioxide concentrations in the near-water atmosphere and surface and bottom water, as well as fluxes in the “water – atmosphere” system for the most characteristic seasonal cycles of the life of the Baikal plankton.

The calculations were carried out according to the scheme similar to the diel method. With regard to the conditions of the coastal zone, the analysis of methodological issues was carried out, neglect of which can lead to a significant uncertainty in these characteristics. It is shown that in this scheme, having only CO<sub>2</sub> concentration measurement data, it is not possible to correctly estimate the net primary production. For periods of open water, its calculation was carried out using the daily average CO<sub>2</sub> flux. The results of the assessment of bioproductivity, carried out in detail for individual series of measurements in different periods, quite adequately show the main features and are consistent with the data of long-term observations.