

АППАРАТУРА И МЕТОДЫ ОПТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 551.506.5

Углекислый газ, кислород и биогенные элементы в подледной воде литорали Южного Байкала (2004–2016 гг.)

В.М. Домышева¹, Д.А. Пестунов^{2,3}, М.В. Сакирко¹,
А.М. Шамрин², М.В. Панченко^{2*}

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

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

³ Национальный исследовательский Томский политехнический университет
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30

Поступила в редакцию 17.05.2016 г.

Анализируются результаты ежегодных серий комплексных измерений углекислого газа, кислорода и биогенных элементов в подледной воде литорали южной котловины оз. Байкал, которые были проведены с 2004 по 2016 гг. Выявлено, что к завершению ледового периода фотосинтетическая деятельность планктона приводит к существенному уменьшению парциального давления углекислого газа в воде (до 240–350 мкатм), которое оказывается заметно меньше парциального давления CO₂ в атмосфере (около 385 мкатм), а следовательно, в период вскрытия ото льда литоральной зоны Южного Байкала поток углекислого газа может быть направлен только из атмосферы на водную поверхность.

Ключевые слова: Байкал, углекислый газ, кислород, нитраты, фосфаты, кремний, подледный период, суточный ход, фотосинтез, оптические характеристики льда; Baikal, carbon dioxide, oxygen, nitrates, phosphates, silicon, ice period, diurnal variation, photosynthesis, optical characteristics of the ice.

Введение

Наблюдающиеся изменения климата обуславливают необходимость все более тщательного изучения функционирования природных экосистем на различных уровнях — в глобальных, региональных и локальных масштабах [1].

Применительно к актуальности исследований CO₂ следует отметить два аспекта: именно углекислый газ является парниковым газом, постоянный рост содержания которого в атмосфере в большинстве климатических сценариев рассматривается как важная причина продолжающегося потепления [2]; CO₂ является также и неотъемлемым компонентом процесса фотосинтеза, определяющего производство биомассы на суше и в мировом океане [3].

Во всех климатических сценариях и исследованиях глобального баланса углерода Сибирь рассматривается как один из наиболее значимых регуляторов атмосферного CO₂ в Северном полушарии [4].

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

Но в большинстве работ при оценках потоков углекислого газа в системе «подстилающая поверхность — атмосфера» и моделей цикла углерода в зимний период не рассматривается роль внутренних водоемов, которые покрыты льдом. В то же время в ряде работ показано, что необходимо учитывать вклад большого количества озер бореальной зоны, как правило, небольших, где в период ледового покрова из-за разложения органического вещества накапливается углекислый газ, который после вскрытия льда поступает в атмосферу [5, 6].

Оз. Байкал по своей площади, глубине, объему чистой воды и биологическому разнообразию не имеет аналогов в мире и, соответственно, требует комплексного, детального изучения всех составляющих процесса, определяющего цикл CO₂ в воде, и оценки его влияния на состав атмосферы. И если для периода открытой воды в настоящее время уже имеется большой объем опубликованных сведений (см., например, [7–9]), то применительно к этой задаче для подледного периода известны только отдельные данные кратковременных измерений.

Располагая 13-летним рядом ежегодных серий комплексных измерений углекислого газа, кислорода и биогенных элементов, в настоящей статье рассмотрим подледный период.

Материалы и методы

Измерения в ледовый период были начаты в 2004 г. на базе научно-исследовательского стационара Лимнологического института СО РАН, расположенного на западном побережье южной котловины оз. Байкал (51°54' с.ш. 105°04' в.д.). Наблюдения были организованы следующим образом: на удалении 40–50 м от берега создавалась отдельная лунка отбора проб воды для анализа содержания растворенных газов и биогенных элементов в береговой лаборатории, здесь же на высоте 1,5 м над поверхностью льда находилось заборное устройство для измерения атмосферного CO₂.

На протяжении всех лет нами проводилась модернизация аппаратного состава, в частности, за это время применялись различные методы измерения содержания CO₂ в воде. С 2004 до 2009 г. вычисление концентрации углекислого газа в пробах воды, забираемых круглосуточно через каждые 3 ч, осуществлялось по данным лабораторных измерений величины pH и концентрации гидрокарбоната в соответствии с методикой [10]. Начиная с 2009 г.

содержание CO₂ в воде определяли, измеряя равновесное парциальное давление газа в воде, непрерывно прокачиваемой через эквипратор [11], подача воды в который осуществлялась с помощью насоса. Насос погружался в отдельную лунку и под нижней кромкой льда отводился от нее на расстояние около полуметра. Для измерения концентрации углекислого газа в приводной атмосфере, а затем и в камере эквипратора в течение этих лет применялись различные газоанализаторы (таблица).

Химический анализ воды проводился в полевой лаборатории. Здесь измерялась величина pH, концентрация растворенного кислорода, гидрокарбоната, нитрата, фосфата и кремния. Измерения активности ионов H⁺ выполнялись pH-метром «Эксперт-001» с точностью 0,02 ед., кислорода — по Винклеру с относительной погрешностью измерения 0,3%, гидрокарбоната — потенциометрическим методом (погрешность 1%). Концентрацию нитрата, фосфата и кремния определяли фотометрическими методами с относительной погрешностью 4, 1,5 и 5% соответственно. Периодичность измерений pH, O₂, NO₃⁻, PO₄³⁻ и Si составляла 3 ч во все измерительные циклы.

Периоды измерений, используемая аппаратура и частота отбора проб

Период измерений	Газоанализатор для измерения CO _{2атм}	Метод определения CO _{2вод} , газоанализатор (период измерений, ч)	Примечания
28.02–04.03. 2004	V	pH (3)	Отбор проб воды для анализа из отдельной лунки
28.03–06.04. 2005*	V	pH (3)	Наблюдалось интенсивное таяние снега и поступление талых вод в лунку для отбора в дневной период
20.02–09.03. 2006	V	pH (3)	Отбор проб воды для анализа из отдельной лунки
21.02–13.03. 2007	V	pH (3)	Отбор проб воды для анализа из отдельной лунки
29.02–05.03. 2008	L	pH (3)	Отбор проб воды для анализа из отдельной лунки
27.02–10.03. 2009	L	Equilibrator, L (1)	Измерения парциального давления CO ₂ в воде с применением эквипратора
30.03–14.04. 2011*	L	Equilibrator, L (1)	Отбор проб воды для анализа из магистрали перед поступлением в эквипратор
28.03–18.04. 2012*	L	Equilibrator, L (1)	С 11.04 многочисленные разломы льда в прибрежной зоне. Открылись значительные участки воды
01.04–10.04. 2013*	P	Equilibrator, P (1)	Отбор проб воды для анализа из магистрали перед поступлением в эквипратор
23.03–04.04. 2014*	P	Equilibrator, P (1)	Отбор проб воды для анализа из магистрали перед поступлением в эквипратор
27.03–06.04. 2015*	P	Equilibrator, P (1)	Отбор проб воды для анализа из магистрали перед поступлением в эквипратор
26.03–06.04. 2016*	P	Equilibrator, P (1)	Отбор проб воды для анализа из специальной лунки

Примечания: V — газоанализатор на базе датчика Vaisala [12], L — LiCOR-840, P — Picarro G2301-f; pH — определение концентрации CO₂ в подледной воде на основе измерения pH и HCO₃⁻; equilibrator — определение концентрации CO₂ в подледной воде с применением эквипратора; * — измерительные циклы приходились на периоды подледного прогревания; 2010 г. — разрушение выносного пункта газоаналитического комплекса при подвижке льда, проведены измерения CO₂ только в пробах подледной воды.

Обсуждение результатов и выводы

Следует отметить, что содержание растворенных газов и биогенных элементов в воде Байкала регулируется сложным комплексом взаимосвязанных многочисленных гидрологических, химических и биологических процессов, каждый из которых зависит как от погодных условий в регионе, так и от собственных циклов изменчивости, имеющих разный временной масштаб. Понятно, что в данных, полученных в разные годы, неизбежно будет проявляться и межгодовая изменчивость как погодных ситуаций региона в целом, так и ритмов развития подледного планктона [13–15], обуславливающих содержание растворенных газов и биогенных элементов в подледной воде (отметим, что, согласно данным [13], межгодовые колебания уровня развития, видовой и размерной структуры фитопланктона проявляются ярче всего в подледный период).

Известно, что особенности протекания в озере всей совокупности процессов наиболее сильно зависят от его температурного режима. В подледный период в тепловом режиме оз. Байкал специалисты выделяют два этапа — подледного охлаждения и подледного прогревания [16]. Этап подледного охлаждения (от начала замерзания до перехода теплового баланса к положительным значениям) по средним многолетним данным для Южного Байкала длится около 78 дней. Затем до вскрытия льда начинается прогрев озера и продолжается в среднем 47 дней, скорость которого во многом определяется высокой прозрачностью байкальского льда и состоянием снежного покрова [16].

Исходя из этой информации, на первом этапе исследований в 2004 г. мы провели измерения в конце февраля — начале марта (период подледного охлаждения), а в 2005 г. в конце марта — начале апреля (период подледного прогревания). Поскольку полученные данные в этих двух циклах заметно различались, было принято решение в течение ряда лет провести наблюдения в период подледного охлаждения, затем в последующие годы в период подледного прогревания (в таблице отмечены звездочкой), а общий анализ проводить в координатах от начала календарного года.

Внутрисезонная динамика

На рис. 1 приведены данные о средних концентрациях растворенных газов, а на рис. 2 — биогенных элементов в подледной воде для каждой серии наблюдений. Видим, что для кислорода, концентрация которого в годовом ходе зимы достигает своих максимальных значений [17], различия между средними значениями O_2 в периоды *охлаждения* и *прогревания* статистически незначимы — менее 5% (при вариации отношений среднеквадратичных отклонений к среднему значению для каждого измерительного цикла также около 5%). Но для углекислого газа (рис. 1) и биогенных элементов (рис. 2), несмотря на заметную межгодовую изменчивость анализируемых характеристик, про-

является достоверное снижение концентраций в подледной воде в течение времени существования ледового покрова.

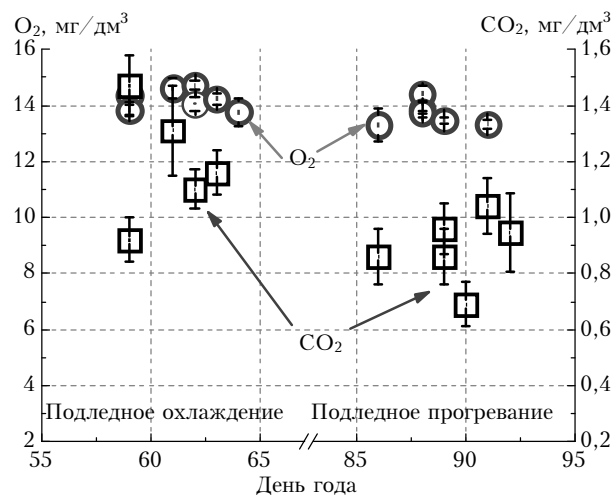


Рис. 1. Средние значения концентраций кислорода и углекислого газа для периодов подледного охлаждения и прогревания (здесь и на рис. 2 день года — средний день в каждой серии измерений)

Поскольку основной массив данных для периода подледного охлаждения был сформирован по результатам измерений до 2009 г., а для периода подледного прогревания — с 2010 по 2016 г., здесь неизбежно возникает следующий, вполне обоснованный вопрос. Насколько обнаруженное закономерное снижение концентраций растворенных газов и биогенных элементов в течение подледного периода (рис. 1, 2) определяется именно процессом фотосинтеза, а не динамикой иных устойчивых межгодовых трендов (например, уменьшением времени покрытия оз. Байкал ледовым покровом из-за глобального потепления [18, 19] и т.п.)? Очевидно, что полностью исключить возможное воздействие глобальных климатических изменений на весь комплекс подледных процессов на основе рассматриваемого материала не представляется возможным. Но в то же время, анализируя данные о парциальном давлении CO_2 в поверхностной воде для всего цикла подледных измерений 2004–2016 гг. (рис. 3, а) и полученные нами в наблюдениях в период охлаждения перед ледоставом в декабре 2007–2015 гг. (рис. 3, б), следует отметить, что какие-либо закономерные межгодовые тенденции и в том, и в другом случае не обнаруживаются.

Из рис. 3, б видим, что в предледоставный период в поверхностной воде Байкала наблюдается высокая концентрация CO_2 , парциальное давление которого заметно превышает атмосферное [20]. Даже если предположить, что к началу становления ледового покрова поток углекислого газа с поверхности воды в атмосферу заметно снизит концентрацию CO_2 в воде, то и в этом случае в поверхностной воде подо льдом останется еще значительное содержание углекислого газа, парциальное давление которого как минимум будет равно его давлению в приводном слое атмосферы (около 385 мкатм).

Понятно, что дальнейшее уменьшение концентрации CO_2 возможно только из-за его потребления в ходе какого-либо процесса.

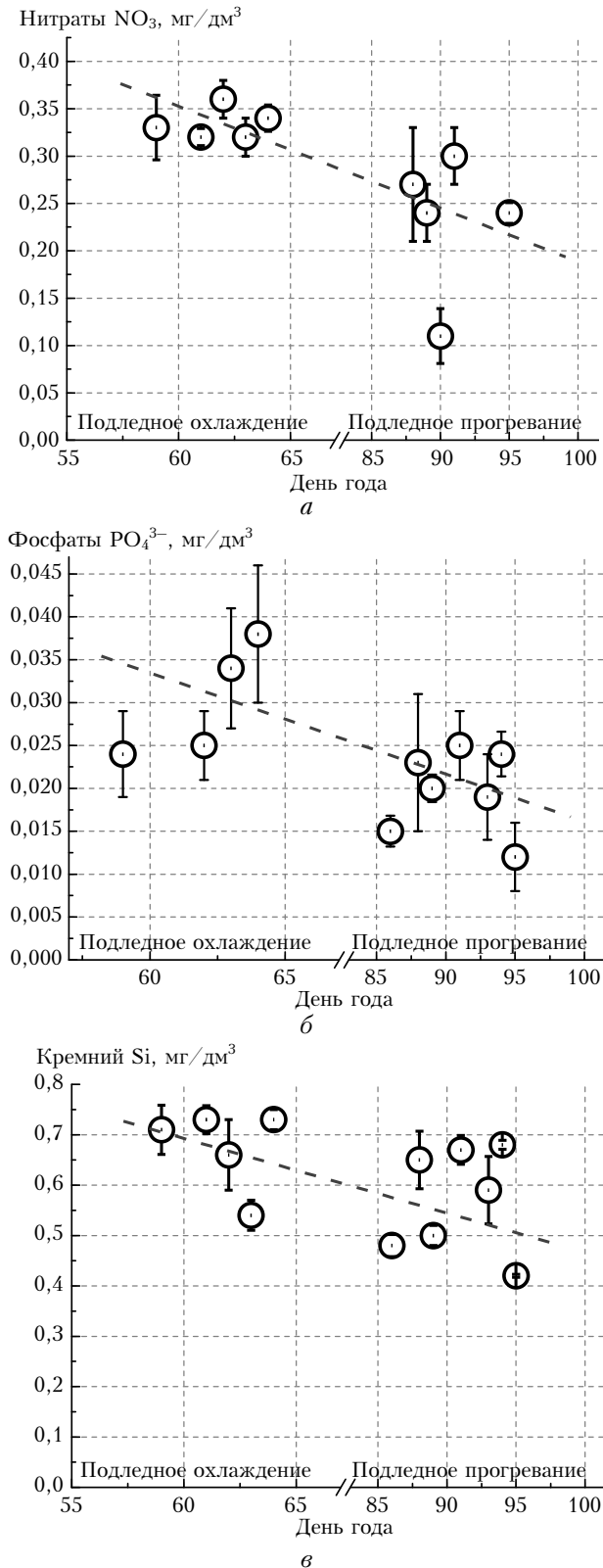


Рис. 2. Средние значения концентраций нитратов (а), фосфатов (б) и кремния (в) для периодов подледного охлаждения и прогревания

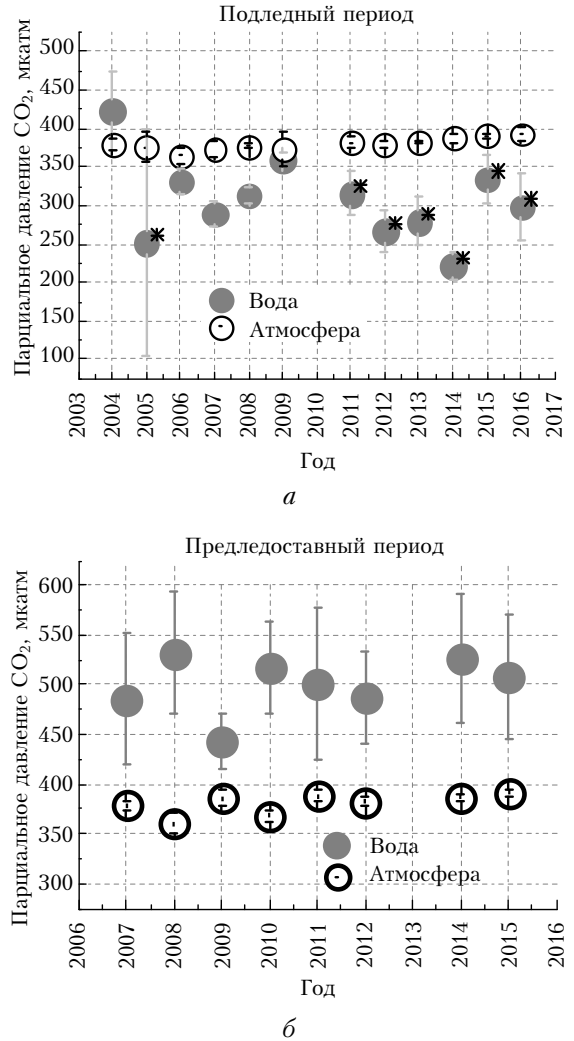


Рис. 3. Средние значения парциального давления CO_2 в воде и атмосфере: а – в каждом измерительном цикле в подледный период 2004–2016 гг.; б – в период охлаждения перед ледоставом в декабре 2007–2015 гг.

Очевидно, что после становления ледового покрова на Байкале существенно снижается роль многих факторов (развитие волнение, бризовые нагоны воды с пелагиали и т.п.), которые могли бы повлиять на однонаправленное изменение химического состава воды. В то же время хорошо известно, что в Байкале (в отличие от большинства малых озер) именно на подледный период приходится пик продуктивности фитопланктона [13–15, 21, 22]. Отсюда следует полагать, что продуцирование планктона в результате его фотосинтетической деятельности в подледный период в литорали Южного Байкала преобладает над процессом деструкции органических соединений и, соответственно, приводит к снижению концентраций углекислого газа и биогенных элементов. В противоположном случае, в отсутствие в подледный период в литорали Байкала продолжительных однонаправленных обменных процессов в толще воды [19], наблюдался бы обратный ход анализируемых характеристик.

Суточный ход

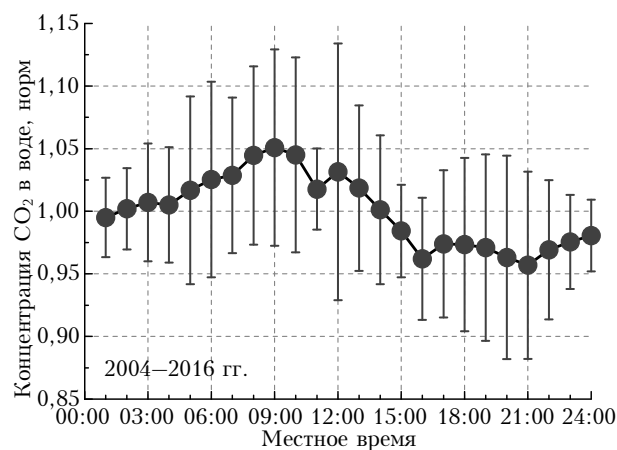
Для дальнейшего выяснения роли процесса фотосинтеза в подледный период, который по определению регулируется дневным ходом солнечной инсоляции [21, 22], рассмотрим прежде всего суточный ход концентрации углекислого газа, поскольку происходящие в течение суток процессы продуцирования и деструкции органического вещества, включая дыхание гидробионтов, напрямую определяют концентрацию растворенного CO_2 . Чтобы выявить наиболее характерные особенности суточного хода для рассматриваемых двух периодов (охлаждения и прогрева), мы воспользовались следующим приемом: вначале вычислялось среднее значение рассматриваемой величины для конкретных суток; затем измеренное значение для каждого часа нормировалось на соответствующее среднее за сутки; и далее рассчитывался средний суточный ход нормированной характеристики в каждой измерительной серии и средний суточный ход для всего периода наблюдений: и для периодов охлаждения, и прогрева (рис. 4). Такая обработка данных позволила снизить влияние вариаций анализируемых характеристик под воздействием внешних факторов, которые не связаны с суточным ритмом.

Как видим из рис. 4, *а*, суточный ход концентрации (парциального давления) CO_2 в целом для всего массива данных проявляется вполне отчетливо, что свидетельствует о том, что, как и предполагалось, в подледной воде именно процесс фотосинтеза играет ведущую роль в формировании суточной изменчивости содержания углекислого газа.

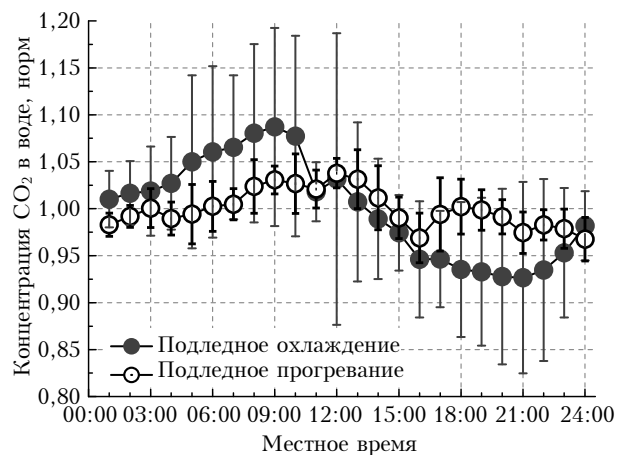
Но более подробный анализ показывает, что только в период охлаждения суточный ход углекислого газа в подледной воде наиболее хорошо выражен. От утреннего максимума в 09:00 до вечернего минимума в 19:00–20:00 наблюдается размах суточного хода около 15% (рис. 4, *б*). Далее по мере перехода к периоду подледного прогрева контрастность суточного хода снижается (максимум и минимум этой характеристики размываются во времени), а размах амплитуды уменьшается до 7% (рис. 4, *б*).

Относительно других анализируемых нами характеристик следует отметить, что выявить характерные особенности суточного хода для периодов охлаждения и прогрева корректно не удается по следующим причинам. Как показывает анализ аналогичных данных для открытой воды [9], когда размах суточного хода CO_2 составляет до 100% от среднего, для биогенных элементов он не превышает 10–12%. Очевидно, что, даже если исключить воздействия иных процессов, при значениях величины размаха для углекислого газа в подледный период около 15% концентрация биогенных элементов в суточном ходе будет варьировать в пределах около 1%, что сравнимо с диапазоном погрешности измерений данных характеристик. Для кислорода, содержание которого в суточном ходе процесса фотосинтеза в воде находится строго в противофазе с углекислым газом, изменение концентрации мало и также не превышает 1%. Действительно, в под-

ледной воде концентрация кислорода в среднем составляет 14 мг/дм^3 , а углекислого газа около 1 мг/дм^3 . При потреблении CO_2 в период подледного охлаждения от утреннего максимума к послеполуденному минимуму около 15% от его средней концентрации в воду должно поступить приблизительно $0,11 \text{ мг/дм}^3 \text{ O}_2$, что составит около 0,8% от среднего значения. Отсюда понятно, что погрешность измерения концентрации кислорода по методу Винклера 0,3% и, главным образом, неизбежные, даже слабые случайные вариации содержания кислорода в течение каждых суток не позволяют статистически значимо выделить суточный ход O_2 в подледной воде.



а



б

Рис. 4. Средний суточный ход нормированных значений концентрации углекислого газа: *а* — для всего массива; *б* — для периодов подледного охлаждения и прогрева

Факт изменения временной картины и снижения амплитуды суточного хода углекислого газа в период подледного прогрева по сравнению с периодом охлаждения вполне объясним. К концу марта — началу апреля толщина льда достигает своих максимальных значений. Но главным фактором в это время является существенное изменение оптических характеристик льда. Если в начальный

период после установления ледового покрова байкальский лед характеризуется уникальной прозрачностью, то при старении льда его структура серьезно трансформируется. На его поверхности и во всей толще появляется большое количество разнообразных трещин, в которые, по мере увеличения подъема солнца над горизонтом и продолжительности светового дня, попадает талая вода, образуя так называемый черный лед. Интересно отметить, что в процесс изменения структуры льда вносят вклад и водоросли, которые вмерзли при ледоставе, а при усилении инсоляции, «...растаявая вокруг себя лед, начинают размножаться и создавать внутри байкальского льда причудливые структуры...» [23]. Определенные преобразования происходят и на верхней кромке ледового покрова, поскольку постоянно чередующееся дневное таяние снега и ночное замерзание заметно увеличивают рассеивающие свойства ранее гладкой поверхности. Понятно, что все эти факторы существенно изменяют как величину солнечной энергии, так и соотношение прямой и рассеянной солнечной радиации, достигающей подледной воды. Соответственно, контрастность дневного хода подледной инсоляции, определяющей процесс фотосинтеза, размывается во времени.

Заключение

Применительно к основной задаче исследований процессов, определяющих содержание CO_2 в воде Байкала, и оценки его потоков в системе «вода–атмосфера», отметим наиболее важные результаты, полученные для подледного периода. В течение времени существования ледового покрова в литоральной зоне Байкала фотосинтетическая деятельность гидробионтов играет ведущую роль в формировании суточной изменчивости содержания углекислого газа в воде.

Выявлено, что в течение подледного периода наблюдается уменьшение концентраций углекислого газа и биогенных элементов в воде (необходимых компонентов фотосинтеза). Этот факт свидетельствует о том, что в это время рост первичной продукции планктона преобладает над процессами деструкции органических соединений.

Важным следствием этого процесса является то, что к завершению ледового периода (рис. 3, отмечены звездочками) величина парциального давления углекислого газа в воде в разных измерительных сериях 2004–2016 гг., изменяющаяся в диапазоне от 240–350 мкاتم, оказывается заметно меньше парциального давления его в атмосфере (около 385 мкاتم), и, следовательно, в период вскрытия ото льда литоральной зоны Южного Байкала поток CO_2 может быть направлен только из атмосферы на водную поверхность. Данный факт, который хорошо согласуется с результатами многолетних измерений в этом же наблюдательном пункте в период открытой воды весной [9], на наш взгляд, необходимо учитывать в различных климатических сценариях и оценках баланса углерода на территории Сибири.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 14-05-00277а) и Программы фундаментальных исследований Отделения наук о Земле РАН.

1. IPCC (2014) 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 and L.A. Meyer (eds.). IPCC, Geneva, Switzerland. 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 / Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P.M. Midgley (eds.). Cambridge; New York: Cambridge University Press, 2013. P. 465–570. DOI: 10.1017/CBO9781107415324.015.
3. Le Quéré C., Moriarty R., Andrew R.M., Peters G.P., Ciais P., Friedlingstein P., Jones S.D., Sitch S., Tans P., Armeth A., Boden T.A., Bopp L., Bozec Y., Canadell J.G., Chini L.P., Chevallier F., Cosca C.E., Harris I., Hoppema M., Houghton R.A., House J.I., Jain A.K., Johannessen T., Kato E., Keeling R.F., Kitidis V., Goldewijk K.K., Koven C., Landa C.S., Landschützer P., Lenton A., Lima I.D., Marland G., Mathis J.T., Metzl N., Nojiri Y., Olsen A., Ono T., Peng S., Peters W., Pfeil B., Poulter B., Raupach M.R., Riegner P., Rödenbeck C., Saito S., Salisbury J.E., Schuster U., Schwinger J., Séférian R., Segsneider J., Steinhoff T., Stocker B.D., Sutton A.J., Takahashi T., Tilbrook B., van der Werf G.R., Viovy N., Wang Y.-P., Wanninkhof R., Wiltshire A., Zeng N. 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. Lakes and reservoirs as regulators of carbon cycling and climate // Limnol. Oceanogr. 2009. V. 54, iss. 6. Pt 2. P. 2298–2314.
6. Sobek S., Algesten G., Bergstrom A.K., Jansson M., Tranvik L.J. The catchment and climate regulation of pCO_2 in boreal lakes // Glob. Change Biol. 2003. V. 9, iss. 4. P. 630–641.
7. 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.
8. Мизандронцев И.Б., Горбунова Л.А., Домышева В.М., Мизандронцева К.Н., Томберг И., Шимараев М.Н. Газообмен Байкала с атмосферой в осенний период // Геогр. и природ. ресурсы. 1998. № 1. С. 61–70.
9. Panchenko M., Pestunov D., Sakirko M., Domyshova 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. DOI: <http://dx.doi.org/10.4236/ijg.2013.410130>.
10. Семенов А.Д. Руководство по химическому анализу поверхностных вод суши. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 542 с.
 11. Пестунов Д.А., Шмаргунов В.П., Панченко М.В. Измеритель содержания CO₂, растворенного в воде // Приборы и техн. эксперим. 2008. № 5. С. 143–145.
 12. Панченко М.В., Домышева В.М., Пестунов Д.А., Сакирко М.В., Заворухин 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. Поповская Г.И. Годовые изменения фитопланктона // Тр. АН СССР. СО. Лимнол. ин-т. 1971. Т. 12(32): Лимнология придельтовых пространств Байкала. С. 158–169.
 14. 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.
 15. Бондаренко Н.А., Белых О.И., Логачёва Н.Ф., Тихонова И.В., Волкова Е.А. Микроводоросли прибрежной зоны озера Байкал. Сер. «Биология. Экология». 2012. Т. 5, № 3. С. 88–102.
 16. Шимараев М.Н. Элементы теплового режима озера Байкал. Новосибирск: Наука, 1977. 149 с.
 17. Домышева В.М. Часть II. Озеро Байкал: среда обитания, биота и экосистема. Глава 7. Физико-химическая характеристика среды обитания гидробионтов. 7.5. Гидрохимия // Байкал: природа и люди: энциклопедический справочник / Под ред. А.К. Тулохнова. Улан-Удэ: ЭКОС. Изд-во БНЦ СО РАН, 2009. С. 71–72.
 18. Куимова Л.Н., Шерстянкин П.П., Якимова Н.И. О ледовом режиме озера Байкал как показателе изменения климата // Высокие технологии и фундаментальные исследования. Сб. тр. 10-й междунар. научно-практической конф. «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности». 9–11 декабря 2010 г. 2010. С. 282–284.
 19. Шимараев М.Н., Сизова Л.Н., Куимова Л.Н. Циркуляция атмосферы, климат и гидрологические процессы на Байкале в последние 60 лет // Девятое Сибирское совещание по климатологическому мониторингу. Томск, 3–6 октября 2011 г. 2011. С. 142–144.
 20. 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. 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 in the “atmosphere–water” system of littoral of Southern Baikal. 3. Autumn // Atmos. Ocean. Opt. 2013. V. 26, N 3. P. 251–258.
 21. Бондаренко Н.А., Гусельникова Н.Е. Продукция фитопланктона Южного Байкала // Изв. Сиб. отд-ния АН СССР. 1989. Вып. 1. С. 77–80.
 22. Back R.C., Bolgrin D.W., Guselnikova N.E., Bondarenko N.A. Phytoplankton photosynthesis in Southern Lake Baikal // J. Great Lakes Research. 1991. V. 17, N 2. P. 194–202.
 23. Бондаренко Н.А., Оболкина Л.А., Тимошкин О.А. Лед – хранитель жизни // Наука из первых рук. 2004. Т. 2, № 1. С. 76–83.

V.M. Domysheva, D.A. Pestunov, M.V. Sakirko, A.M. Shamrin, M.V. Panchenko. Carbon dioxide, oxygen, and biogenic elements in the water under ice of the South Baikal littoral.

The results of the annual series of complex measurements of carbon dioxide, oxygen, and nutrients in the water under ice of the littoral of the southern area of Lake Baikal, which were carried out since 2004 till 2016, are analyzed in the paper. An important conclusion is the fact that the photosynthetic activity of the plankton at the end of the period of ice cover leads to a significant decrease in the partial pressure of carbon dioxide in the water (to 240–350 μatm), which is noticeably less than the partial pressure of CO₂ in the atmosphere (about 385 μatm), and consequently, the carbon dioxide flux during the period of removing ice from the littoral area of southern Baikal can be directed only from the atmosphere to the water surface.