

УДК 551.510.41

Пространственное распределение потоков углекислого газа, биогенных элементов и биомассы фитопланктона в пелагиали оз. Байкал в весенний период 2010–2012 гг.

В.М. Домышева¹, М.В. Усольцева¹, М.В. Сакирко¹, Д.А. Пестунов²,
М.Н. Шимараев¹, Г.И. Поповская¹, М.В. Панченко^{2*}

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

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

Поступила в редакцию 26.02.2014 г.

Приведены результаты измерений концентрации кислорода, биогенных элементов, биомассы фитопланктона и парциальных давлений углекислого газа в воде и приводной атмосфере, в пелагиали Байкала в июне 2010–2012 гг. В зимне-весенние месяцы 2010–2012 гг. в регионе наблюдались весьма контрастные погодные ситуации, которые во многом определили характер гидрологических и биологических процессов в воде пелагиали Байкала. Кардинальное различие предшествующих погодных условий экспедиций 2010–2012 гг. обеспечило возможность на основе трех массивов данных оценить широкий диапазон межгодовой изменчивости исследуемых характеристик и проанализировать их роль в формировании потоков на разных стадиях весеннего прогрева. Проведено сопоставление количественных характеристик биомассы фитопланктона с разностью парциального давления углекислого газа в системе «атмосфера–вода».

Ключевые слова: поток углекислого газа, «атмосфера–вода», биомасса, оз. Байкал; carbon dioxide flux, air–water, biomass, Lake Baikal.

Введение

Работа является продолжением комплексного исследования влияния физических, гидрологических, химических и биологических процессов на газообмен CO₂ в системе «атмосфера–вода» на оз. Байкал [1–4]. Данные были получены во время судовых экспедиций, проведенных в пелагиали Байкала в весенние периоды 2010–2012 гг. Обсуждаемые результаты представляют, на наш взгляд, особый интерес, поскольку кардинально разные погодные ситуации в зимний период 2010–2012 гг. должны были отразиться на гидрологических и биологических процессах в воде Байкала весной.

Методические аспекты

Схема станций отбора проб воды была такая же, как и в предыдущие годы [2]. На каждой станции проводились гидрофизическое зондирование,

отбор проб воды для определения биогенных элементов (нитраты и кремний), растворенных CO₂ и O₂ по всей вертикали до придонной области и биомассы фитопланктона в верхнем 25-метровом слое воды. Методика измерений исследуемых характеристик описана в [3, 5].

Поток CO₂ в системе «атмосфера–вода» может быть рассчитан по формуле

$$F = k\Delta P_{\text{CO}_2}, \quad (1)$$

где $\Delta P_{\text{CO}_2} = (P_{\text{CO}_2} - p_{\text{CO}_2})$, P_{CO_2} , p_{CO_2} – парциальные давления углекислого газа в поверхностной воде и в приводной атмосфере соответственно; k – коэффициент обмена, зависящий от скорости ветра [6]. Измерения парциального давления углекислого газа в приводной атмосфере p_{CO_2} и растворенного в верхнем слое воды P_{CO_2} с применением эквивалентатора (измеритель парциального давления CO₂ в воде) проводились на каждой гидрологической станции.

Для изучения пространственной картины потоков CO₂, как и ранее в [3], будем использовать измеренные значения разности парциальных давлений в воде и атмосфере, которые определяют *знак и амплитуду* потока. Для определения потоков газов с подстилающей поверхности разработаны различные методы [6–8]. Но они основаны на регистрации исследуемых характеристик за определенный

* Валентина Михайловна Домышева (hydrochem@lin.irk.ru); Марина Владимировна Усольцева (marinaus@lin.irk.ru); Мария Владимировна Сакирко (sakirko@lin.irk.ru); Дмитрий Александрович Пестунов (pest@iao.ru); Михаил Николаевич Шимараев (shimaraev@lin.irk.ru); Галина Ивановна Поповская; Михаил Васильевич Панченко (pmv@iao.ru).

промежутки времени, что не позволяет воспользоваться микрометеорологическими методами, которые характеризуют средний поток газа с достаточно большого участка акватории. В судовых же экспедициях отбор проб воды для анализа химического и биологического состава осуществляется на станциях в конкретной точке. С учетом того, что пространственное распределение биомассы фитопланктона и, соответственно, растворенных газов и биогенных элементов может иметь сложную «пятнистую» структуру [9, 10], измеренные такими методами величины потока углекислого газа и результаты анализа пробы воды будут относиться к совершенно разным по масштабу процессам.

Величина ΔP_{CO_2} определяет знак потока углекислого газа в конкретной точке отбора пробы и используется нами для описания пространственной картины распределения потоков и для их сопоставления с распределением биомассы фитопланктона. Концентрация углекислого газа в атмосфере имеет хорошо выраженный годовой ход и устойчивый положительный межгодовой тренд около 2 млн^{-1} (в Сибирском регионе этот тренд хорошо соответствует глобальному [11]), следовательно, основные межгодовые вариации ΔP_{CO_2} будут определяться изменением парциального давления углекислого газа в воде — P_{CO_2} . Данные судовых измерений [3] показывают, что давление углекислого газа в приводной атмосфере p_{CO_2} по всей пелагиали озера за период рейса (10 сут) меняется незначительно (максимальные вариации не превышали 30 млн^{-1}). Специальный самолетный эксперимент, проведенный на разных высотах по всей площади над Байкалом от прибрежных зон до центра озера [12], показал, что вариации содержания углекислого газа в атмосфере в каждом полете не превышали $1\text{--}3 \text{ млн}^{-1}$. В целом полученные самолетные данные позволили убедиться, что в нижний слой атмосферы над акваторией Байкала не поступают отдельные шлейфы от отдаленных организованных источников и основные вариации CO_2 в пределах $10\text{--}15 \text{ млн}^{-1}$ для разных периодов наблюдения в первую очередь обусловлены синоптическими процессами [12]. Анализ судовых и самолетных наблюдений позволяет заключить, что пространственное распределение величины ΔP_{CO_2} по акватории Байкала будет определяться именно изменением парциального давления углекислого газа P_{CO_2} в воде.

Парциальное давление углекислого газа в поверхностном слое воды озера P_{CO_2} зависит от его концентрации и растворимости, которые, в свою очередь, определяются сложным комплексом взаимодействующих гидрологических и биологических процессов. Основываясь на многочисленных результатах ранее проведенных работ [1–4, 13–16], мы выявили, что одной из важных переменных является биологический фактор, изменчивость которого во времени и пространстве регулируется как собственными ритмами развития планктона [9, 17],

так и температурным режимом воды, концентрацией растворенных газов и биогенных элементов. Следовательно, пространственно-временная изменчивость парциального давления CO_2 в воде будет определяться неизбежными межгодовыми изменениями погоды в регионе, вариациями гидрологических процессов [18] и собственными ритмами развития водной биоты [9]. Гидрологические и биологические ритмы в определенной степени коррелированы между собой, но, с другой стороны, имеют свой внутренний сезонный ход и межгодовую изменчивость.

На Байкале мы все время имеем дело как с гидрологическими, так и с биологическими переходными процессами: после вскрытия льда идет прогрев воды и заканчивается вегетация подледного комплекса водорослей, далее начинает развиваться их летнее сообщество, а затем следуют осеннее охлаждение и завершение летней вегетации.

Наиболее интересным временем для организации исследований по всей акватории представляется период после схода ледового покрова, когда постепенно с юга на север начинается прогрев озера. Следовательно, за ограниченную по времени экспедицию появляется возможность провести измерения в различных условиях в южной, средней и северной частях Байкала. Отметим, что Байкал разделен поднятиями дна на три котловины: южную, среднюю и северную [18]. На условной границе между Южным и Средним Байкалом находится станция № 6, а станция № 12 — между Средним и Северным [3].

Анализ результатов

Температурный режим. Весенний прогрев поверхности озера по всей акватории происходит неравномерно из-за большой протяженности с юга на север [18]. Рейсы 2010–2012 гг. начинались почти в одно и то же календарное время — 3 июня 2010 г., 27 мая 2011 г. и 2 июня 2012 г. Но известно, что на формировании гидрологических и биологических процессов в воде оз. Байкал весной заметно сказывается изменчивость погоды в регионе в холодный период года. Отметим, что в 2010–2012 гг. реализовались кардинально разные погодные ситуации. Действительно, по данным ФГБУ «ГИДРОМЕТЦЕНТР РОССИИ» зимний период 2010 г. на Урале и в Сибири относится к категории очень холодных. На Байкале (ст. Бабушкин) средняя с декабря по февраль температура воздуха в 2010 г. ($-17,1 \text{ }^\circ\text{C}$) была значительно ниже, чем в 2011 ($-15,7 \text{ }^\circ\text{C}$) и 2012 гг. ($-13,2 \text{ }^\circ\text{C}$); в Южном Байкале (Листвянка) заморозание наступило 4, 10 и 23 января соответственно. В Северном полушарии апрель, май, июнь 2012 г. оказались самыми теплыми по наблюдениям с 1891 г. (<http://www.meteoinfo.ru/climate/>). Естественно, что эти обстоятельства отразились и на сроках вскрытия Байкала и темпах схода ледового покрова (рис. 1).

Такое экстремальное различие предшествующих погодных условий для экспедиций 2010–2012 гг. дает редкую возможность на основе трех массивов данных оценить весьма широкий диапазон

межгодовой изменчивости исследуемых характеристик и проанализировать их роль в формировании потоков на разных стадиях весеннего прогрева.

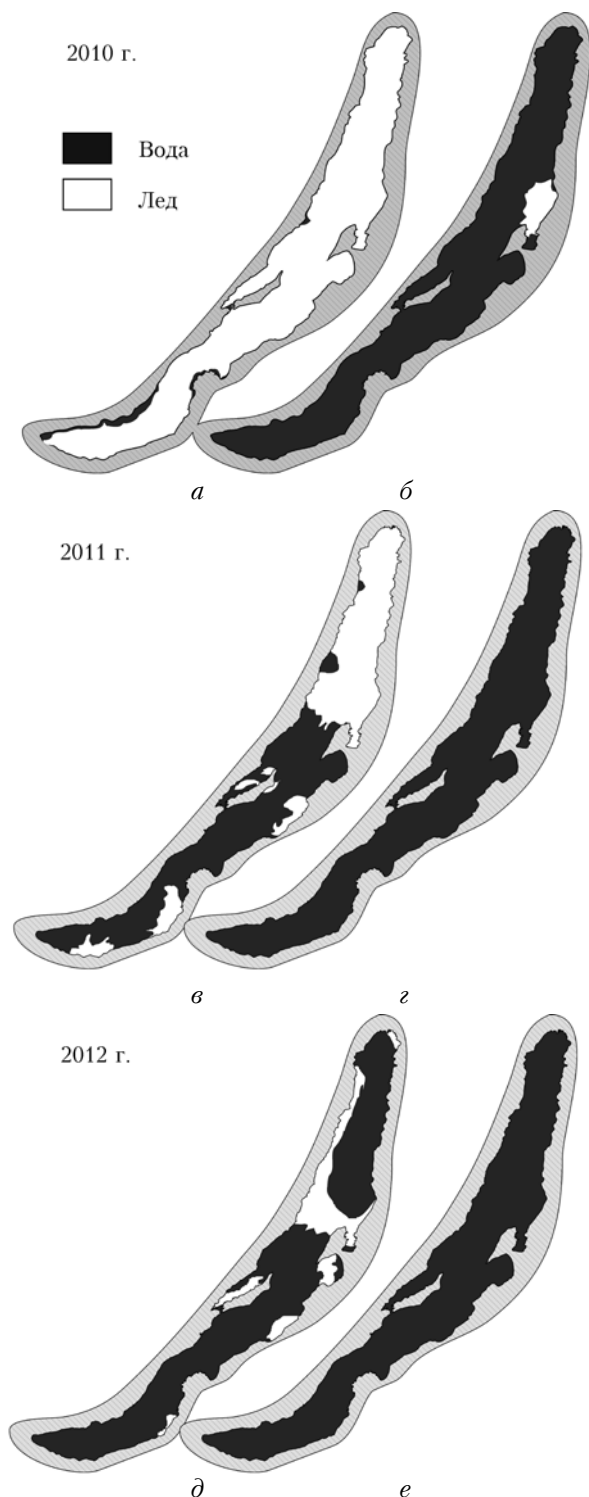


Рис. 1. Состояние поверхности Байкала в весенний период на 15 мая (а, б, д) и на день начала рейса (б, г, е) в 2010–2012 гг. (Бюллетень космического мониторинга Байкальской природной территории <http://geol.irk.ru/dzz/bpt/ice/ice201205.htm>. Мониторинг ледовой обстановки, температуры поверхности, облачного и снежного покровов)

Как видим из рис. 1, а, в 2010 г. за 20 дней до начала рейса практически вся акватория Байкала была покрыта льдом. Соответственно, в период измерений на всех станциях пелагиали наблюдались самые низкие температуры поверхностной воды (рис. 2). Рейс 2012 г. (рис. 1, д), наоборот, проходил в условиях, когда за 19 дней до рейса на Байкале наблюдались лишь отдельные фрагменты ледового покрова. Естественно, что в 2012 г. поверхностная вода характеризовалась самой высокой температурой (рис. 2). Температурный режим 2011 г. в пелагиали, в основном, занимает промежуточное положение между 2010 и 2012 гг. (рис. 2), лишь на двух станциях Среднего Байкала и двух станциях на севере озера были зарегистрированы практически одинаковые температуры воды в 2010 и 2011 гг.

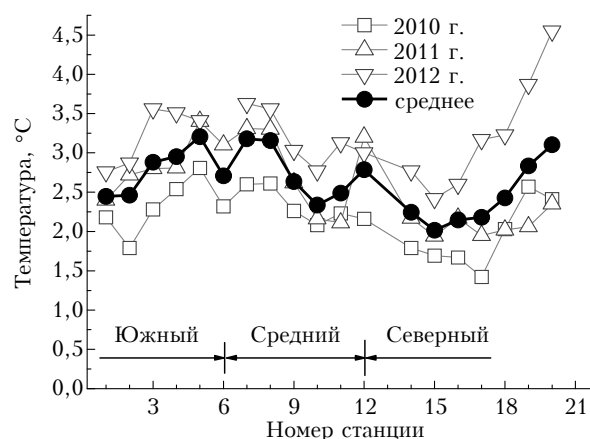


Рис. 2. Пространственное распределение температуры в поверхностном слое воды в пелагиали оз. Байкал в 2010–2012 гг.

В пространственном распределении температуры воды поверхности озера в 2010–2012 гг. прослеживаются общие черты. Более низкие температуры на станциях 1–2 и 14–16 обусловлены поздним сходом льда в южной оконечности озера и сохранением ледового перешейка в южной части северной котловины. Повышение температуры воды на отдельных станциях Северного Байкала связано с поступлением теплых вод притоков северной оконечности озера.

Биогенные элементы. Изменения концентраций кислорода и биогенных элементов с глубиной в Байкале обусловлены биологическими процессами и проявлением основных механизмов вертикального водообмена. Общей особенностью для отдельных котловин озера, наряду с увеличением концентрации биогенных элементов и уменьшением концентрации O_2 с ростом глубины, является наличие трех зон, выделяемых по характеру вертикального распределения биогенных элементов и кислорода и его изменчивости во времени. В верхней (до 200–300 м) динамически активной зоне распределение биогенных элементов значительно меняется в разные сезоны в зависимости от интенсивности вертикального перемешивания и уровня развития фитопланктона. На распределение кислорода оказывают влияние

соотношение продукционно-деструкционных процессов и характер газообмена с атмосферой. В глубинной зоне — центральном ядре водной толщи ниже 200–300 м с пониженной динамической активностью — временная изменчивость элементов мала и их вертикальный градиент практически постоянен. В придонной зоне, в 100–200 м от дна, из-за влияния глубинной конвекции и присклоновых циркуляций изменчивость концентрации элементов вновь повышается, а их вертикальный градиент в периоды усиления механизмов обновления глубинных вод может даже менять свой знак [18]. Пространственное распределение биогенных элементов вдоль озера различно. Это связано со сдвигом времени наступления отдельных фаз сезонной динамики в широтном направлении и различиями в интенсивности водообмена [19]. В 2010–2012 гг. в поверхностной воде на фоне наблюдающейся межгодовой изменчивости в пелагиали Байкала проявляется относительно устойчивая пространственная картина распределения кремния и нитратов (рис. 3).

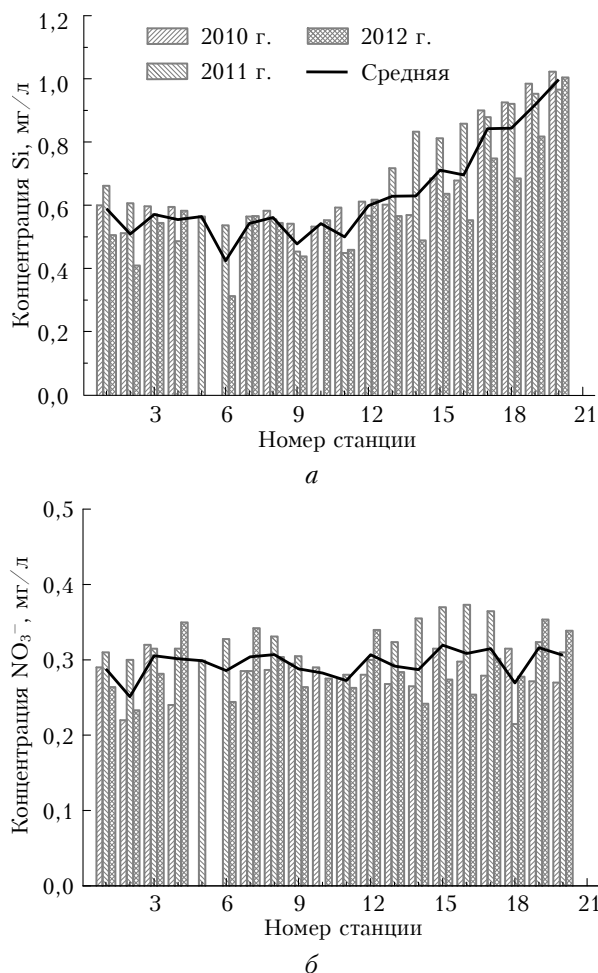


Рис. 3. Пространственное распределение концентраций кремния и нитратов в поверхностном слое воды в 2010–2012 гг.

Видно, что в пелагиали Байкала на фоне сравнительно небольшой межгодовой изменчивости наблюдается тенденция роста концентрации кремния

в северной котловине. Такая пространственная картина распределения кремния в поверхностных водах Байкала обусловлена влиянием вод притоков, впадающих в его северную часть, и вполне согласуется с ранее известными результатами исследований [20]. В пространственном распределении концентрации нитратов в рассматриваемый период можно отметить лишь наличие межгодовых вариаций (в 1,5–2 раза для ряда станций) при относительно нейтральном ходе от юга к северу.

Углекислый газ. Результаты измерения концентрации углекислого газа в поверхностной воде на станциях в пелагиали Байкала в весенних рейсах 2010–2012 гг. приведены на рис. 4.

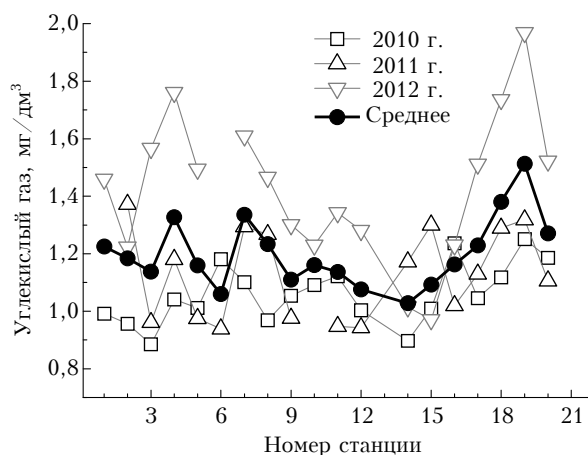


Рис. 4. Пространственное распределение концентрации углекислого газа в поверхностном слое воды пелагиали Байкала в 2010–2012 гг.

Оценивая межгодовые различия, следует отметить, что минимальные концентрации CO₂ наблюдались в 2010 г., а максимальные в 2012 г. Расчет средней концентрации CO₂ по всем станциям пелагиали показывает, что в 2010 г. содержание его было около 1,10 мг/дм³, в 2011-м — около 1,13 мг/дм³, в 2012-м — 1,41 мг/дм³.

В пространственном распределении углекислого газа для разных лет измерений можно проследить определенные закономерности: тенденция снижения концентрации от центра южного Байкала к началу северной котловины и затем хорошо выраженный рост, особенно ярко эта характерная особенность проявилась в 2012 г.

Обратим внимание, что в 2012 г. наблюдались самые высокие значения температуры (см. рис. 2) и концентрации углекислого газа в поверхностном слое воды (см. рис. 4). Этот факт обусловлен поступлением CO₂ к поверхности из нижележащих горизонтов под действием вертикального обмена в период развития весенней конвекции, интенсивность которой имеет сезонный максимум при температуре воды 3,6–4,0 °C [16].

На рис. 5 приведены осредненные по всем станциям концентрации углекислого газа и кислорода в верхнем 200-метровом слое воды. Видим, что концентрация CO₂, по данным наблюдений 2012 г., достоверно превышает значения, зарегист-

рированные в 2010 и 2011 гг. Обратная картина хорошо проявляется для вертикального распределения растворенного кислорода.

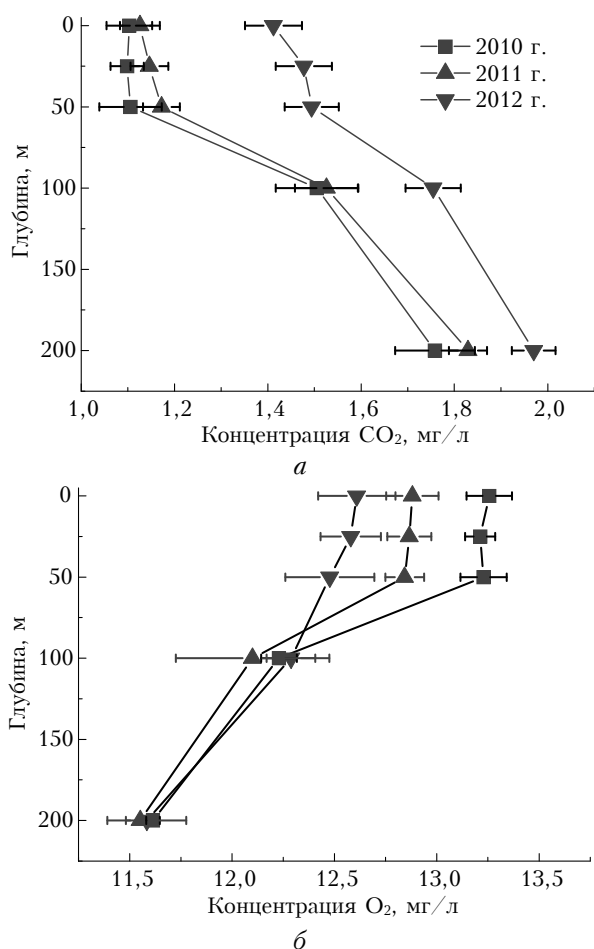


Рис. 5. Вертикальное распределение средней по всем станциям концентрации углекислого газа (а) и кислорода (б) в оз. Байкал в весенний период 2010–2012 гг.

Биомасса фитопланктона. На рис. 6 для трех весенних экспедиций представлены результаты измерения биомассы фитопланктона в верхнем 25-метровом слое воды. Следует отметить, что в каждом рейсе от станции к станции наблюдаются заметные вариации величины биомассы водорослей (в 2–5 раз), что вполне ожидаемо, поскольку для фитопланктона Байкала характерно неоднородное пространственное распределение по акватории озера [9, 17].

Совершенно различны для каждого из трех лет особенности пространственного распределения биомассы в пелагиали Байкала (рис. 6). В период рейса 2010 г. было отмечено практически постоянное снижение биомассы от юга к северу. Весной 2011 г. наблюдались высокие концентрации фитопланктона в южной и средней котловинах Байкала и существенно низкие биомассы на севере. В 2012 г., напротив, отмечалось сравнительно равномерное распределение количественных показателей фитопланктона. Формальная оценка средней концентрации фитопланктона по всей пелагиали (простое суммирова-

ние по станциям) показывает, что наибольшее содержание фитопланктона в воде Байкала наблюдалось в 2010 г. — около 620 мкг/м³, наименьшее в 2011 г. — 190 мкг/м³, в 2012 г. биомасса была около 570 мкг/м³. Очевидно, что подобные вариации средних концентраций биомассы зависят не только от различий погодных условий, изменения температуры и содержания биогенных элементов в разные годы, но и от собственных межгодовых ритмов фитопланктона, для которых на Байкале характерно определенное чередование лет с разной продуктивностью [17].

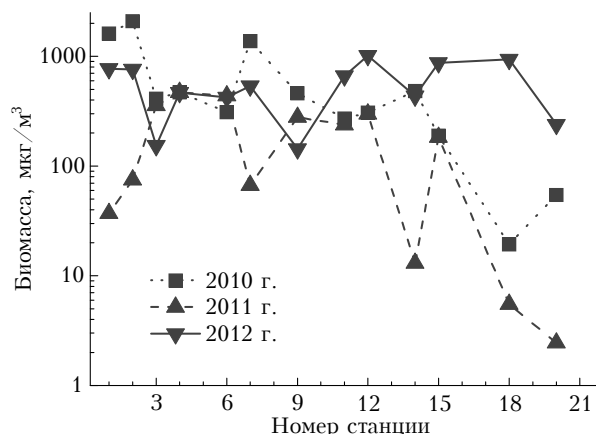


Рис. 6. Пространственное распределение биомассы фитопланктона в верхнем 25-метровом слое воды пелагиали Байкала в 2010–2012 гг.

Разность парциального давления ΔP_{CO_2} в системе «атмосфера–вода» (направление потока). Прежде чем приступить к описанию пространственного распределения разности парциального давления углекислого газа между поверхностной водой и атмосферой (рис. 7), напомним, что измерения в поверхностной воде с использованием эквалибратора и в приводной атмосфере осуществляются одним газоанализатором (LiCOR-840), что позволяет избежать возможных систематических ошибок при расчете ΔP_{CO_2} .

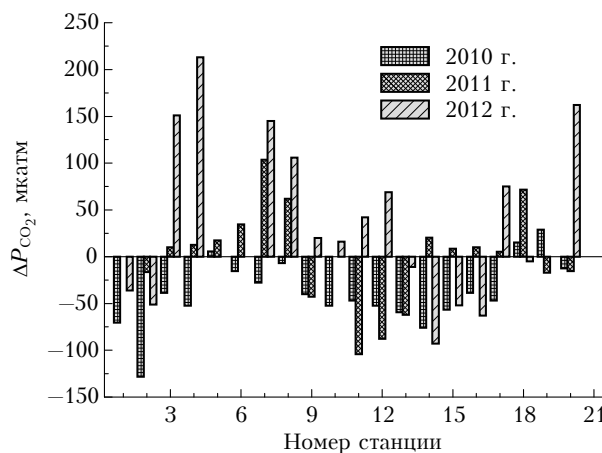


Рис. 7. Пространственное распределение разности парциального давления в системе «атмосфера–вода» в пелагиали Байкала в весенний период 2010–2012 гг.

Как видим, в июне 2010 г. на большинстве станций в пелагиали озера наблюдался сток углекислого газа из атмосферы (разность парциальных давлений CO_2 между водой и атмосферой имеет отрицательное значение) и лишь на двух станциях в северной оконечности озера поток был направлен из воды в атмосферу (небольшие положительные значения ΔP_{CO_2}). В 2011 г. пространственная картина потоков более сложная: отмечаются практически нулевые значения потоков на юге озера и рост положительных значений ΔP_{CO_2} (поток в атмосферу) при переходе из южной котловины Байкала в среднюю. На станциях № 8–13 зарегистрирован отчетливо выраженный сток CO_2 на водную поверхность. В северной котловине величина ΔP_{CO_2} положительна или близка к нулю (слабый поток в атмосферу). В 2012 г. сток CO_2 на поверхность озера отмечен только на южной оконечности озера и в северной части на станциях № 13–16.

Обсуждение результатов

Подчеркнем, что в зимне-весенние месяцы 2010–2012 гг. в регионе наблюдались весьма контрастные погодные ситуации, которые во многом определили характер гидрологических и биологических процессов в воде пелагиали Байкала во время проведения экспедиций.

Анализ показывает, что, несмотря на большую межгодовую изменчивость, в весенние периоды наблюдается определенная устойчивость пространственного распределения некоторых из рассматриваемых характеристик. Наиболее слабо межгодовая изменчивость проявляется в распределении концентрации биогенных элементов – кремния и нитратов (см. рис. 3). Следует отметить, что проявляются и относительно воспроизводимые для каждого года черты пространственного изменения температуры воды поверхности озера и содержания в ней углекислого газа (см. рис. 2 и 4). В свою очередь, в распределении биомассы фитопланктона и разности парциальных давлений CO_2 между водой и атмосферой в пелагиали в весенние периоды 2010–2012 гг. наблюдается совершенно разный характер пространственной картины (см. рис. 6 и 7).

Ниже приведены рассчитанные значения коэффициентов линейной корреляции r_{BA} между величинами биомассы фитопланктона и разности парциального давления углекислого газа ΔP_{CO_2} для всех станций в пелагиали оз. Байкал в весенний период.

2010 г.	2011 г.	2012 г.
–0,7	–0,5	–0,6

Учитывая, что данные получены в ограниченный отрезок времени на станциях, которые разнесены между собой на значительные расстояния, фактически мы имеем дело с «разовыми» замерами ΔP_{CO_2} и биомассы фитопланктона. Процессы, определяющие величину разности парциального давления CO_2 и массовой концентрации фитопланктона, име-

ют различный пространственный масштаб (напомним о «пятнистом» распределении фитопланктона (см. рис. 6). Отсюда следует, что ожидать наличия очень тесной корреляционной связи между рассматриваемыми величинами всего для 20 точек априорно не приходится. Тем не менее видно, что для разных лет наблюдений значимо проявляется отрицательная корреляционная связь биомассы фитопланктона и параметра ΔP_{CO_2} , т.е. с возрастанием величины биомассы разность парциального давления между водой и атмосферой уменьшается.

Для того чтобы оценить пространственное распределение биомассы и разности парциального давления CO_2 в системе «атмосфера–вода» в пелагиали Байкала и характерные черты их взаимосвязи, были рассчитаны средние значения этих величин в соответствующих котловинах озера для массивов данных 2010–2012 гг. (рис. 8).

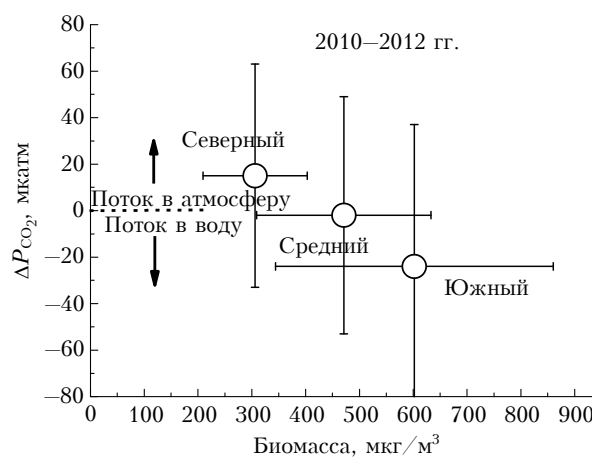


Рис. 8. Зависимость величины разности парциального давления углекислого газа в системе «атмосфера–вода» от биомассы фитопланктона в трех котловинах Байкала в весенний период 2010–2012 гг. (средние величины и СКО)

Как следует из рис. 6–8, диапазон вариаций исследуемых характеристик в анализируемых массивах данных весьма значителен, но в целом можно полагать, что с повышенной вероятностью в весенний период будут реализовываться ситуации, в которых в пелагиали южной котловины Байкала наибольшее содержание фитопланктона будет обуславливать сток CO_2 из атмосферы и, наоборот, в северной части озера, обедненного фитопланктоном, определит его выход с поверхности воды. В средней котловине Байкала потоки, по-видимому, будут близки к нулю.

Заключение

Впервые удалось сопоставить количественные данные по биомассе фитопланктона в верхнем слое воды с разностью парциального давления углекислого газа в системе «атмосфера–вода», которая определяет знак и амплитуду потока. Экстремально различные погодные ситуации в зимне-весенние периоды 2010–2012 гг. в регионе позволяют предположить, что на основе проанализированных данных были получены представления о достаточно

широком диапазоне межгодовой изменчивости рассматриваемых характеристик. Действительно, несмотря на близкие сроки проведения экспедиций, работы были выполнены в разные фазы температурного режима и перемешивания вод в пелагиали озера. Измерения 2010 г. пришлось на еще зимнюю (обратную) температурную стратификацию, в 2011 г. был период начала активного вертикального перемешивания, а в 2012 г. уже наблюдался переход к прямой стратификации. В 2010 г. обратная стратификация и большая биомасса фитопланктона привели к обеднению верхнего слоя воды CO₂. В 2012 г. обогащение верхнего слоя воды углекислым газом, поступающим из нижележащих слоев, обусловленное существованием весенней гомотермии, уже превалировало над потреблением CO₂ в процессе фотосинтеза планктона.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 14-05-00277а), Программы фундаментальных исследований Отделения наук о Земле РАН № 11 и экспедиционных грантов СО РАН

1. Домышева В.М., Сакирко М.В., Пестунов Д.А., Панченко М.В. Экспериментальная оценка стока углекислого газа в системе «атмосфера–вода» в литорали и пелагиали озера Байкал // Докл. РАН. 2010. Т. 431, вып. 6. С. 822–826.
2. Заворуев В.В., Домышева В.М., Шимараев М.Н., Сакирко М.В., Пестунов Д.А., Панченко М.В. Пространственное распределение флуоресцентных характеристик фитопланктона в период формирования весенней гомотермии в оз. Байкал // Оптика атмосф. и океана. 2008. Т. 21, № 5. С. 377–380.
3. Сакирко М.В., Домышева В.М., Бельх О.И., Помазкина Г.В., Шимараев М.Н., Панченко М.В. К оценке пространственной изменчивости направления потоков углекислого газа в разные гидрологические сезоны на озере Байкал // Оптика атмосф. и океана. 2009. Т. 22, № 6. С. 596–699.
4. Сакирко М.В., Панченко М.В., Домышева В.М., Пестунов Д.А. Суточные ритмы концентрации диоксида углерода в приземном слое воздуха и в поверхностной воде оз. Байкал в разные гидрологические сезоны // Метеорол. и гидрол. 2008. № 2. С. 79–86.
5. Руководство по химическому анализу поверхностных вод суши. Л.: Гидрометеоиздат, 2009. 1032 с.
6. Wanninkhof R. Relationship between wind speed and gas exchange over the ocean // J. Geophys. Res. C. 1992. V. 97, N 5. P. 7373–7382.
7. Панин Г.Н. Тепло- и массообмен между водоемом и атмосферой в естественных условиях. М.: Наука, 1985. 206 с.
8. Goulden M.L., Munger J.W., Fan S.M., Daube B.C., Wofsy S.C. Measurements of carbon storage by long-term eddy correlation: Methods and a critical evaluation of accuracy // Glob. Change Biol. 1996. V. 2, N 3. P. 169–182.
9. Popovskaya G.I. Ecological monitoring of phytoplankton in Lake Baikal // Aquatic Ecosystem Health and Management. 2000. N 3. С. 215–225.
10. Поповская Г.И., Усольцева М.В., Фирсова А.Д., Лихошвай Е.В. Оценка состояния весеннего фитопланктона в озере Байкал // География и природные ресурсы. 2008. № 1. С. 83–88.
11. Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Иноуёе Г., Краснов О.А., Максюттов Ш., Мачида Т., Фофанов А.В., Шимоляма К. Пространственная и временная изменчивость концентрации CO₂ и CH₄ в приземном слое воздуха на территории Западной Сибири // Оптика атмосф. и океана. 2009. Т. 22, № 2. С. 183–192.
12. Аршинова В.Г., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Белан С.Б., Ивлев Г.А., Рассказчикова Т.М., Симоненков Д.В., Фофанов А.В. Пространственное распределение малых примесей воздуха в котловине озера Байкал // Оптика атмосф. и океана. 2012. Т. 25, № 7. С. 613–620.
13. Вотинцев К.К., Верболова Н.В., Меццержакова А.И. Горизонтальное распределение некоторых компонентов в верхнем слое воды озера Байкал // Гидрохимические исследования озера Байкал. М.: Изд-во АН СССР, 1963. С. 95–112.
14. Кожов М.М. Биология озера Байкал. М.: Изд-во АН СССР, 1962. 315 с.
15. Мизандронцев И.Б., Горбунова Л.А., Домышева В.М., Мизандронцева К.Н., Шимараев М.Н. Газообмен Байкала с атмосферой в период весеннего прогрева // География и природные ресурсы. 1996. № 1. С. 74–84.
16. Верещагин Г.Ю. Основные черты вертикального распределения динамики водных масс на Байкале // Юбил. сб. памяти акад. В.И. Вернадского. Л.: Изд-во АН СССР, 1936. Ч. 2. С. 1207–1230.
17. Вотинцев К.К., Меццержакова А.И., Поповская Г.И. Круговорот органического вещества в озере Байкал. Новосибирск: Наука, 1975. 189 с.
18. Байкал: природа и люди: Энциклопедический справочник / Отв. ред. чл.-корр. А.К. Тулохонов. Улан-Уда: Изд. дом. «ЭКОС»; Изд-во БНЦ СО РАН, 2009. 608 с.
19. Шимараев М.Н., Троицкая Е.С., Домышева В.М. Интенсивность вертикального обмена в отдельных котловинах Байкала // География и природные ресурсы. 2003. № 3. С. 68–73.
20. Домышева В.М., Шимараев М.Н., Горбунова Л.А., Голобокова Л.П., Коровякова И.В., Жданов А.А., Цехановский В.В. Кремний в озере Байкал // География и природные ресурсы. 1998. № 4. С. 73–81.

V.M. Domysheva, M.V. Usol'tseva, M.V. Sakirko, D.A. Pestunov, M.N. Shimaraev, G.I. Popovskaya, M.V. Panchenko. Spatial distribution of carbon dioxide fluxes, nutrients and phytoplankton biomass in the pelagic zone of Lake Baikal in spring 2010–2012.

The paper presents the results of measurements of concentrations of oxygen, biogenic elements, phytoplankton biomass and partial pressure of carbon dioxide in water and near-water atmosphere in the pelagic zone of Lake Baikal in June 2010–2012. The contrast weather conditions were observed in the region in winter and spring 2010–2012, which determined the behavior of hydrological and biological processes in the pelagic water zone of Baikal. The radical difference in weather conditions before expeditions of 2010–2012 made it possible to estimate a wide range of variability of the characteristics under study and to analyze their role in formation of fluxes at different stages of spring warming on the basis of three data arrays. The quantitative characteristics of phytoplankton biomass are compared with the difference of partial pressure of carbon dioxide in the air–water system.