

М.В. Панченко^{1,2}, В.М. Домышева³, Д.А. Пестунов¹,
М.В. Сакирко³, В.В. Заворуев⁴, А.Л. Новицкий³

Экспериментальные исследования процессов газообмена CO₂ в системе «атмосфера – водная поверхность» оз. Байкал (постановка эксперимента)

¹Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск

²Томский государственный университет

³Лимнологический институт СО РАН, г. Иркутск

⁴Институт вычислительного моделирования СО РАН, г. Красноярск

Поступила в редакцию 29.01.2007 г.

Описываются основные методические вопросы проведения комплексных экспериментов по изучению процессов газообмена между атмосферой и водной поверхностью Байкала для периода открытой воды, и кратко представлены полученные на сегодняшний день наиболее интересные результаты.

Введение

Соединения углерода и их круговорот в земной системе являются главными факторами, определяющими производство биомассы на суше и в Мировом океане. Сам цикл углерода тесно связан с климатом и теми изменениями, которые происходят в природной среде.

Углеродсодержащие газы, такие как углекислый газ и метан, являются одними из наиболее важных парниковых газов, и в свою очередь вариации их содержания в атмосфере могут оказывать существенное влияние на изменение радиационного баланса планеты.

В настоящее время в проблеме климатических изменений наиболее дискуссионным является вопрос о причинах наблюдаемого неуклонного роста концентрации углекислого газа в атмосфере и его влияния на глобальное потепление.

Это обстоятельство заставило сосредоточить основное внимание на процессах регионального масштаба и на поиске ранее неучтенных природных и антропогенных источников и стоков, определяющих газообмен в системе «атмосфера – подстилающая поверхность» [1].

В гидросфере основной объем исследований сосредоточен на изучении газообмена между атмосферой и Мировым океаном, а сведения об этих процессах в атмосфере над пресными водоемами весьма ограничены [2–4].

Озеро Байкал является одним из уникальных природных объектов Сибири, который во многом определяет состояние природной среды региона [5–10].

Применительно к проблемам изучения цикла углерода и его составляющих выбор Байкала как объекта исследования позволяет выйти далеко за рамки региональных задач, поскольку Байкал является,

на наш взгляд, единственной природной лабораторией, в которой большинство процессов можно выделить в достаточно чистом виде.

Выбрать некий эталон в природных объектах, который бы на протяжении нескольких лет гарантированно сохранял свои внутренние свойства, в настоящее время практически не возможно, поскольку они все находятся под воздействием возрастающей антропогенной нагрузки и постоянного тренда климатических изменений.

В этом отношении вода Байкала является, пожалуй, единственным уникальным исключением. Долительные исследования химического состава воды Байкала показали, что реальные колебания концентраций основных катионов и анионов не выходят за пределы $\pm 1\%$ и, следовательно, вода Байкала может рассматриваться как естественный эталон чистой воды, постоянного состава, «который в ближайшие десятилетия не изменится» [10].

Основываясь на высокой степени чистоты и постоянстве химического состава воды озера Байкал, можно полагать, что здесь основной сезонной и межгодовой переменной является биологическая составляющая.

Исходя из этого, следует, что на Байкале имеется потенциальная возможность достаточно корректно выделить физические, химические и биологические составляющие в сложном процессе газообмена «вода – атмосфера».

Схема комплексного эксперимента

Ранее проведенная серия исследований химического состава поверхностных вод Байкала в разных районах позволила ответить на ряд вопросов о сезонной и отчасти суточной изменчивости содержания

CO₂ в воде [5–9]. Применительно к процессам газообмена отсутствие непосредственных атмосферных измерений и недостаточная комплексность экспериментов серьезно ограничивают возможности использования их результатов для количественных оценок.

Для решения этой задачи в 2002 г. на побережье Байкала была начата серия комплексных экспериментов по исследованию процессов газообмена углекислого газа в системе «водная поверхность – атмосфера».

Для проведения измерений было выбрано западное побережье Южного Байкала в районе пос. Большие Коты. Этот участок территории по данным ранее проведенной серии измерений аэрозольно-газовых характеристик атмосферы вполне может рассматриваться как «фоновый». Непосредственно весь экспериментальный комплекс размещается на стационаре Лимнологического института СО РАН.

Наблюдения проводятся измерительными циклами продолжительностью 2–3 нед в разные гидрологические сезоны. Выбор режима измерений продиктован следующими соображениями. С одной стороны, в этот период укладывается чередование нескольких синоптических циклов, температурный режим воды не претерпевает больших изменений и, следовательно, можно рассчитывать на получение репрезентативных данных для конкретного гидрологического сезона. С другой стороны, короткая серия измерений позволяет минимизировать материальные затраты.

Учитывая точностные характеристики имеющейся аппаратуры и то, что над холодной водной поверхностью турбулентный обмен намного ниже, чем над сушей, из возможных способов измерения потоков CO₂ предпочтение было отдано методу накопительных камер.

На рис. 1 представлены отработанная схема эксперимента 5, камеры и их место размещения (1, 2, 3, 11), ряд приборов (4, 7, 10, 12) и общий вид выносного пункта обсерватории 6, в котором находится регистрирующая аппаратура.

На поверхности воды на расстоянии около 30 м от берега размещены две плавающие полупогруженные камеры 1, 11 (рис. 1). Одна из камер постоянно закрыта, другая обеспечена устройством для автоматического проветривания. Измерения концентрации углекислого газа проводятся газоанализатором, состоящим из сенсора, насоса и воздушных 3-позиционных клапанов. Отбор газа осуществляется поочередно из трех точек и по трубкам доставляется в газоанализатор. По первому каналу поступает воздух непосредственно из атмосферы (высота точки отбора 1 м над поверхностью воды), а по двум другим каналам – из измерительных камер.

Управление режимом проветривания камеры, переключения воздушных клапанов для опроса измерительных каналов и регистрация данных осуществляются ЭВМ.

Для контроля содержания CO₂ в воде [11] непосредственно в камере размещается плавающий электрод рН-метра «Эксперт», показания которого также поступают на ЭВМ. Оцифровка сигнала газоанализатора и опрос датчика рН происходят с час-

тотой 100 Гц. При обработке сигналов проводится усреднение по 1000 отсчетов.

Химический анализ воды проводится в полевой лаборатории, расположенной на берегу. Здесь измеряются величина рН, концентрация растворенного кислорода, гидрокарбоната, нитрата и фосфата. Измерения активности ионов H⁺ выполняются рН-метром «Эксперт» с точностью 0,02, кислорода – по Винклеру с относительной ошибкой 0,3%, гидрокарбоната – потенциометрическим методом (относительная ошибка 1%). Концентрацию нитрата и фосфата определяли фотометрическими методами с относительной ошибкой 4 и 1,5% соответственно. По результатам измерений величины рН и концентрации гидрокарбоната рассчитывается содержание CO₂ в воде [11].

Часть проб воды фиксируется для последующего биологического анализа, и их обработка осуществляется после экспедиции специалистами Лимнологического института СО РАН.

Очевидно, что в изменении концентрации углекислого газа, кислорода и биогенных элементов в воде ключевую роль играет процесс фотосинтеза фитопланктона. В то же время классические методы учета биомассы планктонных водорослей и измерения интенсивности фотосинтеза весьма трудоемки, длительны по времени, что является серьезным препятствием для их применения в мониторинговом режиме. Отчасти их могут заменить соответствующие экспрессные методики флуоресцентного анализа [12]. С 2004 г. нами были начаты регулярные измерения флуоресцентных характеристик проб воды.

Отработка методики эксперимента

Методика оценки потоков

Предварительные эксперименты показали, что выбранный нами способ размещения камер на поверхности воды хорошо работает практически во всех погодных условиях, кроме штормовых ситуаций, в которых возможно неконтролируемое проветривание камер на большой волне.

Поток вычисляется исходя из скорости изменения концентрации углекислого газа в камере за определенный промежуток времени

$$F = \frac{\Delta C}{\Delta t} \frac{V_{\text{cham}}}{S_{\text{cham}}}. \quad (1)$$

Здесь $\Delta C/\Delta t$ – изменение концентрации углекислого газа в камере за отрезок времени Δt ; V_{cham} – объем воздуха в камере над водной поверхностью; S_{cham} – площадь основания камеры.

Первые измерения нами проводились только с закрытой камерой 5. Пример суточного хода изменения концентрации углекислого газа в закрытой камере, приводной атмосфере и рН поверхностной воды показан на рис. 2, где хорошо проявляются внутрисуточные ритмы изменчивости процесса газообмена. В то же время при такой постановке измерений корректная оценка потока возможна только на линейных участках кривой.

Для того чтобы увеличить временное разрешение измерения потоков, с 2004 г. в схему эксперимента была введена вторая камера, которая работает в режиме регулярного автоматического проветривания (см. 2 и 3 на рис. 1). На рис. 3 представлен пример регистрации сигналов из двух камер (рис. 3, *а* — период выхода углекислого газа с водной поверхности, а рис. 3, *б* — во время стока).

Как следует из рис. 3, после проветривания камеры в зависимости от знака потока наблюдаются рост (рис. 3, *а*) или спад (рис. 3, *б*) концентрации углекислого газа в камере.

Таким образом, применение проветриваемой камеры позволяет в каждом цикле провести оценку направления потоков. Необходимо отметить, что в случае слабовыраженных потоков (как правило, в холодный период года) добиться часового разрешения не удастся и приходится увеличивать период нахождения камеры в закрытом состоянии.

Отработка методики забора проб воды

Проведение экспериментов в непосредственной близости к береговой линии поставило ряд вопросов о репрезентативности данных, получаемых из химического анализа воды. В какой мере пробы поверхностной воды, забираемые вблизи места установки камер, могут быть отягощены локальными воздействиями и в какой мере эти данные могут быть распространены на другие прибрежные участки в литорали озера?

Для того чтобы контролировать возможное воздействие локальных процессов в точке измерения потоков углекислого газа, была выбрана следующая методика организации забора проб. Пробы поверхностной воды отбираются из слоя толщиной 1–2 см каждые 3 ч в двух точках (моменты взятия пробы и устройства для сбора поверхностной воды показаны на рис. 1 (9, 10)). Одна точка отбора выбрана непосредственно вблизи места установки камер на расстоянии 20–30 м от берега (глубина 1,5–2 м), а другая на расстоянии 100 м (глубина 5 м) от береговой линии.

Полный химический и флуоресцентный анализ воды проводится для каждой пробы в течение всего периода наблюдений. На рис. 4 представлен фрагмент временной развертки одного из циклов одновременного измерения концентраций O_2 и CO_2 , а на рис. 5 — корреляционная диаграмма значений коэффициента фотосинтетической активности (КФА) на ближней и дальней точках.

Видно, что между различными характеристиками поверхностной воды на двух разнесенных точках наблюдается хорошая связь. Подобное соответствие ритмов вариаций характеристик воды для двух точек пробоотбора хорошо воспроизводится во всех измерительных сезонах. Отсюда следует, что измерения в месте расположения камер достаточно достоверно отражают характер временной изменчивости химического состава воды в литорали озера и, следовательно, имеется реальная возможность корректно параметризовать процесс газообмена в системе «водная поверхность — атмосфера» с изменением состава воды.

Основные результаты

Учитывая обзорный характер статьи, кратко опишем наиболее интересные результаты, полученные на сегодняшний день.

Суточные ритмы газообмена для разных гидрологических сезонов

Прежде всего, отметим, что суточные ритмы изменения амплитуды и знака потоков углекислого газа достаточно хорошо проявляются практически во всех сериях измерений (см. рис. 2) [13, 14]. Для сравнения суточных ритмов в разных гидрологических сезонах предварительно была проведена следующая обработка данных. Для того чтобы снизить влияние межсуточной изменчивости, мы воспользовались следующим приемом. Сначала вычислялось среднее значение рассматриваемой величины для каждого суток. Далее каждое измеренное внутри данных суток значение нормировалось на соответствующее среднее. Такая обработка позволяет снизить вариации анализируемых характеристик, под воздействием внешних факторов, которые не связаны с суточным ритмом (например, таких как смены воздушных масс или же нагонов воды с пелагиали озера и т.п.).

Рассмотрим результаты сравнения суточных ходов углекислого газа для разных гидрологических сезонов в приводной атмосфере (рис. 6). На рис. 6, *а* приведены данные, полученные в измерительной камере, а на рис. 6, *б* — на уровне 1 м от поверхности воды в открытой атмосфере. Для каждого из анализируемых сезонов характерен хорошо выраженный внутрисуточный ритм изменчивости анализируемых характеристик.

Прежде всего, обратим внимание на то, что размах суточных колебаний в камере достигает $\pm 13\%$ от среднесуточного значения, в то время как в приводной атмосфере его амплитуда не превышает $\pm 5\%$. Очевидно, какая-то доля внутрисуточного изменения CO_2 в приводной атмосфере может быть и не связана непосредственно с процессом газообмена между водной поверхностью и атмосферой, а обусловлена влиянием, например, прибрежной растительности.

Даже если полностью отнести вариации углекислого газа в приводной атмосфере на иные процессы, то и в этом грубом приближении видим, что более 70% внутрисуточной амплитуды изменчивости концентрации газа в полупогруженной камере определяется именно газообменом с водной поверхностью (подчеркнем, что атмосфера в камере практически изолирована от прямого поступления внешнего воздуха).

При переходе от зимнего к летнему сезону, по мере прогрева озера и соответствующего увеличения длительности инсоляции наблюдается рост амплитуды суточных колебаний исследуемых характеристик как в поверхностной воде, так и в приводном слое атмосферы.

Наибольшие амплитуды наблюдаются в период гидрологического лета с июня по сентябрь включительно. Осенью происходит обратный процесс [15].

Такой суточный ход исследуемых характеристик и изменение их амплитуд в разные гидрологические сезоны позволяют заключить, что ведущую роль играют биологические процессы, происходящие в озере.

Суточный ход газообмена и его связь с фотосинтезом

В кинетике медленной индукции флуоресценции хлорофилла выделим две стадии [12]. После включения возбуждающего излучения в течение 3–10 мин наблюдается выход флуоресцентного сигнала на стационарный уровень F_s . Величина сигнала на стационарном уровне связана с физиологическим состоянием фитопланктона. Далее в исследуемую пробу добавляется разобщитель электронно-транспортной цепи, например диурон, и интенсивность флуоресценции возрастает до максимального уровня F_d , который в меньшей степени зависит от активности фотосинтетического аппарата. Оценка интенсивности протекания фотосинтеза проводится с помощью КФА, который рассчитывают по следующей формуле [12]:

$$\text{КФА} = (F_d - F_s) / F_d. \quad (2)$$

Нулевое значение КФА свидетельствует о прекращении фотосинтеза, а значения 0,7–0,8 характерны для лабораторных культур водорослей, растущих в оптимальных условиях.

На рис. 7 приведен суточный ход потока углекислого газа, а на рис. 8 – суточный ход коэффициента фотосинтетической активности, концентрации углекислого газа и биомассы в поверхностной воде.

Отметим, что максимум коэффициента фотосинтетической активности наблюдается около 9 ч утра, а минимум приходится на период 15–18 ч. Такой же ход характерен и для концентрации углекислого газа в воде. Соответственно поток углекислого газа в системе «атмосфера – водная поверхность» находится в противофазе. По сравнению с ночным периодом содержание биомассы практически удваивается и достигает своих максимальных значений к 12 ч.

Отсюда следует, что к утренним часам, когда в поверхностном слое воды накапливается максимальное содержание углекислого газа, обусловленное биохимическими процессами (дыханием) и деструкцией органического вещества, наблюдается и максимальная активность фотосинтеза.

Далее, при усилении инсоляции, прогреве верхней пленки воды и еще высоких значениях КФА в этом слое наблюдается и рост биомассы. Активное поглощение углекислого газа фотосинтетиками приводит к тому, что его содержание в слое начинает быстро убывать. Поток CO_2 из атмосферы не успевает компенсировать расход углекислого газа, потребляемого фотосинтезирующими организмами, и к 15 ч его концентрация в воде достигает минимальных значений. Дальнейший прогрев и обеднение поверхностного слоя воды углекислым газом в послеполуденное время обуславливают перемещение фотосинтезирующих организмов в нижние слои воды, более богатые CO_2 [16].

Выводы

Суммируя результаты синхронных измерений содержания углекислого газа в приводной атмосфере и в поверхностном слое воды для разных гидрологических сезонов на Байкале, можно сделать следующие основные выводы.

Для каждого из анализируемых сезонов характерен хорошо выраженный внутрисуточный ритм изменчивости анализируемых характеристик. Наибольшие амплитуды наблюдаются в период гидрологического лета.

Результаты комплексного анализа суточного хода газообмена CO_2 в системе «атмосфера – водная поверхность» оз. Байкал объективно доказывают, что скорости метаболических реакций фитопланктона превышают скорости физических процессов. Полученные данные свидетельствуют также о том, что чисто физические механизмы процесса газообмена в свою очередь лимитируют фотосинтетическую активность планктонных организмов.

В заключение отметим, что начатые исследования, с одной стороны, поставили большое количество новых мультидисциплинарных задач, для которых мы пока не имеем решений, с другой стороны – первые результаты вселяют уверенность в том, что истинно природная лаборатория – Байкал – позволит ответить на многие вопросы о газообмене между атмосферой и пресной водой.

Авторы выражают глубокую благодарность директору ЛИН СО РАН академику М.А. Грачеву, замдиректора по научной работе ЛИН СО РАН д.г.н. Т.В. Ходжер, директору ИОА СО РАН д.ф.-м.н. Г.Г. Матвиенко и замдиректора по научной работе ИОА СО РАН д.ф.-м.н. Б.Д. Белану за постоянное внимание, большую помощь в проведении экспериментальных работ и активное участие в создании на базе двух институтов Байкальской атмосферно-лимнологической обсерватории.

А также авторы признательны сотрудникам Лимнологического института СО РАН к.б.н. О.И. Белых и к.б.н. Г.И. Поповской, совместно с которыми сделан ряд интересных работ и публикаций, сотрудникам ИОА СО РАН В.П. Шмаргунову и А.Г. Тумакову, которые внесли большой вклад в разработку и изготовление аппаратуры, Н.Н. Макарову – бесценному участнику экспедиций и всем участникам экспедиций, делившим с нами все трудности и радости работ на Байкале.

Работа выполнена при частичной поддержке Программы фундаментальных исследований № 13 «Формирование водных ресурсов, прогноз режима и качества вод с учетом изменения климата и развития экономики», а также ежегодных экспедиционных грантов СО РАН «Байкал».

1. *Изменение климата*, 2001 г.: Обобщенный доклад. Вклад рабочих групп 1, 2 и 3 в подготовку III доклада об оценке межправительственной группы экспертов по изменению климата. ВМО, ЮНЕП. Норвегия: Изд-во студии дизайна «ГРИД-Арендал», 2003. 219 с.

2. Portielje R., Lijkema L. Carbon dioxide fluxes across the air-water interface and its impact on carbon availability in aquatic system // *Limnol. and Oceanogr.* 1995. V. 40. N 4. P. 690–699.
3. Wanninkhof R., Knox M. Chemical enhancement of CO₂ exchange in natural water // *Limnol. and Oceanogr.* 1996. V. 41. N 4. P. 689–697.
4. Cole J.J., Caraco N.F. Atmospheric exchange of carbon dioxide in a low-wind oligotrophic lake measured by addition of SF₆ // *Limnol. and Oceanogr.* 1998. V. 43. N 4. P. 647–656.
5. Мизандронцев И.Б., Горбунова Л.А., Домышева В.М., Мизандронцева К.Н., Шимараев М.Н. Газообмен Байкала с атмосферой в период весеннего прогрева // *Геогр. и природ. ресурсы.* 1996. № 2. С. 74–84.
6. 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.
7. Мизандронцев И.Б., Домышева В.М., Мизандронцева К.Н. Суточный ход интенсивности газообмена оз. Байкал с атмосферой // *Водные ресурсы.* 2003. Т. 30. № 3. С. 289–296.
8. Мизандронцев И.Б., Домышева В.М., Мизандронцева К.Н., Томас К. О суточной динамике концентраций свободной углекислоты и кислорода в воде Байкала // *Геогр. и природ. ресурсы.* 2002. № 1. С. 73–78.
9. 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.
10. Грачев М.А., Домышева В.М., Ходжер Т.В., Коровякова И.В., Голобокова Л.П., Погодаева Т.В., Верещин А.Л., Гранин Н.Г., Гнатовский Р.Ю., Косторнова Т.Я. Глубинная вода озера Байкал – природный стандарт пресной воды // *Химия в интересах устойчивого развития.* 2004. № 12. С. 417–429.
11. Семенов А.Д. Руководство по химическому анализу поверхностных вод суши. Л.: Гидрометеониздат, 1977. 542 с.
12. Корнеев Д.Ю. Информационные возможности метода индукции флуоресценции хлорофилла. Красноярск: Альтерпрес, 2002. 188 с.
13. Домышева В.М., Пестунов Д.А., Панченко М.В., Хохрова О.М., Мизандронцев И.Б., Шмаргунов В.П., Ходжер Т.В., Белан Б.Д. О связи ритмов изменения содержания углекислого газа в приводном слое воздуха и химического состава воды озера Байкал // *Докл. РАН.* 2004. Т. 399. № 6. С. 825–828.
14. Domysheva V.M., Sakirko M.V., Panchenko M.V., Pestunov D.A. The interaction of CO₂ between the atmosphere and surface waters of lake Baikal and the influence of water composition // *NATO Science Series, IV. Earth and Environ. Sci.* 2006. V. 65S. P. 35–45.
15. Домышева В.М., Панченко М.В., Пестунов Д.А., Сакирко М.В. Суточные ритмы концентрации углекислого газа в приводном слое воздуха и в поверхностной воде оз. Байкал в разные гидрологические сезоны // *Метеорол. и гидрол.* 2007 (в печати).
16. Заворюев В.В., Панченко М.В., Домышева В.М., Сакирко М.В., Бельх О.И., Поповская Г.И. Суточный ход газообмена СО₂ и интенсивности фотосинтеза в поверхностной воде оз. Байкал // *Докл. РАН.* 2007 (в печати).

M.V. Panchenko, V.M. Domysheva, D.A. Pestunov, M.V. Sakirko, V.V. Zavoruev, A.L. Novitskii. Experimental studies of CO₂ gas-exchange processes in the system «atmosphere – water surface» of Lake Baikal.

Main problems of the technique for carrying out comprehensive experiments on the study of gas exchange processes between the atmosphere and water surface of Lake Baikal in the period of open water are considered in this paper. The most interesting results available to date are briefly presented.

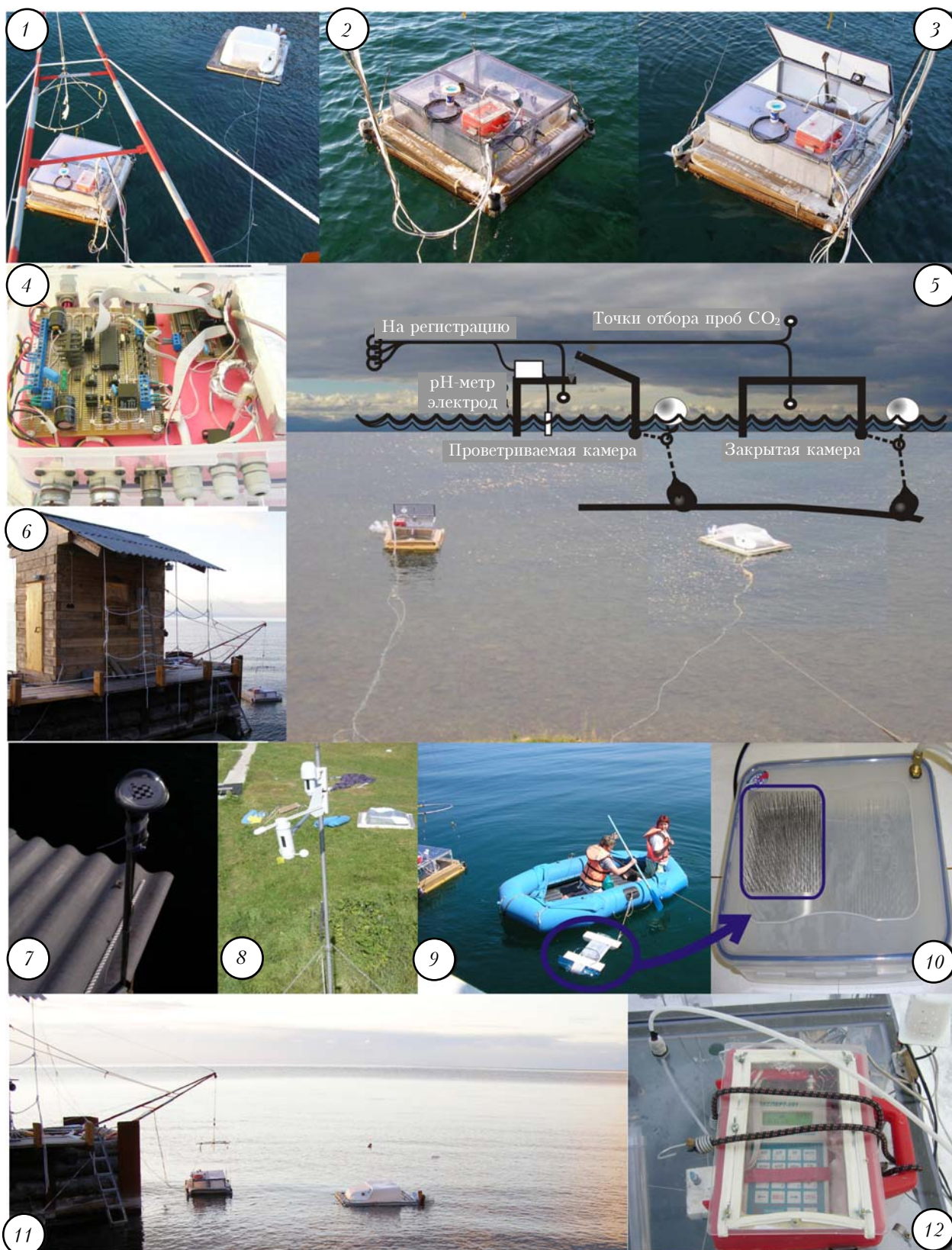


Рис. 1. Основные фрагменты комплексного эксперимента: 1 – подъемное устройство камер при работе с выносного пункта обсерватории; 2 – вентилируемая камера в закрытом состоянии; 3 – вентилируемая камера в период проветривания; 4 – газоанализатор; 5 – схема организации отбора проб воздуха в трех точках; 6 – общий вид выносного пункта обсерватории; 7 – пирометр; 8 – метеомачта; 9 – отбор проб поверхностной воды; 10 – устройство «ежик» для отбора проб поверхностной воды; 11 – камеры в рабочем положении; 12 – размещение рН-метра «Эксперт» на одной из камер

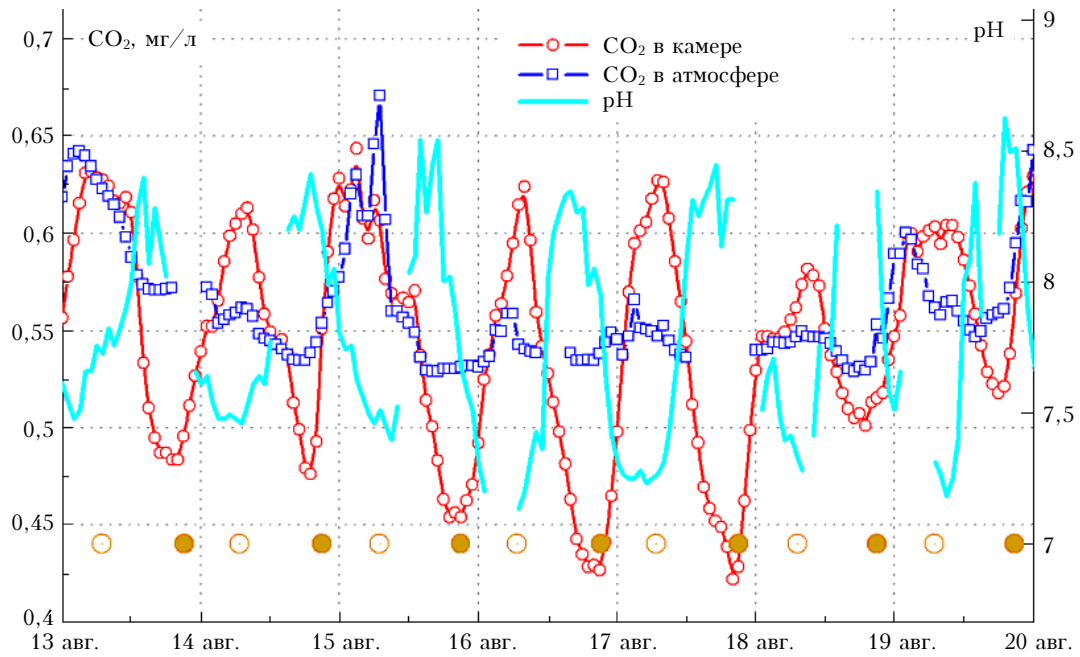


Рис. 2. Пример хода изменения концентрации углекислого газа в закрытой камере, приводной атмосфере и pH поверхностной воды

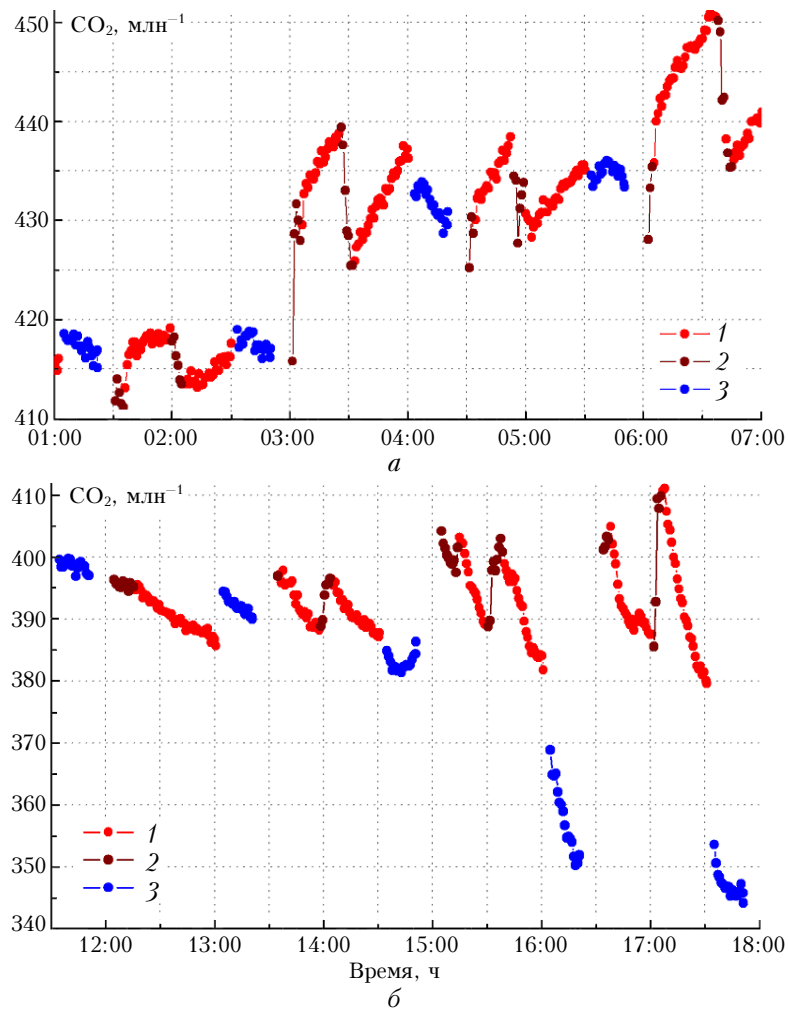


Рис. 3. Фрагмент записи измеряемых сигналов: а – поток CO_2 из воды; б – сток CO_2 на водную поверхность (1 – запись сигнала после закрытия камеры; 2 – сигнал в процессе проветривания камеры; 3 – регистрация сигнала в постоянно закрытой камере)

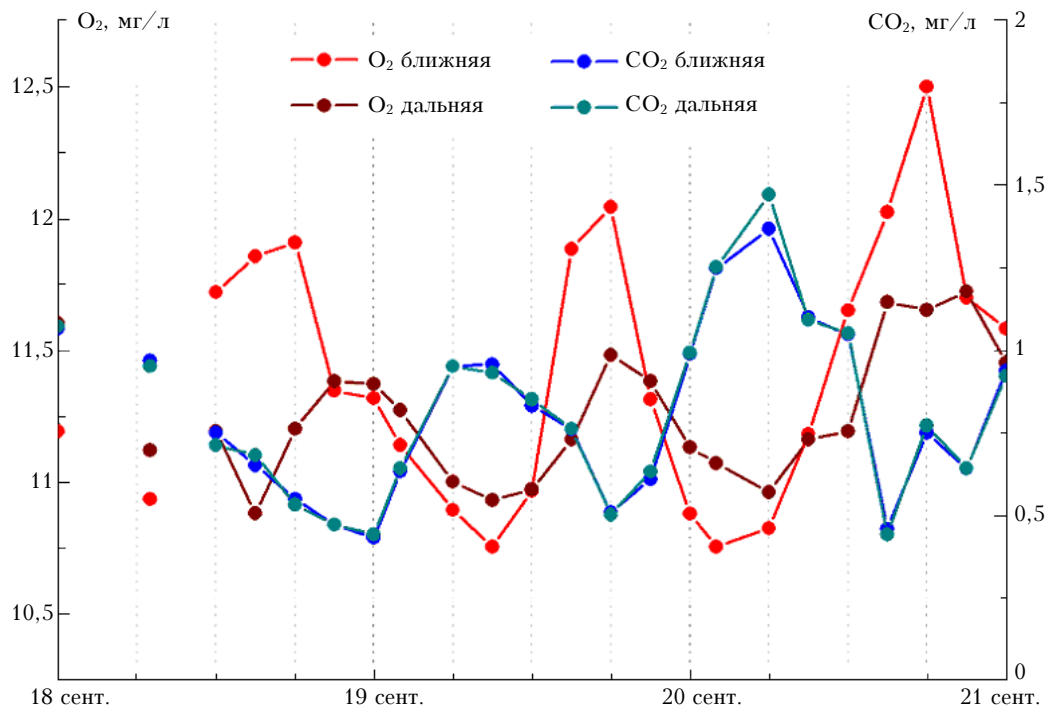


Рис. 4. Сопоставление концентраций углекислого газа и кислорода на ближней и дальней точках пробоотбора

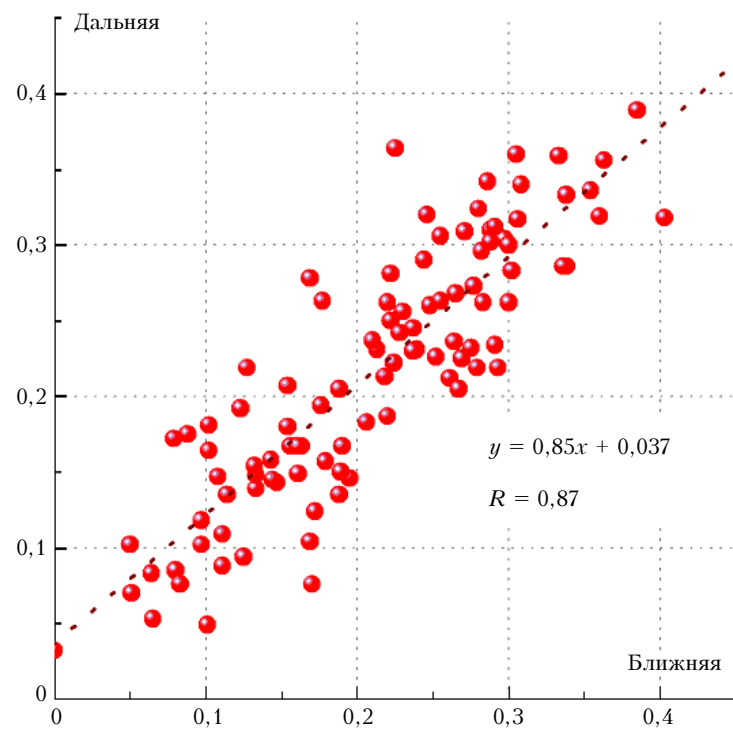


Рис. 5. Корреляция значений коэффициента фотосинтетической активности на ближней и дальней точках пробоотбора

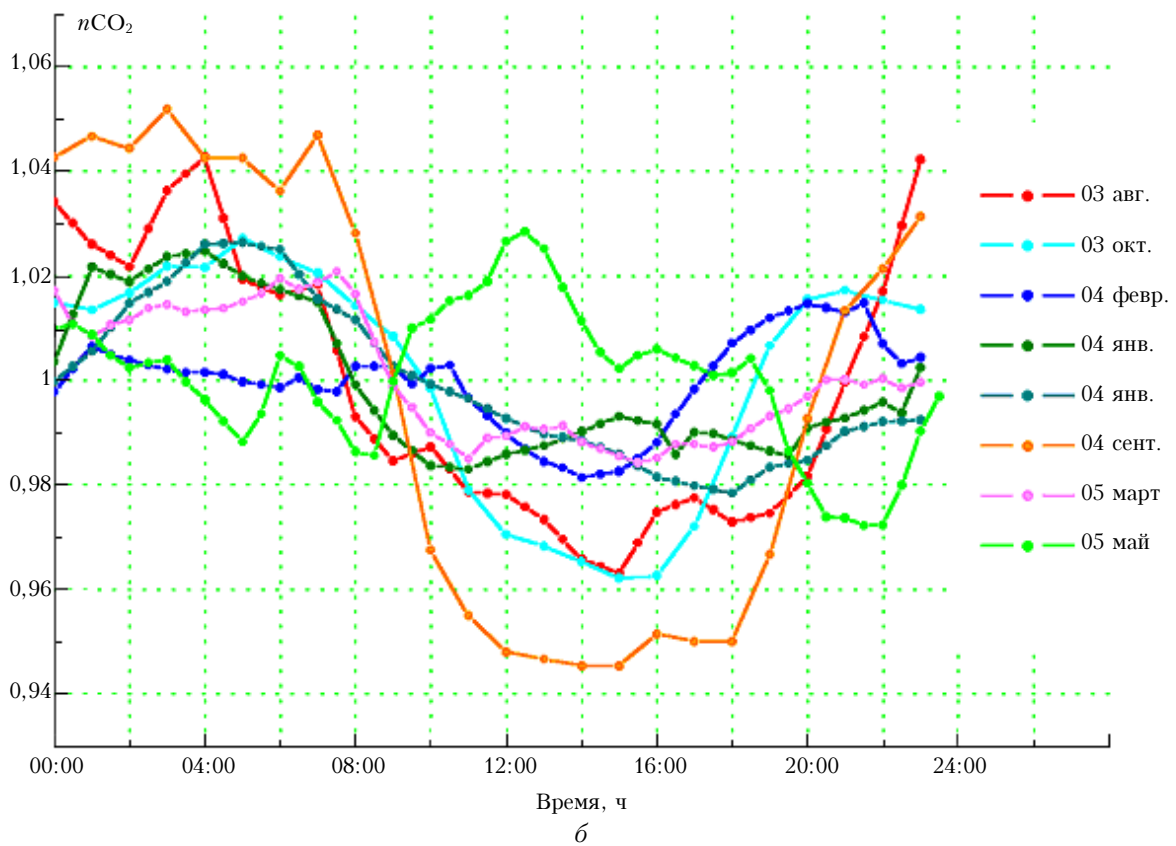
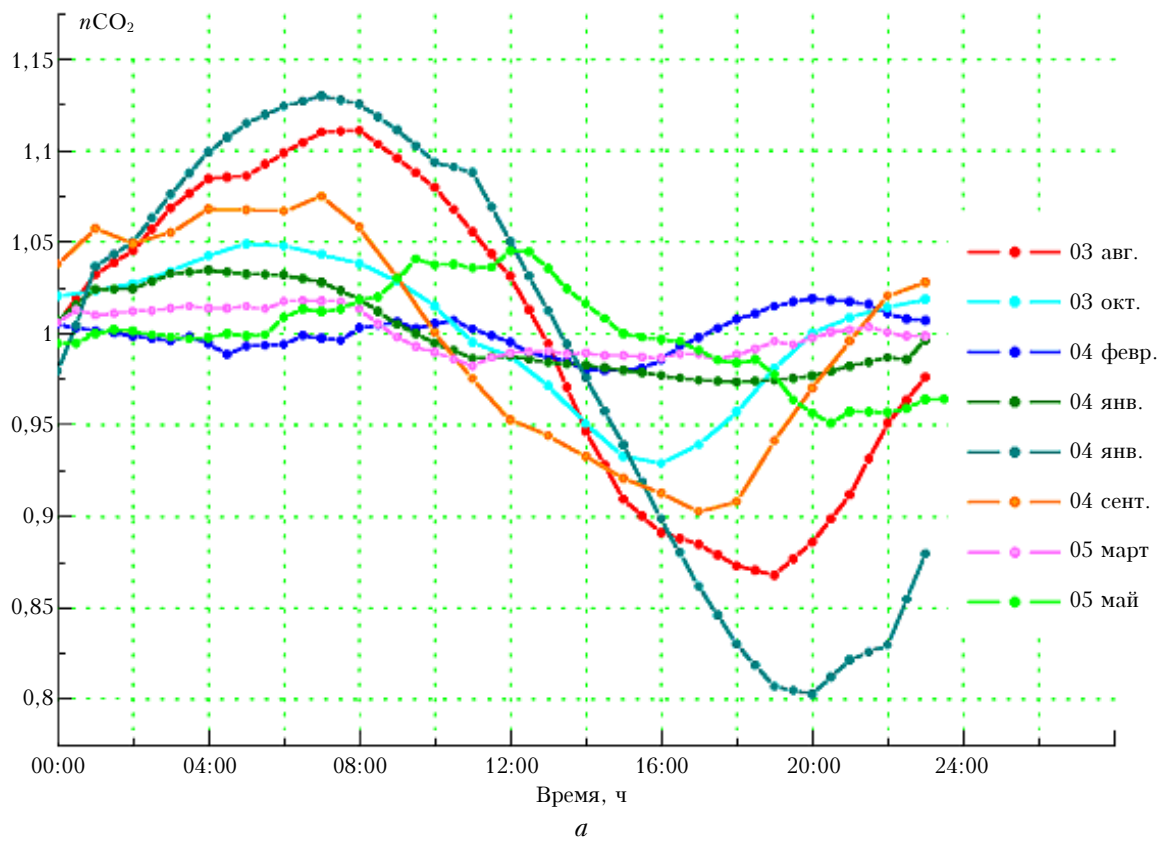


Рис. 6. Среднесуточный нормированный ход концентрации углекислого газа для разных измерительных сезонов: *a* – в измерительной камере; *b* – в приводной атмосфере (высота 1 м)

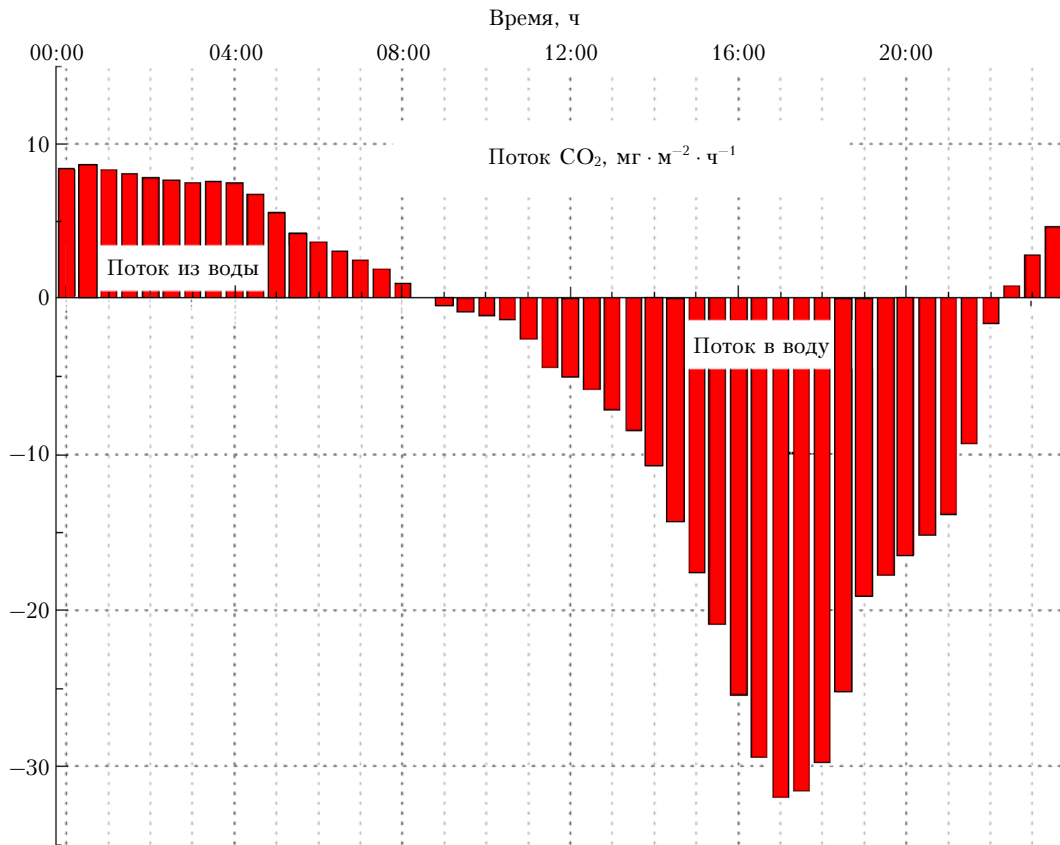


Рис. 7. Суточный ход потока углекислого газа

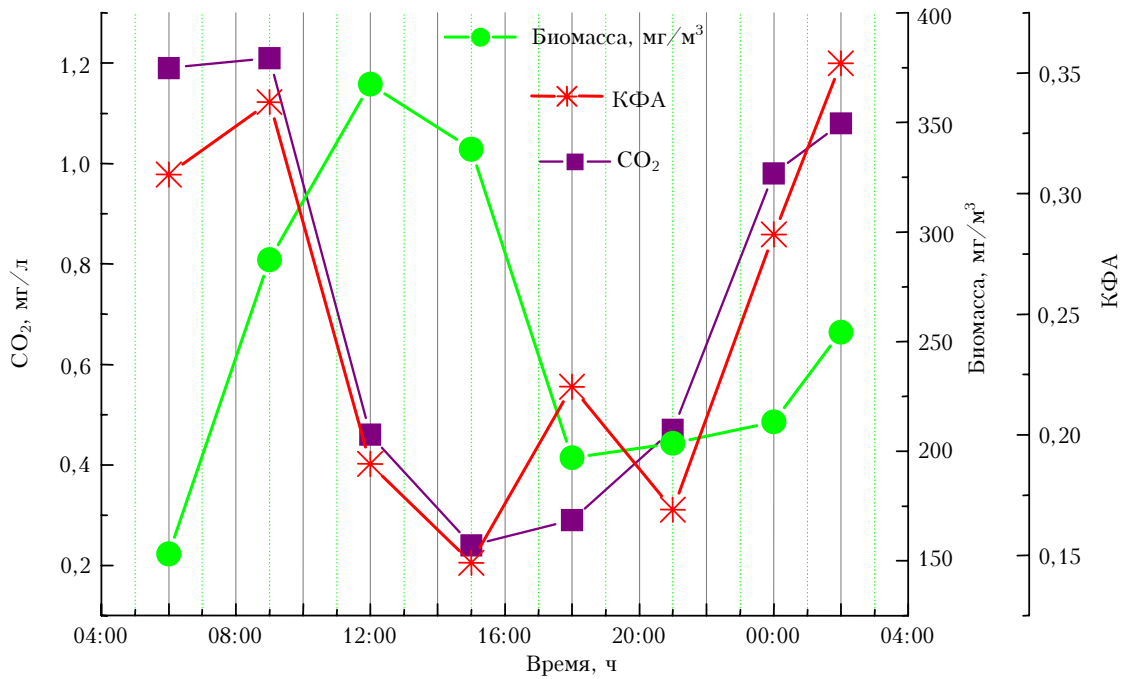


Рис. 8. Суточный ход концентрации CO_2 , КФА и биомассы фитопланктона