

На правах рукописи

ПЕСТУНОВ Дмитрий Александрович

**АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ИЗМЕРЕНИЯ
ПОТОКОВ CO₂ В СИСТЕМЕ ВОДА-АТМОСФЕРА
НА ОЗЕРЕ БАЙКАЛ**

Специальность 05.11.13. – Приборы и методы контроля природной
среды, веществ, материалов и изделий

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2010

Работа выполнена в Институте оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН г. Томск и в Национальном исследовательском Томском политехническом университете

Научный руководитель:	доктор физико-математических наук Панченко Михаил Васильевич
Официальные оппоненты:	доктор технических наук, профессор Макуха Владимир Карпович доктор технических наук, профессор Кербель Борис Моисеевич
Ведущая организация:	Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН

Защита диссертации состоится 22 июня 2010 г. в 15:00 на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.269.09 при Национальном исследовательском Томском политехническом университете по адресу: г. Томск, пр. Ленина, 2, ауд. 213.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Национального исследовательского Томского политехнического университета по адресу: 634034, г. Томск, ул. Белинского, 53

Автореферат разослан 20 мая 2010 г.

Ученый секретарь совета по защите
докторских и кандидатских диссертаций
Д 212.269.09, доцент, к.т.н. Б.Б. Винокуров



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Вопрос изменения климата сегодня стоит как никогда остро. Участвовавшие ситуации природных катаклизмов, опустынивание значительных территорий и ряд других мировых проблем, вероятно, вызваны ростом средней температуры на Земле. Изменения эти связывают с усилением парникового эффекта обусловленного устойчивым ростом содержания в атмосфере углекислого газа.

По мнению специалистов, половина количества углекислого газа, образующегося в результате деятельности человека (сведение лесов, ирригация болот, сжигание ископаемого топлива), остается в атмосфере. Этот факт говорит, во-первых, о существенном антропогенном вкладе в климатическую систему, а во-вторых, о том, что существующие стоковые механизмы на планете не справляются с этим воздействием.

Оборот углерода в естественных экосистемах преимущественно связан с процессом фотосинтеза биоты суши и океана. На сегодняшний день уже достаточно полно сформированы основные представления о стоках и источниках атмосферного углекислого газа в глобальном масштабе, а на основе полученных данных построен ряд прогностических моделей.

Основной интерес специалистов в настоящее время сосредоточен на процессах регионального масштаба. В гидросфере исследования по инвентаризации CO_2 , как правило, направлены на изучение газообмена между атмосферой и Мировым океаном. Однако, как возможные источники и стоки, из рассмотрения упускаются системы озер, что, несомненно, важно для многих географических районов.

Озеро Байкал занимает значительную территорию внутри континента и вносит ощутимый вклад в климат региона, в то же время вопрос о газообмене CO_2 с атмосферой на наш взгляд остается слабоизученным. Очевидно, что для этого необходимо детально исследовать внутрисуточную, сезонную и межгодовую динамику переноса углекислого газа через границу раздела вода-атмосфера на Байкале, что невозможно без проведения соответствующих измерений. До начала наших работ в Байкальском регионе измерения углекислого газа в атмосфере практически отсутствовали, а для оценки потока использовалась фоновая (планетарная) концентрация газа, без учета суточного и сезонного хода. Это ограничивает возможность использования такого подхода для количественной оценки процессов газообмена, протекающих в водах озера.

Целью данной работы является разработка методики измерения потока углекислого газа между водой и атмосферой в условиях, характерных для прибрежной зоны и пелагиали водных объектов и создание аппаратуры, реализующей измерения по данной методике, как в ручном, так и в автоматическом режимах. По результатам измерений требуется изучить годовой ход обмена углекислым газом озера Байкал с атмосферой.

Для достижения поставленной цели необходимо решение следующих **задач**:

1. Сравнительный анализ существующих методов измерения потоков и выбор наиболее оптимальных:

- с точки зрения применимости их на разделах сред вода-атмосфера в прибрежной и центральной частях водоемов;
- с учетом особенностей монтажа измерительного оборудования на водной поверхности;
- с учетом доступности современных технологий и средств для реализации измерений.

2. Исследование возможности применения выбранного метода в условиях волнового и ветрового режимов, свойственных озеру Байкал и обеспечение высокой чувствительности метода для использования на олиготрофных объектах;

4. Подбор газоанализатора CO_2 предназначенного для измерений фоновых концентраций;

5. Разработка и изготовление узлов аппаратной части и программного обеспечения комплекса, реализующего измерения по наиболее предпочтительной в литоральной зоне методике;

6. Апробация аппаратно-программного комплекса (АПК) в натурных условиях, доработка узлов с учетом выявленных в ходе испытаний недостатков и дополнительных потребностей;

7. Проведение измерений потоков CO_2 для всех характерных гидрологических сезонов с целью выявления суточного, сезонного и межгодового хода процессов газообмена, а также предварительная оценка среднегодового баланса углекислого газа озера Байкал, сравнение полученных результатов с литературными данными.

8. Создание мобильного комплекса и проведение с его помощью измерений в открытой части озера с последующим сопоставлением результатов измерений в литорали и пелагиали Байкала.

Методы исследования. Содержание концентрации CO_2 в воздухе измерялось недисперсионным ИК-газоанализатором, созданным на базе сенсора Vaisala GMM12. Измерения скорости газообмена проводились камерным методом. С помощью закрытой камеры проведены первичные испытания, т.е. поиск оптимальной чувствительности, обеспечение плавучести и способы надежной фиксации на воде. Для непрерывных измерений потоков применялись два типа проветриваемых камер. Парциальное давление CO_2 в воде измерялось с помощью эквивалатора. В программном обеспечении системы управления комплекса реализованы алгоритмы первичной обработки данных. Фильтрация данных, расчет потоков, статистическая обработка результатов выполнялись в пакете Origin Pro 7.5 с помощью специально написанных скриптов.

Достоверность полученных результатов обеспечена регулярной калибровкой используемого в работе газоанализатора (ГА) CO_2 по стандартным смесям (ООО «Мониторинг», СПб.). В ряде измерительных циклов проводилась интеркалибровка аттестованными ГА «Оптогаз-500.4» (ЗАО «ОРТЕС», СПб.) и LiCOR-840 (LiCOR Inc, США). Полученные результаты лежат в пределах погрешности измерений.

В процессе отладки метода измерение потоков велось двумя типами камер. Сравнение результатов на основании недостатков одной и достоинств другой позволяло выделять положительный сигнал и исключать ошибки.

Парциальное давление растворенного в воде углекислого газа, измеренное с помощью эквипратора, хорошо согласуется с результатами расчета по данным химического анализа воды.

Измерения камерным методом во все сезоны сопровождалась работой эквипратора. Полученные данные о потоке соответствуют разнице парциальных давлений CO_2 в атмосфере и в воде.

Полученные в работе экспериментальные результаты и выводы о суточной, сезонной и межгодовой изменчивости потоков углекислого газа соответствуют современным представлениям о циклах жизнедеятельности биоты озера Байкал.

Научная новизна работы состоит в том, что:

- создана первая на Байкале автоматизированная обсерватория, где помимо потоков CO_2 ведутся измерения физико-химических параметров водной среды и приземной атмосферы. Это позволяет сопоставить направление и величину потоков с текущими характеристиками сред;
- для реализации камерного метода предложено устройство открытой камеры, которое позволило упростить систему проветривания, обеспечив при этом жесткость и герметичность конструкции, что актуально при работе во время шторма. Благодаря принудительной прокачке время проветривания открытой камеры сокращено, по сравнению с традиционной конструкцией;
- с помощью эквипратора впервые на Байкале проведены прямые измерения содержания CO_2 , растворенного в воде;
- впервые на озере Байкал проведены измерения суточной, сезонной и межгодовой динамики атмосферного углекислого газа и его потока через границу вода-атмосфера. На основании этого дана предварительная оценка суммарного потока CO_2 в системе «вода-атмосфера» в литоральной части озера.

Практическая ценность. В результате проведенных исследований:

- создан газоаналитический комплекс, который может быть использован для проведения измерений потоков газа, как на природных объектах с низкой интенсивностью газообмена, так и в зонах промышленных водоемов и сточных водах;
- разработан и внедрен в режим рутинных измерений эквипратор с высокими временными показателями, что позволяет использовать его в соста-

ве мобильного комплекса для получения пространственного распределения растворенного CO_2 и при многопрофильных измерениях с высокой разрешающей способностью;

- построена многоканальная система съема, обработки и хранения данных, с возможностью подключения дополнительной измерительной аппаратуры, не внося значительных изменений в программно-аппаратную часть, что положительно скажется на дальнейшем развитии измерительного комплекса;
- внесены коррективы в камерный метод исследования потоков газа, учитывая особенности проведения измерений в системе вода-атмосфера;
- получены длинные ряды наблюдений концентрации CO_2 в поверхностной воде и атмосфере на озере Байкал, а также суточный и сезонный ход обмена углекислым газом. Все это представляет интерес не только для климатологов, но и для ученых лимнологов, изучающих миграцию органического вещества в озерной экосистеме;
- созданная аппаратура и результаты работы могут быть использованы специалистами, изучающими водные объекты и природоохранными службами.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Разработан и создан газоанализатор, в котором специальная система пробоподготовки и термостабилизации сенсора, а также применяемая процедура регулярной калибровки, обеспечили погрешность измерения CO_2 не хуже 1%;
2. Измерение парциального давления CO_2 , растворенного в воде, посредством эквивалатора в рамках комплекса предпочтительнее химическому анализу, поскольку обеспечивает непрерывный и автоматический режим работы;
3. Созданный аппаратно-программный комплекс обеспечивает измерение потока на разделах сред «вода-атмосфера» с чувствительностью 2–3 мг $\text{CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$, что дает возможность использовать данный комплекс на объектах с низкой интенсивностью газообмена;
4. Газообмен CO_2 на озере Байкал имеет выраженный суточный и сезонный ход, при этом в зависимости от гидрологического сезона вода озера является как источником, так и стоком атмосферного углекислого газа. Данные многолетних измерений показали, что в период открытой воды в литорали озера суммарный сток атмосферного углекислого газа составляет 3–5 г $\text{CO}_2 \text{ м}^{-2}$ в год.

Личный вклад автора. Разработка и изготовление аппаратной и программной частей комплекса, написание скриптов обработки данных проводились автором самостоятельно. Автор принимал непосредственное участие в натурных экспериментах и отладке работы комплекса в течение 28 измерительных циклов с 2003 по 2009 год. Обработка и анализ данных, а также подготовка публикаций выполнялись совместно с соавторами (указаны в списке опубликованных работ).

Апробация работы. Материалы, вошедшие в работу, докладывались и обсуждались на следующих конференциях и симпозиумах:

- III международная школа молодых ученых и специалистов «Физика окружающей среды» (Томск, 2002);
- III, IV, VI международные симпозиумы «Контроль и реабилитация окружающей среды» (Томск, 2002–2008);
- V, VI сибирские совещания по климатозоологическому мониторингу (Томск, 2003–2005);
- II всероссийская конференция молодых ученых «Материаловедение, технологии и экология в третьем тысячелетии» (Томск, 2003);
- Всероссийская научно-практическая конференция «Электронные средства и системы управления» (Томск, 2003);
- X–XVI рабочие группы Аэрозоли Сибири (Томск, 2003–2009);
- Advanced research workshop «Advance in CO₂ geological sequestration in eastern and western European countries» (Toms, 2004);
- XI, XII, XIII Joint International Symposiums “Atmospheric and Ocean Optics. Atmospheric Physics” (Toms, 2004–2006);
- IV Верещагинская байкальская конференция (Иркутск, 2005);
- Научная конференция «Природные ресурсы Забайкалья и проблемы геосферных исследований» (Чита, 2006);
- Международная научная конференция «Проблемы устойчивого функционирования водных и наземных экосистем» (Ростов-на-Дону, 2006);
- Международный симпозиум «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы» (Красноярск, 2009);
- Second European Large Lake Symposium ELLS2009 (Norrtelje, Sweden, 2009);
- Международная конференция «Ресурсная экономика, изменение климата и рациональное природопользование-2009» (Красноярск, 2009).

Работа выполнялась в рамках плана научно-исследовательских работ Института оптики атмосферы СО РАН в период с 2002 по 2009 годы, в том числе по программам: «Физика атмосферы и окружающей среды», № 0120.0 406057; «Актуальные вопросы оптики атмосферы», № 01.2.007 04736; а также по программам фундаментальных исследований отделения наук о Земле РАН: №3 «Водные ресурсы, динамика и охрана подземных вод и ледников» (2006–2008 гг.); № 11 «Оценка, прогноз и методы управления водными ресурсами с учетом их качества и экологического состояния» (2009–2011 гг.); поддержана грантом РФФИ №08-05-00258-а.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 57 работ, в том числе 11 рецензируемых статей в центральной печати и 4 патента РФ на ПИМ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы, включающего 194 наименования; изложена на 151 странице, включая 66 рисунков и 10 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении раскрывается актуальность диссертационной работы, дается ее общая характеристика и формулируется цель работы. Излагаются основные задачи исследования и результаты, выносимые на защиту.

Первая глава представляет собой краткий обзор современного представления о климате и круговороте атмосферного углерода, а также аппаратных средств и методов исследования газообмена атмосферного CO_2 с подстилающей поверхностью Земли.

Обсуждается роль парниковых газов в формировании климата Земли, в том числе углекислого газа, содержание которого в атмосфере непрерывно растет (рис. 1). Многочисленные исследования показали, что в результате деятельности человека в атмосферу выбрасывается несколько гигатонн углерода в год, а существующие природные механизмы не успевают связывать его избыток. Самое большое влияние на содержание атмосферного CO_2 оказывают естественные экосистемы, поскольку большая часть углерода задействована в процессах дыхания и фотосинтеза. В период, когда растения набирают массу, наблюдается снижение углекислого газа в атмосфере. В другие периоды его содержание в атмосфере пополняется в результате окисления растительных тканей. Этим обусловлен сезонный ход атмосферного CO_2 (рис. 1, серая кривая).

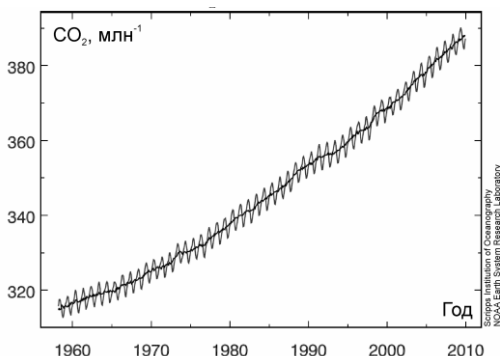


Рис. 1. Рост концентрации CO_2 , зафиксированный на станции мониторинга (г. Мауна-Лоа, Гавайские о-ва). Серая кривая представляет среднемесячные значения, черная кривая — осредненное за предыдущие и последующие семь месяцев

Среди всего многообразия средств аналитической аппаратуры для проведения рутинных измерений фоновых концентраций CO_2 наибольшее распространение получили недисперсионные ИК-газоанализаторы, которые обеспечивают достаточную точность измерений при высокой скорости преобразования. Особое внимание уделяется качественной пробоподготовке. Для ИК-сенсоров, чувствительных к парам воды, необходима предварительная осушка

пробы. Стабилизация расхода и температуры пробы способствуют качественным измерениям.

Самый распространенный на сегодняшний день метод измерения потоков газа – метод вихревой ковариации и его подвиды (микрометеорологические методы) используется на многочисленных станциях мониторинга в рамках мировых программ изучения углеродного цикла. Преимущество микрометеорологических (ММ) методов в том, что объект исследований охватывает значительные территории, поэтому он незаменим при оценке углеродного обмена в тропических или бореальных лесах. Однако с помощью него практически невозможно выделить вклад отдельных участников углеродного обмена, что было бы актуально при изучении газообмена с одной из нескольких экосистем, расположенных в непосредственной близости друг от друга. К недостаткам ММ методов можно отнести дороговизну и жесткие требования к чувствительности и быстродействию измерительной аппаратуры.

Отделить объект исследований от иных источников и потребителей атмосферного углерода позволяют камерные методы измерения потока, которые обеспечивают прямые измерения прироста или убыли газа в изолированном объеме. Кроме того, эти методы получили широкое распространение ввиду их простоты и доступности.

Недостатком камерного метода является влияние аппаратной части на объект исследования и среду, в которой он находится. Среди них можно отметить искажение температуры и ветрового поля, изменение освещенности и других факторов, способных влиять на газообмен. Однако эксперименты, в которых сравнивались результаты измерений камерными и микрометеорологическими методами, показали их хорошую согласованность.

Трудность использования ММ методов при исследованиях газообмена с океаном обусловлена искажениями показаний, вызванными перемещением чувствительных элементов из-за волнения. Для компенсации движения вводятся следящие системы и алгоритмы коррекции, что не обходится без ухудшения точностных характеристик и дополнительно увеличивает стоимость измерительного оборудования.

Применение камер на водной поверхности так же сопровождается рядом трудностей, вызванных введением специальных мер для снижения колебания давления в камере во время качки и, одновременно, ее надежной фиксацией. Именно поэтому данная методика хорошо отработана и стандартизирована для измерения потоков с неподвижных объектов, таких как ледник, почва, болото и др.

Скорость и направление потока газа через границу вода-атмосфера можно вычислить по разнице парциальных давлений газа в этих средах. Достоинство такого подхода в том, что реализация измерений наиболее простая из всех рассмотренных, однако существует неопределенность степени влияния скорости ветра, состояния водной поверхности и ряда других параметров на скорость переноса газа через границу раздела сред вода-воздух. Оценка коэф-

фициента переноса у разных авторов отличается до 3-х раз. Имеются ограничения применения метода в прибрежной зоне.

Одновременные измерения различными методиками позволяют сопоставить результаты, тем самым выявить сильные и слабые стороны того или иного метода во время отладки, а также откорректировать полученные данные. В данной главе рассмотрены способы оценки содержания CO_2 , растворенного в воде. Здесь же приводятся физико-химические свойства углекислого газа, а ввиду специфики работы особое внимание уделено процессам растворения CO_2 в воде.

В конце обзора приводятся результаты работ по биологической продуктивности озера Байкал и его газообмена с атмосферой. Показано, что развитие различных видов фитопланктона имеет собственный сезонный ход активности и носит квазипериодический характер. Таким образом, продуктивность озера из года в год может отличаться. Специалистами из Лимнологического института (г. Иркутск) проведен теоретический анализ накопленных данных о составе и температуре байкальской воды, ветрах и течениях, характерных для каждого сезона. По рассчитанной разнице парциальных давлений ими был построен сезонный ход газообмена CO_2 между озером и атмосферой. Прямых измерений давления углекислого газа в приводной атмосфере не проводилось. За основу были взяты фоновые значения удаленных станций мониторинга без учета суточного и сезонного хода. Такой подход привел авторов к выводу о том, что озеро Байкал является источником CO_2 практически на протяжении всего года, *эвазия (выход) газа из озера составляет от $100 \text{ мгCO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$ в августе до $400 \text{ мгCO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$ в предледоставный период, а за год (без учета периода закрытой воды) выход составляет около $50 \text{ гCO}_2 \text{ м}^{-2}$.*

Во второй главе обосновывается выбор метода измерения, и рассматриваются основные компоненты комплекса, их устройство, принцип работы, характеристики и компоновка в АПК.

Для исследования процессов газообмена CO_2 атмосферы с водной поверхностью на озере Байкал предпочтение отдано камерному методу, наиболее простому в реализации, позволяющему локализовать исследуемый объект, как источник обмена. В камерном методе величина и направление потока газа между объектом исследования и атмосферой оценивается по скорости изменения концентрации газа в ограниченном камерой объеме воздуха. При оценке скорости газообмена CO_2 озера Байкал с атмосферой, камера устанавливается на водной поверхности. Рост концентрации газа в камере означает, что идет выделение газа с водной поверхности, а спад – о поглощении. Зная площадь водной поверхности S , покрываемой камерой и ее внутренний воздушный объем V , по скорости изменения концентрации газа $\Delta C/\Delta t$ в этом объеме, вычисляется поток в камере F_{cham} по формуле

$$F_{\text{cham}} = \frac{\Delta C}{\Delta t} \cdot \frac{V}{S}. \quad (1)$$

Отношение площади камеры S к ее объему V определяет чувствительность метода. На Байкале, для которого характерны низкие скорости обмена, нами использованы камеры с площадью покрытия от 0,5 до 1,4 м² и объемом от 180 до 320 л.

Установившееся равновесное давление CO_2 между водой и воздухом в закрытой камере останавливает процесс газообмена, искажая оценку потока. Для устранения этого недостатка в процесс измерения была введена процедура проветривания камеры, с периодичностью, зависящей от величины потока. В данной главе приводятся описание двух типов проветриваемых камер, которые используются в работе (рис. 2). Приводятся их размеры, объем, материал, из которого они изготовлены, описание систем проветривания и методы установки на воде.

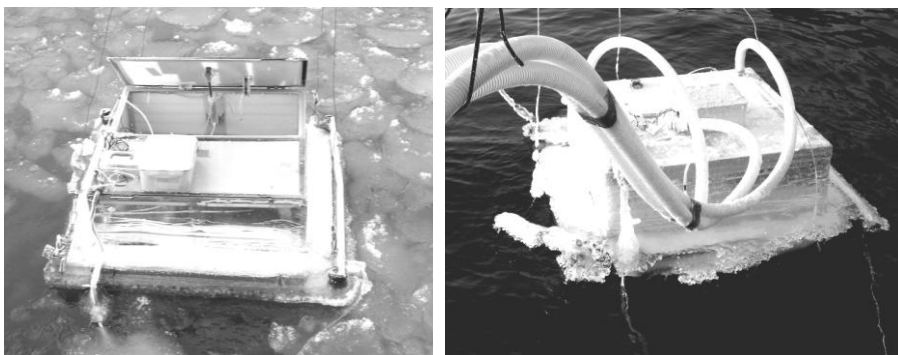


Рис. 2. Два типа проветриваемых камер. Внешний вид

Измерение растворенного в воде CO_2 в рутинном режиме проводилось с помощью эквипатора, который специально был разработан для работы в комплексе (рис. 3). Эксплуатация и отладка конструкции повлекли за собой постепенное улучшение временных характеристик и повышение надежности по сравнению с первоначальной модификацией.

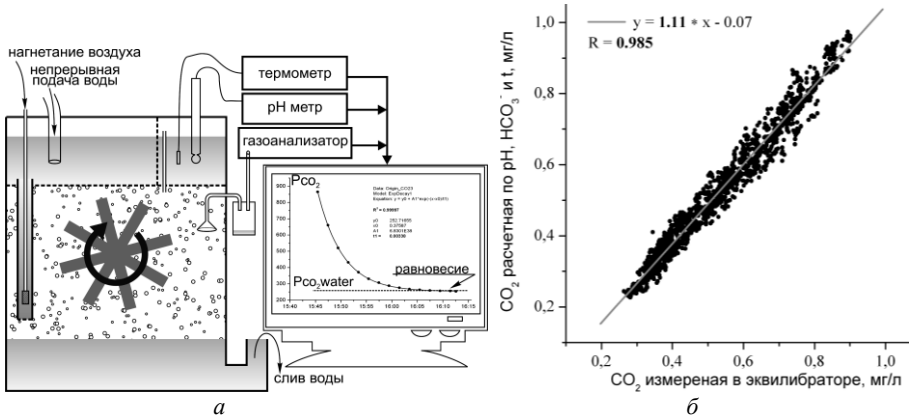


Рис. 3. Устройство эквilibратора и подключение регистрирующей аппаратуры (а). Сравнение данных полученных с помощью эквilibратора с рассчитанными по pH, HCO_3^- и температуре воды (б)

В работе описано устройство эквilibратора. Приводятся временные характеристики выхода на режим и релаксации, после выключения подачи воды, которые используются при компенсации искажений вызванных пробоотбором.

Данные о текущем парциальном давлении CO_2 в воде позволяют проверить правильность оценки потока и определить зависимость скорости газообмена от воздействия внешних факторов.

Интерпретация данных о скорости газообмена невозможна без дополнительной информации о физико-химических параметрах системы вода – атмосфера. Поэтому в комплекс были введены вспомогательные устройства и датчики: pH-метр («Эксперт-001», ООО «Эконикс-Эксперт»), метеоблок, включающий в себя измерители температуры в контрольных точках, влажности воздуха, атмосферного давления, скорости ветра, потока солнечной энергии, количества осадков. Приводится детальное описание технических характеристик, исполнения датчиков, интерфейсы подключения к системе управления анализатора.

Для реализации измерений был спроектирован и изготовлен АПК, включающий в себя многоканальный газоанализатор CO_2 , со встроенной системой управления, и все вышеописанные узлы (рис. 4).

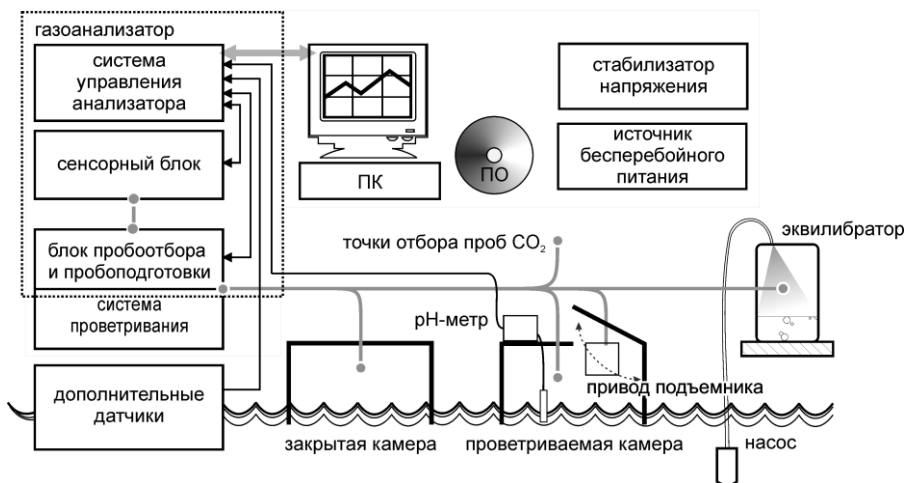


Рис. 4. Состав аппаратно-программного комплекса

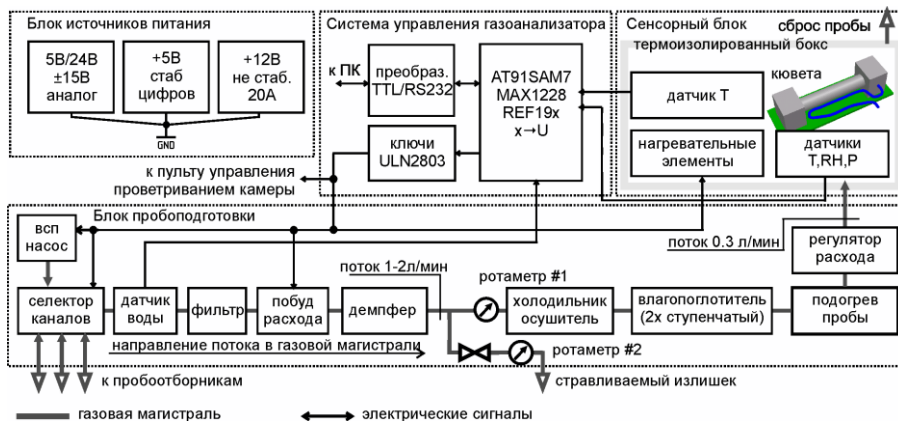
Комплекс прошел длительные испытания в Байкальской атмосферно-лимнологической обсерватории (БАЛО, южный Байкал). На базе накопленного опыта был разработан мобильный комплекс, который используется для проведения измерений в открытой части озера. В состав мобильного комплекса входят закрытая камера и эквиператор, для измерения CO₂ применяется ГА LiCOR-840, который учитывает содержание в пробе паров воды, поэтому система осушки пробы исключена в пользу компактности и надежности.

В конце главы приводятся рекомендации по дальнейшему развитию комплекса, с целью получения дополнительных необходимых параметров, а также оптимизации и совершенствования существующего оборудования.

В третьей главе описывается устройство многоканального газоанализатора CO₂, включая его систему управления и ПО, созданного для работы в данном измерительном комплексе.

В качестве измерителя CO₂ используется недисперсионный ИК-сенсор (Vaisala GMM12, Finland), который в своем штатном исполнении не обладает достаточной точностью для реализации измерений камерным методом. В частности данный сенсор, как и все подобного типа, чувствителен к температуре пробы, а предлагаемая математическая коррекция не обеспечивает необходимой точности измерений. После включения в газоанализатор системы термостабилизации сенсора и введения периодических калибровок стандартными смесями (220, 341 и 417 млн⁻¹) погрешность измерения объемной доли CO₂ достигла ± 2 млн⁻¹.

Для нормального функционирования сенсора CO₂ анализируемая проба должна быть с низким содержанием влаги и взвешенных примесей, подаваться с определенной скоростью и т.д., что обеспечивается рассматриваемым в



В описании приводится система команд и формат обмена данными между системой управления анализатора и ПК. На ПК установлено специальное ПО – пользовательский интерфейс комплекса, через который оператор управляет измерительным циклом в ручном и автоматизированном режимах. В ПО реализована первичная обработка данных, отображение на экране дисплея текущих значений и их временной развертки в виде графиков. Данные в виде текстовых файлов сохраняются на жестком диске с установленной периодичностью, соответствующей времени осреднения. СУ следит за состоянием комплекса и в случае неисправности какого-либо узла оповещает оператора.

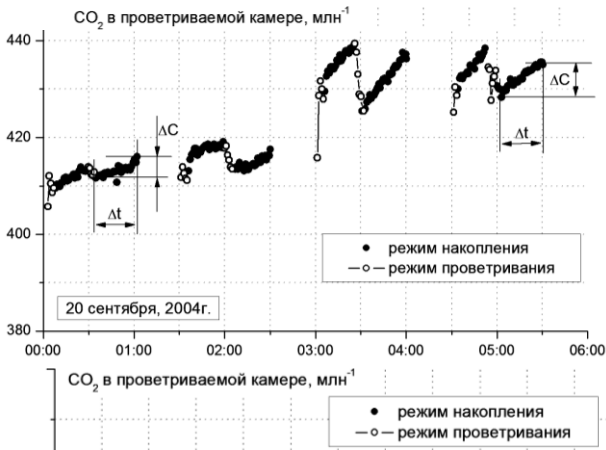
Эксплуатация комплекса в режиме мониторинга подразумевает автоматизированный процесс измерений и требует периодического вмешательства оператора, который проводит калибровку сенсора, следит за состоянием воздушных магистралей, осушителей и других компонент комплекса.

В четвертой главе представлен краткий обзор этапов отработки методики измерения потоков посредством полупогружных камер, входящих в состав

описываемого комплекса, на примере более 20-ти измерительных циклов в различные сезоны с 2003–2009 гг. в литорали и пелагиали южной части озера Байкал. По результатам проведена оценка внутрисуточной и сезонной динамики содержания CO_2 в приводной атмосфере, а с помощью закрытой камеры получены суточный и сезонный ход той составляющей углекислого газа, которая участвует в газообмене с водой. Однако оценить поток газа с воды можно только по линейным участкам характеристики CO_2 в закрытой камере. Процессы пересыщения в закрытой камере ограничивают применение метода, создавая условия для оценки потока в лучшем случае два раза в сутки. Измерение потоков в непрерывном цикле стало возможным благодаря введению периодического проветривания внутреннего объема камеры (рис. 6, а, б).

Рассматриваются измеренные суточная (рис. 6, в), сезонная динамики потока и их межгодовая изменчивость. Отмечено, что в сезонном ходе максимальная скорость стока газа за сутки наблюдается с июля по сентябрь и в среднем по всем проведенным измерительным циклам составила минус $100 \text{ мгCO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$ (знак минус соответствует потоку, направленному в воду).

Максимальный выход CO_2 наблюдается в предледоставный период (декабрь) и в среднем составляет $100 \text{ мгCO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$. Сравнение результатов измерений проведенных в одни сезоны разных лет показало, что величина потоков непостоянна, особенно в предледоставный период. А поскольку ритмы химического состава воды и растворенных в ней газов, а, следовательно, и газообмен с приводной атмосферой на озере Байкал во многом задаются актив-



а

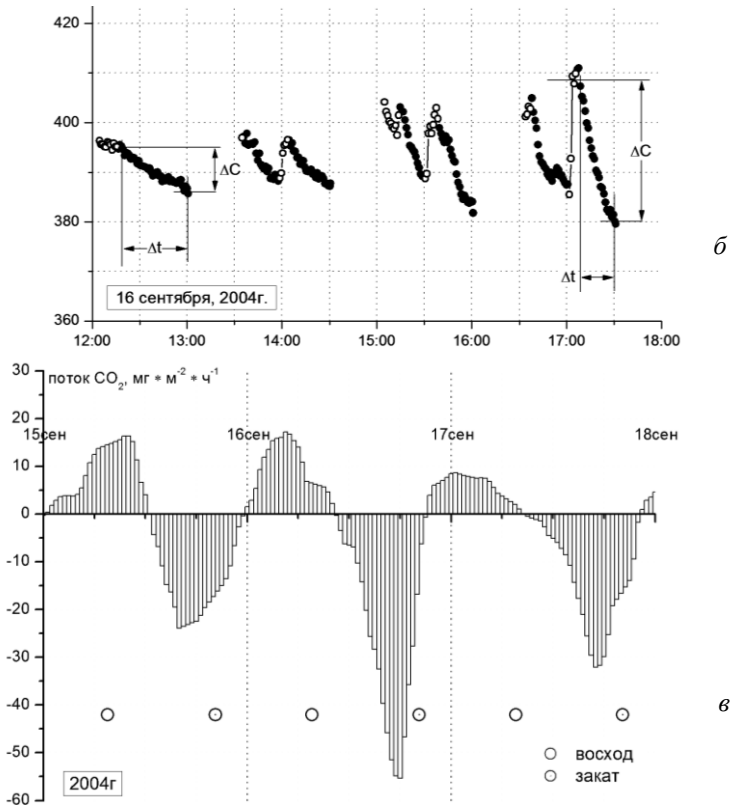


Рис. 6. Временной ход содержания CO₂ в проветриваемой камере в режимах проветривания и накопления (а, б) и поток CO₂ измеренный с ее помощью.

Отрицательные значения соответствуют инвазии газа в воду, и наоборот.

Кружками обозначено время захода и заката солнца (б)

ностью биоты, межгодовая изменчивость потока может говорить о квазипериодичности развития планктона, что подтверждается литературными данными.

С сентября 2004 по декабрь 2009 года проведено 5253 разовых циклов измерения потока во все характерные гидрологические сезоны. На основании этих данных была дана предварительная оценка баланса обмена углекислым газом в системе вода-атмосфера в литорали озера Байкал в период открытой воды. Проинтегрировав аппроксимированную по имеющимся данным кривую (рис. 7) получим, что суммарный сток газа в литорали озера составляет $3...5 \text{ г CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ в год}$.

Далее приводится сравнение динамики содержания CO₂ в воде и его потоков через поверхность воды в литорали и пелагиали озера для сезона август–сентябрь 2008 года. Значительные отличия в характере и интенсивности газообмена говорят о необходимости проведения дополнительных исследо-

ваний процессов в открытой части озера. Отмечено влияние атмосферных осадков на характер газообмена и рассматриваются возможные причины. Характер дна, аэрография местности и другие геофизические особенности района, в котором расположен комплекс, оказывают влияние на условия измерений и на газообмен, поэтому тоже рассматриваются в этой главе.

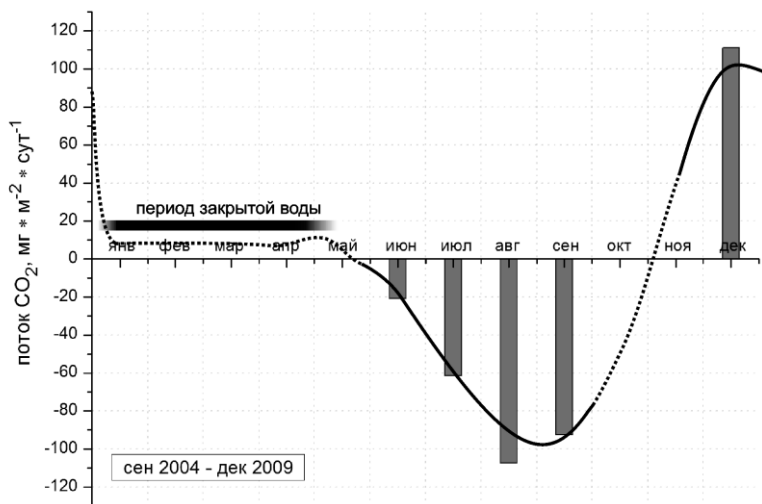


Рис. 7. Аппроксимация годового потока CO₂ в литоральной зоне озера Байкал.

Отрицательные значения соответствуют инвазии газа в воду, и наоборот.

Пунктирная линия показывает интерполяцию потоков

В заключении сформулированы основные результаты и выводы по диссертационной работе.

В списке основных обозначений и сокращений приведены часто повторяющиеся в тексте обозначения и сокращения.

По тексту изложения материала в диссертационной работе принята следующая **терминология**. Содержание газа в атмосфере представлено в виде количества частей данного газа на миллион частей всех составляющих атмосферы и выражается млн⁻¹ (в зарубежной литературе ppm – parts per million). Содержание газа, растворенного в воде, выражено через миллилитры газа на литр воды – мл/л. Для потока CO₂ используется массовая концентрация углекислого газа прошедшего через водную поверхность площадью 1 м² за час, за сутки и за год – мгCO₂ м⁻² ч⁻¹, мгCO₂ м⁻² сут⁻¹, мгCO₂ м⁻² год⁻¹, соответственно. Поток, направленный из воды имеет положительное значение.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Предварительные измерения потоков CO_2 камерным методом в прибрежной зоне озера Байкал показали состоятельность такого подхода. А введенная система регулярного проветривания камеры, благодаря которой исключается эффект насыщения внутреннего объема камеры углекислым газом, позволяет проводить непрерывные измерения потоков.

2. Измерение парциального давления CO_2 растворенного в воде осуществляется при помощи эквивалатора, специально изготовленного для работы в комплексе, который обеспечивает непрерывные измерения без участия человека. Измерения парциальных давлений в воде и атмосфере проводятся одним газоанализатором, что положительно сказывается на точности определения разницы $\Delta p\text{CO}_2$. При замене ГА, с помощью эквивалатора можно определять давление любого другого газа, растворенного в воде.

3. Данные, полученные посредством ряда приборов и датчиков интегрированных в комплекс, позволяют оперативно сопоставлять величины измеренных потоков с состоянием водной среды и приземной атмосферы. Выявлены дополнительные параметры, которые также необходимы для интерпретации потоков и предложены способы их измерений.

4. Созданный мобильный комплекс позволяет проводить измерения потока CO_2 и содержание его в атмосфере и в воде в открытой части акватории. Компактный размер оборудования легко размещается на ограниченном пространстве любого НИС.

5. Разработан и изготовлен многоканальный газоанализатор CO_2 , включая систему управления, с характеристиками, обеспечивающими проведение измерений потоков углекислого газа камерным методом. Благодаря введенной системе термостабилизации сенсора Vaisala GMM12 и его регулярной калибровке, приведенная погрешность газоанализатора снижена до 1%.

6. Блок предварительной пробоподготовки обеспечивает нормальное функционирование сенсора CO_2 , при котором анализируемая проба должна быть с низким содержанием влаги и взвешенных примесей, подаваться с определенной скоростью и т.д. Воздушный тракт построен с расчетом на подключение через селектор каналов нескольких точек отбора проб.

7. Через систему управления анализатора организовано преобразование, оцифровка и передача на ПК всех измеряемых в комплексе параметров, управление и контроль за исполнительными узлами комплекса. ПО разрабатывалось с учетом управления комплексом как в ручном, так и в автоматическом режимах. Реализована первичная обработка данных, отображение на экране дисплея и сохранение результатов измерения в файл в формате, упрощающем их дальнейшую обработку.

8. Суточный ход концентрации атмосферного и растворенного в воде CO_2 , скорость и направление потока газа в системе «вода-атмосфера» и изме-

нение их амплитуды в разные гидрологические сезоны позволяют заключить, что ведущую роль в газообмене играют биологические процессы, происходящие в озере.

9. Для каждого гидрологического сезона характерны свои направления потоков CO_2 , а их амплитуды превалируют над наблюдаемой межгодовой изменчивостью, т.е. в период гидрологического лета наблюдается уверенный сток газа в воду и выход газа в предледоставный период.

10. Проведенные с помощью данного комплекса многолетние измерения показали, что в период открытой воды в литорали озера суммарный сток атмосферного углекислого газа составляет $3\text{--}5 \text{ гCO}_2 \text{ м}^{-2}$ в год.

11. Детальное сопоставление полученных данных в ходе комплексных экспериментов о ритмах изменчивости биогенных элементов и водной биоты с оценкой соответствующих потоков CO_2 является дальнейшей задачей, которая решается с помощью данного измерительного оборудования.

Список основных публикаций по теме диссертации:

1. 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 химического состава воды и содержания углекислого газа в приводном слое воздуха над оз. Байкал // Доклады Академии Наук. 2004. Т. 399а.

2. Domysheva V.M., Sakirko M.V., Panchenko M.V., Pestunov D.A. The Interaction of CO_2 between the Atmosphere and Surface Waters of Lake Baikal and the Influence of Water Composition // Advances in the geological storage of carbon dioxide. New-York: Kluwer Academic Publishers. 2006. V. 65. P. 35-46.

3. Домышева В.М., Панченко М.В., Пестунов Д.А., Сакирко М.В. Влияние атмосферных осадков на процесс газообмена CO_2 с водной поверхностью оз. Байкал // Доклады Академии Наук. 2007. Т. 414. № 5.

4. Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Пестунов Д.А., Покровский Е.В., Толмачев Г.Н., Фофонов А.В. Посты для мониторинга парниковых и окисляющих атмосферу газов // Оптика атмосферы и океана, 2007. Т. 20. № 1. С. 53-61.

5. Панченко М.В., Домышева В.М., Пестунов Д.А., Сакирко М.В., Заворуев В.В., Новицкий А.Л. Экспериментальное исследование процессов газообмена CO_2 в системе "атмосфера - водная поверхность" оз. Байкал (постановка эксперимента) // Оптика атмосферы и океана, 2007. Т. 20. № 5. С. 448-452.

6. Пестунов Д.А. Шмаргунов В.П. Панченко М.В. Измеритель содержания CO_2 , растворенного в воде // Приборы и техника эксперимента, 2008, №5. С. 143-145.

7. 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 атмосферы и океана. Т. 21. 2008. № 5. С. 377-38.

8. 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 озера Байкал в разные гидрологические сезоны // Метеорол. и гидрол. 2008. № 2. С. 79-86.

9. Патент (РФ) на ПМ № 77691. Электронный индикатор атмосферных осадков. Патентообладатель: Институт оптики атмосферы СО РАН, автор: Пестунов Д.А.

10. Фофонов А.В. Пестунов Д.А. Ковалевский В.К. Козлов А.В. Белан Б.Д. О некоторых аспектах измерения параметров ветра анемометрами электромеханического типа // Материалы V Сибирского совещания по климатозоологическому мониторингу. Томск: ИОМ СО РАН. 2003.

11. Пестунов Д.А. Белан Б.Д. и др. Комплекс для измерений потоков тепла, влаги и количества движения в приземном слое воздуха // Материалы II Всероссийской конференции молодых ученых «Материаловедение, технологии и экология в третьем тысячелетии». Томск: ИФПМ СО РАН, 2003. 362 с. С. 248.

12. Пестунов Д.А., Шмаргунов В.П. и др. Комплекс для измерения потоков CO_2 в приземном слое // Материалы II Всероссийской конференции молодых ученых «Материаловедение, технологии и экология в третьем тысячелетии». Томск: ИФПМ СО РАН, 2003. 362 с. С. 251.

13. Пестунов Д.А., Фофонов А.В. Автоматический измерительный метеопост на базе микроконтроллера // Электронные средства и системы управления: Материалы Всероссийской научно-практической конференции. Томск: Издательство Института оптики атмосферы СО РАН, 2003. 286 с. С. 117.

14. Pestunov D.A., Shmargunov V.P., Tumakov A.G.. Instrumentation-software complex for investigations of gas exchange processes in the atmosphere over water // The fourth Vereshchagin Baikal Conference: Abstracts (Irkutsk, 26 September – 1 October, 2005). Irkutsk: Institute of Geography SB RAS Publishers, 2005. 249 p. P. 153-154.

15. Пестунов Д.А., Козлов А.В., Шмаргунов В.П., Тумаков А.Г., Сакирко М.В. Аprobация метода равновесной камеры для измерения углекислого газа в воде. // Аэрозоли Сибири. XII Рабочая группа: Тезисы докладов. Томск: Изд-во Института оптики атмосферы СО РАН, 2005. 72 с. С. 14.

16. Пестунов Д.А., Панченко М.В., Шмаргунов В.П. Сакирко М.В., Домышева В.М. Измеритель содержания углекислого газа в воде // 6-й Международный симпозиум «Контроль и реабилитация окружающей среды: КРОС-2008». Томск, 3-5 июля 2008 года. Тезисы докладов, С. 46-47.

Издательство «В-Спектр»
ИНН/КПП 7017129340/701701001, ОГРН 1057002637768
Подписано к печати 19.05.2010.
Формат 60×84^{1/16}. Печать трафаретная.
Бумага офсетная. Гарнитура «Times New Roman».
Печ. л. 1. Тираж 100 экз. Заказ 38.
634055, г. Томск, пр. Академический, 13-24, тел. 49-09-91.
E-mail: bvm@sibmail.com