



М. В. ПАНЧЕНКО

# БАЙКАЛ. ШАМПАНСКОЕ. КИОТО...

**ПАНЧЕНКО** Михаил Васильевич — доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией оптики аэрозоля, директор отделения оптической диагностики окружающей среды Института оптики атмосферы СО РАН (Томск). Член Американской ассоциации аэрозольных исследований. Награжден медалью Федерации космонавтики им. С. П. Королева. Автор и соавтор трех монографий и более 100 статей

*Перифразируя кого-то из великих, можно сказать, что капля шампанского — напиток, который начинает свою жизнь на виноградской лозе, наполняется солнечной энергией и после многих превращений попадает в ваш бокал, — прекрасная модель, отражающая многие процессы, происходящие в живой природе при взаимодействии ее с человеком. В том числе — процесс циркуляции углекислого газа, на который ныне возлагается ответственность за глобальные изменения климата в последние десятилетия, столь тревожащие человечество*

**В** исследованиях, связанных с историей и современным состоянием климата и биосферы, неизбежно затрагивается проблема, касающаяся содержания углекислого газа в атмосфере. В последние годы в дискуссии по этому вопросу включилось огромное число экономистов и политиков самого высокого уровня.

Почему же CO<sub>2</sub> привлек к себе такое внимание? В последние десятилетия на планете устойчиво повышаются среднегодовые значения температуры — идет так называемое *глобальное потепление*. Наряду с этим фактом регистрируется другой — отчетливо выраженный тренд увеличения концентрации CO<sub>2</sub> в атмосфере.

Человечество хочет получить ответ на главные вопросы: являются ли наблюдаемые изменения климата результатом хозяйственной деятельности людей и имеет ли природа достаточный запас прочности противостоять такому вмешательству? Дискуссии этой посвящено столь большое число научных и газетных публикаций, серьезных экономических документов и политических протоколов, что вряд ли имело бы смысл еще раз обращаться к этой теме, если бы не острота и важность проблемы, вставшей перед учеными нашей страны.



Вход в Сад камней — место для философских размышлений

## Суэта вокруг Киото

Дело в том, что после жарких споров Россия приняла *Киотский протокол*, который вступил в действие 16 февраля 2005 г. Этот международный договор регламентирует деятельность стран в области выбросов так называемых *парниковых газов* и нацелен на сокращение негативного антропогенного влияния на климат. Впервые в истории международных отношений предлагаются конкретные рыночные механизмы в вопросах, касающихся состояния природной среды.



Рис. М. Голиковой

Вот почему мы говорим о CO<sub>2</sub>: перечень парниковых газов, контролируемый Киотским протоколом, включает двуокись углерода, метан, закись азота, гидрофторуглероды, перфторуглероды и гексафторид серы, но учетной единицей является 1 т углекислого газа. Именно он служит эквивалентом, концентрация же остальных парниковых газов пересчитывается на углекислый газ через соответствующие коэффициенты.

Для каждой из стран определены свои квоты на выбросы парниковых газов. Дальше же они сами должны решать, как сократить выброс того или иного газа, или, чтобы не сдерживать развитие своей экономики, купить недостающие квоты у другой страны. Но в любом случае расчетной единицей будет 1 т CO<sub>2</sub> — эквивалента.

У Киотского протокола много и сторонников, и противников. Первые утверждают, что климат теплеет из-за увеличения углекислого газа в атмосфере. Действительно, резкий рост содержания CO<sub>2</sub> коррелирует с ростом температуры, а все современные климатические модели, основанные на оценках воздействия реальных антропогенных выбросов углекислого газа на глобальную температуру, дают результаты, близкие к наблюдаемым.

Противники, в свою очередь, указывают на то, что потепление первично и обусловлено природными причинами, а повышение уровня CO<sub>2</sub> в воздухе происходит вследствие глобального потепления. Климатическая система планеты очень сложна и до конца не изучена, а «разогрев» Мирового океана должен действительно приводить к снижению растворимости углекислого газа в воде и, следовательно, к повышению его содержания в атмосфере.

Очевидно, что ответ на эти вопросы возможен только после длительных и детальных исследований, которые интенсивно ведутся во всех научных коллективах мира.



## Цена вопроса

Весьма символичен тот факт, что Киотский протокол принят именно в этом старинном японском городе, где расположено одно из самых простых и загадочных творений человека — Сад камней.

Особый смысл заключается в расположении камней. С какого места на них ни смотри, их всегда будет только четырнадцать — последний, пятнадцатый, камень останется «скрытым». Возможно, таким образом создатели сада хотели донести до зрителей буддийскую мысль о безграничности и непостижимости мира, о необходимости воспринимать реальность более широко и непредвзято.

То же и Протокол. Несмотря на огромную неопределенность причин и прогностических оценок событий, люди, глубоко чувствующие ответственность за будущее нашей планеты, сделали все возможное, чтобы он был принят. Путь был непростой, и представители Европейского Союза, Японии и Канады — тех стран, где высока степень «экологизации» мышления и культуры, приложили к этому огромные усилия. Но так получилось, что в конечном счете «быть или не быть» Протоколу решала Россия. И, очевидно, она сделала правильный выбор, приняв это ответственное решение.

Теперь Протокол принят. Но его реализация связана с огромными затратами.

Людей, посвященных в суть финансовых проблем, серьезно пугают расчеты, хотя и не претендующие на высокую точность, но тем не менее достоверные в порядке величин. Сейчас в атмосфере концентрация  $\text{CO}_2$  составляет около 377 ppm (число частиц газа на 1 млн частиц воздуха). При нынешних темпах выбросов через десять лет его содержание будет около 405 ppm. Если же все страны выполнят свои обязательства по соблюдению мер, предусмотренных Протоколом, эта величина будет всего на 2–3 ppm меньше. То есть попадет в диапазон ошибок расчетных моделей.

К сожалению, такова инерция нашей природной системы. Реальность заключается в том, что только к концу века человечество может получить (а если посылки неверны — то и не получить) ощутимый эффект. А ведь стоимость мер по реализации Протокола оценивается в сотни триллионов долларов!

Не берусь судить, какая точка зрения ближе к истине. Но поддерживаю принятие этого серьезного документа, который лучше всего рассматривать как новую прагматичную религию XXI века.

Однако религия, экономика, политика — это уже не мой профиль. Поэтому лучше вернемся к сути происходящих в природе процессов и к тому, что делают сегодня ученые.



Готовим камеры к заплыву



Спасательные работы: камеру сорвало, приходится купаться (температура воды +3,5° C!)



Везем химикам пробы воды





Этот необычный прибор, приспособленный для сбора верхней пленки воды, недаром назван «ежик в тумане». Главная деталь — 1000 иголок, воткнутых внутрь герметичной коробки из силикона, помещаемой на полозья катамарана. Воздух отсасывается, и поверхностная вода поступает внутрь. На Байкале утром зачастую туманы, и уже при удалении на 100 метров видимость пропадает. Поэтому когда мы возвращаемся после забора проб воды, встречающие на берегу так и говорят: наши «ежики из тумана» едут



## Байкал и бокал шампанского

Каждый знает, какое это наслаждение — разглядывать на свет бокал с шампанским, в котором, искрясь от солнечных лучей или отражая таинственное пламя свечей, поднимаются мириады пузырьков.

Мы еще вспомним про шампанское, ну а теперь о прозе жизни: эти пузырьки есть не что иное, как углекислый газ, образующийся в шампанском по мере его созревания, парциальное давление которого велико по отношению к атмосферному. Выстрел пробки открывает новый этап в жизни шампанского и самого углекислого газа: происходит газообмен в системе *поверхность жидкости — атмосфера*.

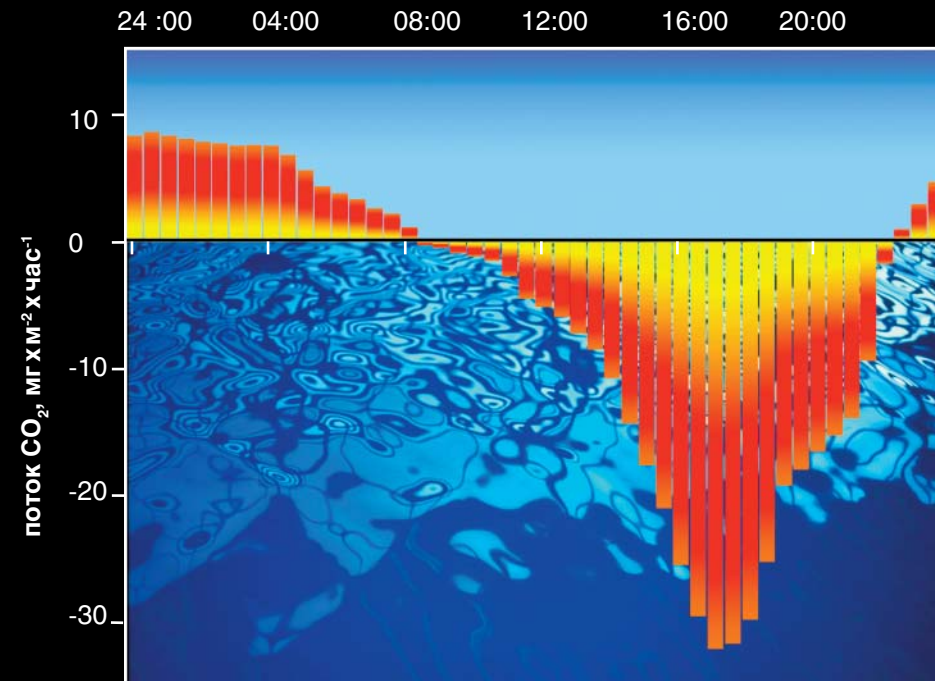
Изучению этого процесса и посвящены наши исследования последних лет на озере Байкал. Но прежде чем перейти к конкретным измерениям и результатам, сделаем некоторое общее вступление.

Начнем с того, что все живое на Земле живет благодаря и вопреки Солнцу. Из чего состоит жизнь? Если кратко, то из углерода, воды и энергии солнечного света. Огромное количество лучистой энергии (почти 1,4 кВт на 1 кв. метр поверхности) падает на верхнюю границу атмосферы — несоизмеримо тонкую, по сравнению с планетой, воздушную оболочку с активным слоем толщиной менее 100 км. И эта пленка защищает нас от губительного действия коротковолнового излучения, пропуская заметную долю падающего видимого света, и частично задерживает уходящее от Земли *инфракрасное* (тепловое) излучение.

Простой расчет показывает, что если бы Земля не имела атмосферы, то равновесная ее температура была бы  $-18^{\circ}\text{C}$ . И, очевидно, на ней не существовала бы жизнь — в нашем понимании. Но поскольку в атмосфере Земли присутствуют взвешенные частицы (аэрозоли), облака и определенный набор газов, то эта система и регулирует радиационный баланс, а следовательно, определяет «погоду» в нашем общем доме. Как специалист по оптике атмосферы я бы мог долго рассуждать о роли той или иной составляющей атмосферы в регуляции климата, еще дольше — о работе Института оптики атмосферы СО РАН в области комплексного изучения ее свойств. Но вместо этого предлагаю вернуться к  $\text{CO}_2$  и Байкалу и рассмотреть вопрос об источниках и «стоках» углекислого газа как одного из важнейших компонентов атмосферы.

Углекислый газ участвует в процессе *фотосинтеза* — в образовании сложных органических веществ, необходимых для жизнедеятельности, высшими растениями, водорослями, фотосинтезирующими бактериями за счет энергии света. Опять скажу очевидное, но в повседневной жизни мало кто задумывается о том, что уголь, нефть, газ, растения, животных и даже человека можно трактовать как продукты фотосинтеза, т. е. как накопленную энергию Солнца.

Понятно, что в атмосфере, помимо  $\text{CO}_2$ , присутствуют и другие углеродосодержащие газы, участвующие в процессах фотосинтеза, но по количественному содержанию в атмосфере и Мировом океане он превосходит их на порядки величин. Исследования в этом направ-



Суточная динамика углекислого газа (17 сентября 2004 г., оз. Байкал)



лении проводятся в различных географических зонах, и основные представления о цикле  $\text{CO}_2$  в масштабе планеты уже вполне сформированы, внимание же специалистов сейчас сосредоточено на изучении процессов регионального масштаба. И вот здесь, наконец, речь уже пойдет о Байкале.

## БАЙКАЛ! Как много в этом звуке...

Подъезжая к Байкалу, чувствуешь какой-то необыкновенный подъем настроения, непонятную радость и легкий хмель, как после первых глотков хорошего шампанского. Неоднократно посещая эти края, понимаешь, что Байкал может сделать с тобой все — очаровать и напугать, поманить и оттолкнуть. Единственное, чего он не может, — надоест. Но это лирика. А вот дальше — прагматика.

Выбор Байкала как объекта исследований по проблеме газообмена был продиктован рядом соображений. Во-первых, в подавляющем большинстве модельных сценариев, касающихся возможных источников и стоков углекислого газа, «выпали» пресные водоемы. Другим и наиболее важным аспектом, определившим выбор именно Байкала, были уникальные свойства этого географического района.

Принимая во внимание эталонную чистоту воды озера, здесь можно достаточно надежно выделить физические, химические и биологические составля-

ющие в сложном процессе газообмена «вода — атмосфера». Это практически недостижимо при натурных наблюдениях в других местах и представляет серьезные трудности даже в лабораторных экспериментах.

Еще одно важное обстоятельство, которое часто не принимается во внимание: температура воды озера и соответственно состояние водной экосистемы реагируют главным образом на глобальные изменения климата в нашем полушарии. Тогда как состав и свойства нижних слоев атмосферы подвержены в основном воздействию локальных процессов.

И самое главное. Задолго до начала наших совместных экспериментов со специалистами Лимнологического института СО РАН последними на Байкале был проделан огромный многолетний цикл работ по исследованию состава воды и его связи с процессами газообмена. Ведь проблема газообмена — задача сугубо междисциплинарная, требующая участия и физиков, и химиков, и биологов, и математиков. (Попробуйте в одиночку количественно описать, например, комплекс процессов и физико-химических реакций, которые превращают посаженную в землю косточку винограда в благородный напиток!)

Начиная атмосферные исследования, мы понимали, что эта работа строится на огромной пирамиде знаний и наша задача состоит в том, чтобы к этой пирамиде добавить небольшую верхушку, которая выгянет из воды. Цель состояла в том, чтобы в ограниченном комплексе экспериментов выявить и описать связь потоков углекислого газа с химическим составом воды и «живой компонентой» биоценоза и определить их се-

зонную изменчивость. А затем на базе накопленных ранее сведений оценить роль Байкала как резервуара углекислого газа и попытаться дать прогноз, как эта система поведет себя в условиях глобального потепления и неуклонного роста содержания углекислого газа в атмосфере.

## Сборная СО РАН

Для исследований был выбран прекрасно оборудованный стационар Лимнологического института СО РАН около пос. Большие Коты. Наша основная экспедиционная команда по исследованию газообмена состоит из химиков ЛИН и физиков ИОА, а в камеральной обработке проб воды участвуют иркутские биологи. Радует, что в последние годы круг энтузиастов расширился: в 2004 г. с нами начали работать специалисты по флуоресценции из Института вычислительного моделирования РАН (Красноярск), а в 2005 г. подключились наши коллеги из лаборатории радиофизики Отдела физических проблем БНЦ СО РАН (Улан-Удэ).

Измерения проводятся круглогодично отдельными сериями — непрерывный режим пока невозможен из-за нехватки средств. Здесь уместно сказать, что финансирование исследований идет в основном из бюджетов ЛИН и ИОА СО РАН, экспедиционных грантов СО РАН и контракта Программы РАН «Водные ресурсы, динамика и охрана подземных вод и ледников» (руководитель — академик РАН М. Г. Хубларян).

Основным методом измерения суточных ритмов газообмена и последующей оценки потоков между поверхностью воды и атмосферой был выбран камерный метод. Мы начинали не на пустом месте: опыт подобных измерений был приобретен в сотрудничестве с Национальным институтом исследования окружающей среды (NIES, Япония) при изучении этих процессов на Большом Васюганском болоте.

Суть метода проста: над участком поверхности воды размещается прозрачная камера без дна, в которой с определенной частотой регистрируется содержание исследуемого газа. По степени изменения концентрации газа за определенный промежуток времени можно рассчитать величину потока. Для этого мы используем две плавающие камеры. Одна полностью закрыта от внешней атмосферы и обеспечивает практически непрерывную запись суточных ритмов изменчивости содержания углекислого газа в приводном слое атмосферы. Вторая — с режимом регулярного автоматического проветривания, что обеспечивает возможность ежечасной корректной оценки потока  $\text{CO}_2$ .

Чтобы адаптировать эту методику к условиям водной поверхности, пришлось «научить» камеры уверенно «плавать», разработав ряд приспособлений для удержания их на заданном месте при сильном волнении



Закрытая камера для измерения ритмов газообмена



Пробы воды для определения нитратов



В химической лаборатории на стационаре ЛИН СО РАН в поселке Большие Коты каждые 3 часа делается химический анализ воды



Научно-исследовательское судно флота Лимнологического института на Байкале

(ветровой режим Байкала чрезвычайно изменчив). Правда, даже наши якоря не дают стопроцентной гарантии: несколько камер разбились на прибрежных камнях, да и нам в каждой экспедиции приходилось купаться в холодной байкальской воде.

На метеомачте в режиме круглосуточного мониторинга регистрируются концентрация углекислого газа, температура, относительная влажность и скорость ветра. Забор проб воды проводят с интервалом в три часа на двух станциях, расположенных на глубине 2 и 5 м. И если у физиков основная хлопотная работа бывает только при монтаже и запуске аппаратуры, а дальше «работает» компьютер, то нашим дамам-химикам приходится гораздо труднее. Доставив в лабораторию очередную порцию байкальской воды, мы можем отдыхать, в то время как у них начинается напряженная работа: измерения кислотности и температуры воды, концентрации растворенного кислорода, диоксида углерода и гидрокарбонат-иона, содержания биогенных элементов и т. д.

Такой плотный режим работы в каждой экспедиции сохраняется примерно от 10 дней до двух недель, но наша команда замечательна тем, что никто не унывает, находится время и для отдыха.

## Как дышит Байкал

На сегодня уже достаточно хорошо изучены суточные ритмы газообмена и изменения химического состава поверхностной воды, причем отчетливо обнаружилась зависимость изменения интенсивности газообмена от сезона года и времени суток. Не претендуя на новизну, скажу, что в теплый период года с первыми лучами солнца биота Байкала начинает свою работу по изъятию углекислого газа из атмосферы, а после заката направление потока  $\text{CO}_2$  меняется, и газ начинает возвращаться в атмосферу.

Внутрисуточные колебания диоксида углерода и содержания кислорода противоположны по знаку, причем ведущую роль в формировании суточного хода концентрации растворенных газов и биогенных элементов играют фотосинтез планктонных и донных водорослей и аэробное разложение органического вещества.

Весьма неожиданными оказались первые зимние эксперименты. Без дополнительных исследований вряд ли можно толково ответить на вопрос: дышит ли Байкал зимой? Согласно нашим данным, пока лед на озере еще тонкий, при восходе и на закате солнца происходит резкий выход углекислого газа в атмосферу, а химический состав поверхностной воды значительно меняется. В какой-то мере это противоречит устоявшемуся мнению специалистов о том, что в зимний период на Байкале газообмен между водой и атмосферой отсутствует.



Несмотря на плотный график работы, наша неунывающая команда находила время и для зимних «видов спорта»

Акустический прибор слушает, как скрипит и трещит лед. Полученные данные помогают понять, что происходит со структурой льда при изменении условий внешней среды



По весеннему байкальскому льду побежали трещины — пора домой. Выезжать пришлось на судне на воздушной подушке

В эксперименте 2005 г. не был обнаружен газообмен в период, когда лед достигает максимальной толщины и пропитывается талой водой. Такое разнообразие процессов и явлений радует, поскольку есть пища для ума и планирования дальнейших экспериментов. Сейчас же нет смысла более детально описывать наши результаты, поскольку в нашем исследовании пройдено не более трети пути. Но путь, который предстоит пройти, уже четко обозначен.

## О главном

И все же — какова главная цель нашей работы и моей статьи в том числе? Понятно, что мы будем продолжать исследования согласно нашим академическим планам. И благодаря любопытству и азарту, который испытываешь при решении проблем, возникающих по мере углубления в суть процессов газообмена.

Но сегодня очевидно, что через несколько лет между странами могут возникнуть серьезные разногласия о количестве выбрасываемого или утилизируемого углекислого газа. Чтобы полноправно участвовать в этих спорах или выступать в роли экспертов, необходимо вести всесторонние исследования и мониторинг изменений содержания парниковых газов на своей территории. И хотя в Сибири такие исследования ведутся довольно активно, все они проводятся нашими учеными в составе международных команд и проектов.



Проводы томских коллег

Фотографии для публикации предоставлены автором

К сожалению, пока ни одной национальной станции наблюдения за парниковыми газами в Сибири нет. Поэтому при возникновении спорных моментов придется остаться пассивными наблюдателями. Возвращаясь к цене вопроса, хочется подчеркнуть, что чрезвычайно высокая стоимость даже небольшого отклонения от квоты (на 1–2 ppm) предъявляет особые требования к точности, регулярности и качеству наблюдений, для большинства чисто исследовательских задач не всегда нужных.

Следовательно, такого рода задача не может быть адекватно решена только в рамках традиционных научных проектов. Для этого нужны энергичные организационные меры по созданию специализированных обсерваторий и проведению международной сертификации. А в Сибирском отделении РАН есть все возможности для проведения высококлассных исследований и наблюдений, по крайней мере, в своем регионе.

И вновь о Байкале. Уже привычное выражение «Байкал — природная лаборатория» зачастую рассматривается несколько однобоко. Да, Байкал таит много интересных загадок, но ведь есть и другая сторона, ускользающая от внимания научной общественности. Байкальский регион — идеальная лаборатория для исследования глобальных изменений природной среды. С уникальным, самым большим в мире озером, разветвленной системой рек, горами, практически всеми типами ландшафта, характерными для Сибири, широким набором крупных промышленных объектов. Нет сомнений, что при правильном проведении исследований полученные здесь научные результаты будут значимы не только для сибирского региона, но и для

понимания и прогнозирования глобальных процессов, происходящих в окружающей среде при взаимодействии ее с человеком.

Начинать уже можно сейчас, и, надеюсь, мои строки тоже послужат ускорению развития событий. Уверен, что молодые ученые — основной рабочий состав нашей команды — смогут ответить, будет ли байкальская вода по характеру природных процессов все так же схожа с натуральным шампанским, в котором в прекрасной гармонии находятся органические соединения и углекислый газ. Или же неразумная человеческая деятельность, искусственно насыщая атмосферу CO<sub>2</sub>, превратит это чудо природы в простую газировку.

Хочется «потрогать» современные приборы, увидеть хорошо оснащенную и добившуюся мирового признания Сибирскую обсерваторию. Да и просто — по зарплатной ведомости — убедиться, что мы занимаемся не только очень интересным, но и нужным для Отечества делом.

