

# ЗОНДИРОВАНИЕ ЗЕМЛИ И АТМОСФЕРЫ ИЗ КОСМОСА

Углекислота  $\text{CO}_2$ , как основной парниковый газ, играет важную роль в тепловом балансе тропосферы и формировании климата на Земле. Именно концентрация  $\text{CO}_2$  в атмосфере является основным фактором, определяющим суммарный парниковый эффект в тропосфере, в формирование которого делают вклад также другие газы, в первую очередь пары воды. Углекислота активно участвует и во многих биогеохимических циклах. Ее содержание определяется множеством биогенных (лесные массивы) и абиогенных (обмен атмосферы и океана) факторов. В последнее время особое беспокойство вызывает антропогенное увеличение двуокиси углерода в атмосфере за счет сжигания органического топлива. Наземные измерения говорят о постоянном увеличении содержания этого газа с начала интенсивного промышленного развития в середине XX века.

Возможные климатические последствия этого процесса интенсивно изучаются ведущими научными центрами всего мира и служат предметом серьезных политических дискуссий. За последние 40 лет наблюдения, ведущиеся с помощью наземной сети, показывают, что только около половины антропогенного  $\text{CO}_2$  остается в атмосфере. Другая половина поглощается океаном и континентальными экосистемами. Однако для надежного отождествления стоков  $\text{CO}_2$ , для проверки численных моделей и составляемых на их основе прогнозов необходим масштабный обзор земной поверхности. До недавнего времени в мире не существовало ни методики, ни измерительной аппаратуры, которые сочетали бы глобальность измерений с высокой разрешающей способностью. Такие измерения необходимы для проверки и мониторинга эффективности вводимых сейчас международных ограничений на сжигание органического топлива.

Другой важнейшей задачей является мониторинг  $\text{CH}_4$ . Метан, будучи сам по себе парниковым газом, выделяется в атмосферу как в результате биогенных процессов, так и локально – в результате аварий газопроводных сетей. Измерения метана позволяют получить данные о его фоновом содержании, собрать важную дополнитель-

ную информацию о состоянии ряда экосистем, а также отработать методику спутникового контроля крупных техногенных выбросов метана, в том числе его утечек в сети многочисленных газопроводов на территории нашей страны. Эффективность поглощения теплового излучения земной поверхности у метана в 60 раз выше, чем у  $\text{CO}_2$ . Выбросы  $\text{CH}_4$ , достигающие в настоящее время (по оценкам) 500 мегатонн в год, и наблюдающийся рост его содержания в атмосфере могут оказать существенное влияние на глобальное потепление. В свою очередь, за счет подтаивания вечной мерзлоты при повышении температуры выделение метана в атмосферу усиливается. Таким образом, роль метана (концентрация которого удвоилась по сравнению с доиндустриальным периодом) со временем возрастает. Общий бюджет метана в атмосфере полагается известным с точностью ~20%, при этом некоторые его составляющие ограничены гораздо хуже. В особенности это касается источников техногенного характера, где оценки бюджета  $\text{CH}_4$  (и других примесей) в атмосфере проводятся на основе локальных измерений их концентрации или косвенных данных о мощности источников.

Перед российскими учеными сегодня стоит задача отработки методики измерения парниковых газов в ближнем ИК-диапазоне со спутников с точностью, необходимой для использования в численных моделях и для мониторинга. При этом аппаратура должна быть компактной, пригодной для установки на спутниках различных типов. В России аналогичных спутниковых систем пока нет; измерения интегрального содержания парниковых газов в столбе атмосферы с необходимой точностью проводятся на ограниченном числе наземных станций.

Для отработки методики измерения из космоса содержания парниковых газов в атмосфере Земли был подготовлен эксперимент «РУСАЛКА». Его цель – в демонстрации возможности измерения содержания  $\text{CO}_2$  из космоса с помощью компактной аппаратуры. Измерения проводятся с борта Международной космической станции (МКС) с участием космонавтов. В конце июля 2009 года с Байконура на МКС стартовал грузовой корабль «Про-

гресс М-67». На МКС доставлена уникальная научная аппаратура «РУСАЛКА», разработанная и созданная в Институте космических исследований РАН. Название аппаратуры расшифровывается как Ручной Спектральный Анализатор Компонентов Атмосферы. Эксперимент «РУСАЛКА» на российском сегменте МКС предназначен для отработки методики измерения содержания в атмосфере Земли парниковых газов ( $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$ ) с околоземной орбиты с высокой точностью, необходимой для локализации их источников и стоков на поверхности (для  $\text{CO}_2$ : 1 ppm). Малый вес и размеры позволяют в дальнейшем использовать подобную аппаратуру на группировках малых спутников для непрерывного мониторинга содержания и распределения парниковых газов в атмосфере Земли.

С научной аппаратурой «РУСАЛКА» работают все российские космонавты на борту МКС. Рабочий диапазон спектрометра 0,76–1,7 мкм, спектральное разрешение  $R = 20\,000$ , мгновенное поле зрения по Земле  $0,4 \times 4$  км. Начало работ космонавтов с прибором пришлось на середину августа 2009 года, общая продолжительность эксперимента – не менее двух лет. На сегодняшний день прибор успешно действует на борту МКС; получены экспериментальные данные для всех основных типов и режимов работы. Концентрации парниковых газов в столбе атмосферы Земли на основе поступающих экспериментальных данных восстанавливаются путем сравнения экспериментальных спектров с расчетными. Результаты первичной обработки хорошо согласуются с данными наземных наблюдений.

Работы по разработке малогабаритного спектрометра высокого разрешения ИК-диапазона ведутся в России с 2001 года, когда была предложена новая концепция эшелле – спектрометра высокого разрешения с использованием акустооптического фильтра для разделения порядков дифракции. Уже первый лаборатор-

ный прототип продемонстрировал возможность создания прибора массой не более 5 кг с разрешающей силой  $R > 30\,000$  в диапазоне 1–1,7 мкм. С его помощью проведены опытные атмосферные измерения. На основе этой разработки, в кооперации Россия – Франция – Бельгия, в проекте «Венера-Экспресс» Европейского космического агентства реализован совместный космический эксперимент SOIR (2,2–4,2 мкм,  $R \sim 25\,000$ ) для исследования атмосферы Венеры с высоким спектральным разрешением (запуск состоялся в 2005 году). Высокое разрешение этого класса приборов ( $\sim 25\,000$ ) достаточно для точного измерения парниковых газов в ближнем ИК-диапазоне на Земле. На основе этой разработки предложен эксперимент для МКС. Была показана возможность измерения содержания углекислого газа и метана в атмосфере Земли с борта космических аппаратов с помощью спектрометра высокого разрешения в ближней инфракрасной области спектра. Обосновано применение различных вариантов конструкции спектрометра (с применением полосовых интерференционных фильтров и акустооптической фильтрации для выбора порядков дифракции, а также многоканальных спектрометров) для различных типов спутников. Показана целесообразность применения таких спектрометров на наземных станциях для мониторинга и валидации космических измерений.

Вырабатываемую методику можно без сомнения рекомендовать для дальнейшей отработки и применения. Ведутся работы по сопровождению эксперимента на борту МКС. Проводится детальная обработка данных и по спектрам высокого разрешения, измеренным с орбиты, разрабатываются алгоритмы восстановления концентраций малых газовых составляющих в атмосфере Земли. Проработаны решения для будущих экспериментов и работ по дистанционному зондированию атмосферы Земли в ближнем ИК-диапазоне.

ДИРЕКТОР ИНСТИТУТА  
КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
АКАДЕМИК РАН  
Л.М. Зелёный