

## ДИСТАНЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ ГАЗОВОГО СОСТАВА ВУЛКАНИЧЕСКИХ ЭМИССИЙ МЕТОДОМ ИНФРАКРАСНОЙ ФУРЬЕ-СПЕКТРОСКОПИИ

*Ольга Неусыпина<sup>1</sup>, Роланд Хариг<sup>1</sup>, Майк Буртон<sup>2</sup>, Михель Груттер<sup>3</sup>, Михаэль Йордан<sup>1</sup>, Ян Горгас<sup>1</sup>, Петер Руш<sup>1</sup>, Йорн Герхард<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>*Кафедра измерительной техники окружающей среды (UMT), Гамбургский Технический Университет (ТУНН), Германия; harig@tuhh.de*

<sup>2</sup>*Национальный институт геофизики и вулканологии (INGV), Катания, Италия*

<sup>3</sup>*Центр Изучения Атмосферы, UNAM, Мексико*

### **Введение**

Метод инфракрасной фурье-спектроскопии (FTIR) дает возможность идентификации и измерения компонентов различных газовых составов на большом расстоянии. Системы, основанные на этом методе, позволяют проводить автоматический мониторинг больших и недоступных районов. Данная работа описывает метод FTIR и использование двух на нем основанных систем для мониторинга газового состава ряда вулканов.

Система **SIGIS** была разработана на кафедре Измерительной техники окружающей среды (UMT) в Гамбургском Техническом Университете для широкого спектра измерений на большом расстоянии (индустриальных, аварийных и природных) и была успешно испытана для длительного мониторинга SO<sub>2</sub> на вулкане Попокатепетль в Мексике.

Система **Cerberus** была также разработана в ТУНН для измерения газового состава вулканических эмиссий с кромки кратера. Она установлена и испытана на вулкане Стромболий в Италии и является первой системой, дающей возможность непрерывного мониторинга вулканических эмиссий на расстоянии.

### **Метод инфракрасной фурье-спектроскопии**

Метод FTIR использует абсорбцию/эмиссию характерных частот инфракрасного (ИК) излучения различными газообразными и жидкими веществами. Спектр инфракрасного излучения, которое проходит сквозь газовое облако, получает от облака характерный отпечаток, свойственный только компонентам данного газового состава. Через измерение спектра этого излучения возможны выводы о присутствии и концентрации компонентов газового состава методом сравнения полученного спектра с известными спектрами различных веществ. Источником инфракрасного излучения служит задний фон, например горы, лес, камни или небо.

Чтобы получить необходимый спектр инфракрасного излучения, используется интерферометр Михельсона. Он модулирует входящее излучение и подает его на детектор. Спектр излучения выводится через преобразование Фурье сигнала детектора.

### **Идентификация и количественная оценка газовых составляющих**

Идентификация газовых составляющих основана на сравнении полученных спектров с эталонными спектрами составляющих. Полученный спектр анализируется последовательно для каждого возможного составляющего, спектральный эталон которого присутствует в базе данных. Анализ включает в себя три стадии. В первой стадии из эталонных спектральных сигнатур газов, присутствующих в атмосфере, выбранного составляющего и потенциальных интерферентов, подбирается спектр, который наиболее точно повторяет измеренный спектр.

Во второй стадии от вычисленного таким образом спектра вычитываются все спектральные сигнатуры атмосферных газов и интерферентов, кроме выбранного составляющего. В третьей стадии, чтобы принять решение о присутствии или отсутствии данного составляющего в газовом составе, проводится корреляция между спектром, полученным во второй стадии и эталонным спектром данного вещества. Кроме этого проводится корреляция между измеренным и симулированным спектрами. Если все коэффициенты корреляции и отношение "сигнал-шум" являются выше установленных для этого составляющего границ, составляющее считается идентифицированным.

## Сканирующая система дистанционного измерения SIGIS

Сканирующая FTIR-система SIGIS основана на комбинации интерферометра и телескопа. Кроме этих главных составляющих в систему входят зеркальная система для сканирования поля зрения, видеокамера и компьютер для управления прибором, анализа измерений и вывода результатов на экран. [R. Harig, 2005].

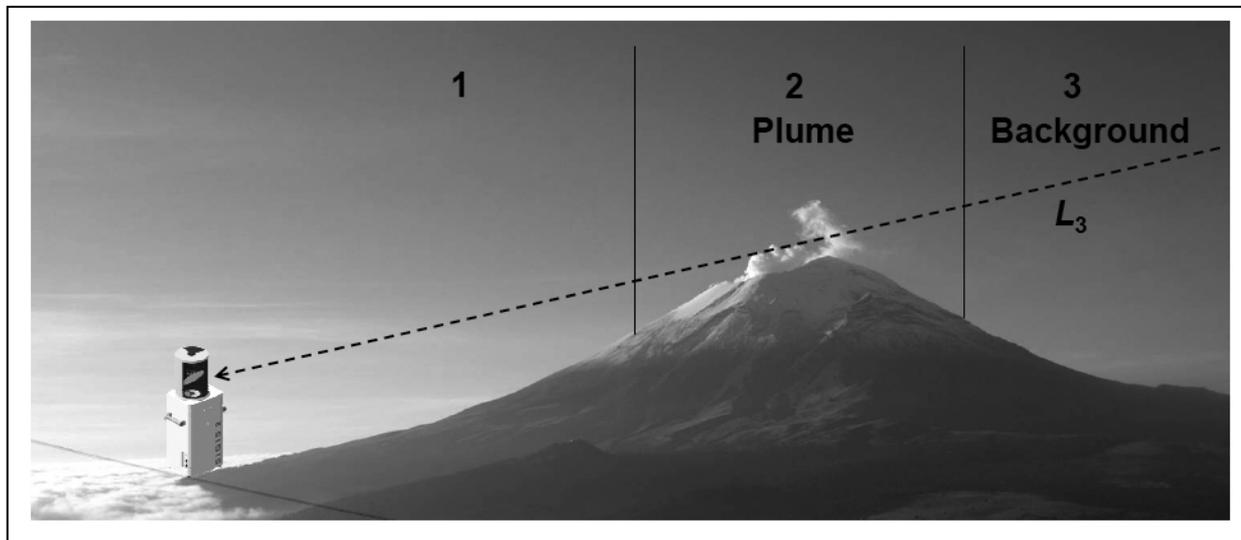


Рис. 1 Модель распространения излучения

### Модель распространения излучения

Излучение измеряемое интерферометром включает в себя спектральные компоненты заднего фона, газового облака и атмосферы. Чтобы описать получаемый спектр, состоящий из этих составляющих, используется модель распространения излучения (рис. 1). Пространство между прибором и задним фоном можно разделить на три слоя. Излучение заднего фона (слой 3) проходит через газовое облако (слой 2) и через атмосферу между облаком и прибором (слой 1). Слои 1 и 2 считаются гомогенными по всем внутрислойным физическим и химическим параметрам. Если считать источник инфракрасного излучения черным телом, то можно высчитать разницу между излучением, выходящим из слоя 3 и излучением, входящим в слой 1 и тем самым вывести влияние слоя 2 на спектр инфракрасного излучения. [R. Harig и др., 2007].

### Работа системы

С помощью системы SIGIS можно проводить FTIR-измерения на расстоянии нескольких десятков километров. Система была установлена в 11 км от кратера Попокатепетля для измерения вертикального профиля  $\text{SO}_2$  в дымовом султানে. Положение системы относительно самого вулкана показано на рис. 2а. Измерения проводились каждые 3 минуты. Последовательный анализ полученных измерений дает возможность сделать выводы о проекции скорости ветра и вычислить количество выходящего  $\text{SO}_2$ .

Во время измерения работают одновременно интерферометр и видеокамера. Интерферометр направляется зеркальной системой поочередно на все точки поля зрения, для каждой точки снимается спектр и анализируется методом, описанным выше. Для визуализации облака  $\text{SO}_2$  концентрация каждой точки пересчитывается в псевдо-цветное отображение, накладывается на картинку видеосъемки и выводится на экран компьютера. Это дает возможность оценки местонахождения и размера газового облака. Размер, направление и разрешение поля зрения можно подстроить под объект измерения. Выбор поля зрения прибора производится выбором нужной области на видеоизображении с помощью мышки. Рис. 2б показывает визуализацию одного из измерений.

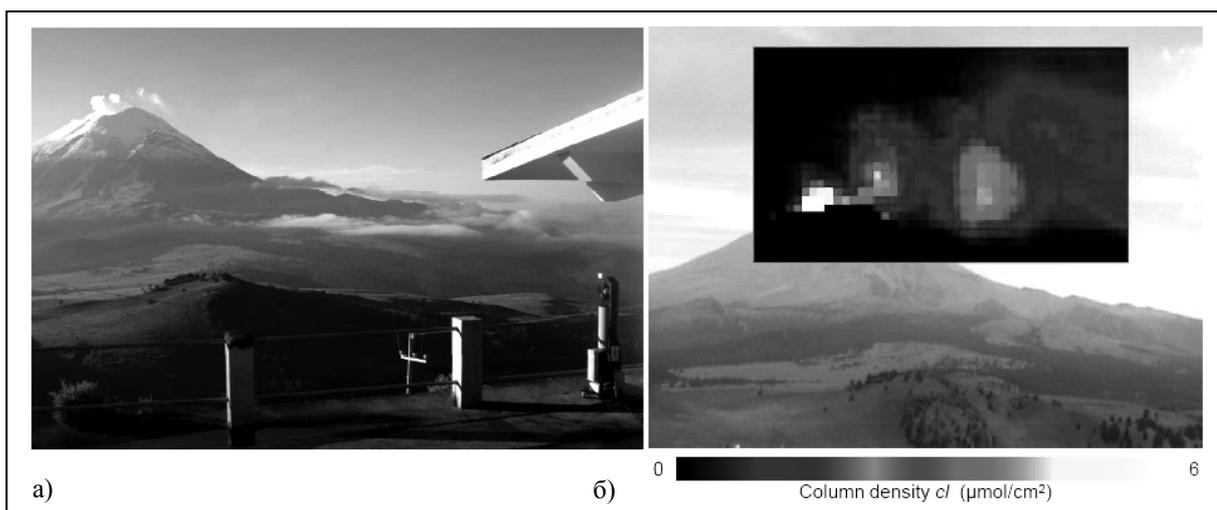


Рис. 2 а) Установка системы. б) Псевдо-цветное отображение вертикального профиля  $\text{SO}_2$

### Результаты измерений системой SIGIS

Во время измерений была получена количественная оценка концентрации  $\text{SO}_2$  в окружающем вулкан пространстве, а также общее количество выходящего  $\text{SO}_2$  за определенный временной интервал. Измерения проводились днем и ночью, при солнечной так и при облачной погоде.

### Cerberus – Система дистанционного измерения для непрерывного мониторинга

Система Cerberus использует метод FTIR для измерения вулканических эмиссий с кромки кратера. Она была разработана для осуществления непрерывного мониторинга измерений газового состава и установлена на вулкане Стромболий в Италии. При конструкции были учтены высокие температуры и наличие разъедающих газов на месте измерений и прибор был помещен в газонепроницаемую оболочку.

### Основная структура системы Cerberus

Система Cerberus включает в себя интерферометр (M4406-S MIDAC) с инфракрасным детектором диапазона  $2000\text{-}5000\text{ см}^{-1}$  (в волновых числах), сканирующую зеркальную систему, инфракрасную камеру и электронику для управления прибором и для коммуникации. Инфракрасное излучение входит в систему через сапфировое окно. Внешний облик системы показан на рис. 3а.

Инфракрасная камера предоставляет ИК-изображения поля зрения прибора, которые используются для направления интерферометра на нужную точку в поле зрения с помощью зеркальной системы. Также ИК-изображения используются для автоматического определения горячих точек, которыми являются регионы с сильным ИК-излучением, возникающие после извержений. Для управления системой используется встроенный компьютер с операционной системой Windows XP и микроконтроллер. Компьютер подключен к Ethernet-сети беспроводным образом через антенну Wi-Fi.

Питание прибора осуществляется через два аккумулятора, которые заряжаются от двух солнечных батарей размером 2х3 метра (рис. 3в). Потребляемая мощность системы составляет 60 В, в спящем режиме менее 3В. Размеры системы: 50(длина) х 30(ширина) х 35см(высота), вес – 20 кг.

### Управление системой

Для управления системой используется программа GeDetekt, разработанная на кафедре УМТ, ТУНН в течении нескольких лет. Управление системой происходит с отдаленного компьютера, команды посылаются по Ethernet-сети. Программа GeDetekt может быть установлена на встроенном системном компьютере и оперироваться через Windows-функцию "Remote Control" или быть установленной на компьютере оператора и посылать системе нужные команды через Ethernet-сеть. Также возможна автоматическая работа без участия оператора. Все измерения сохраняются на жестком диске и могут быть загружены на компьютер оператора.

С помощью системного монитора возможен полный контроль системной температуры и заряда аккумуляторов. При выходе этих параметров за заданные границы прибор высылает емейл с предупреждением и содержанием системного журнала (logfile). Возможно автоматическое выключение системы. Также на заданный емейл-адрес ежедневно высылается емейл с полученными измерениями.

Программа управления питанием дает возможность включать или выключать компьютер или питание отдельных компонентов вплоть до спящего режима или полного выключения.

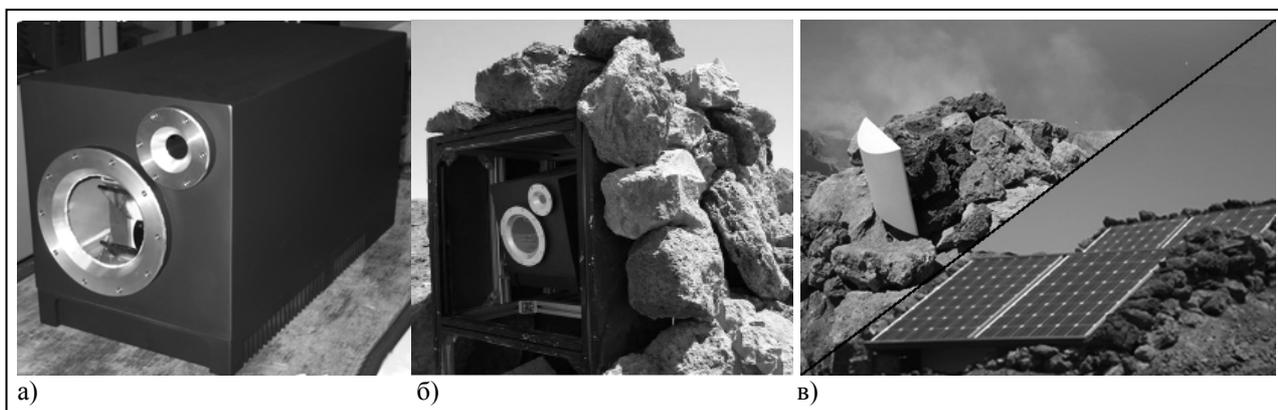


Рис. 3 а) Система Cerberus б) Установка системы в) Wi-Fi антенна / Солнечные батареи

### **Програмные функции**

Системная функция "Поиск горячих точек" дает возможность автоматически направить прибор на подходящие точки измерения. Чтобы найти самую горячую точку в поле зрения, и тем самым область с самым интенсивным ИК-излучением и наибольшей газовой эмиссией, программа высчитывает для каждой точки среднее значение интенсивности излучения из окружающих точек и выбирает самую горячую точку. С помощью сканирующей системы прибор может быть направлен на эту точку для начала измерений.

Функция "Обнаружение событий" автоматически следит за вулканическими событиями в кратере. Если число точек с превышенной интенсивностью излучения переходит заданный порог, система сообщает об обнаружении извержения или взрыва. При этом возможно начать автоматическую запись ИК-спектров или видеосъемку.

### **Эксплуатация системы на месте измерения**

Система Cerberus была установлена и испробована на кратере вулкана Стромболия в Италии. Место установки системы было выбрано с учетом видимости всех отверстий кратера. На рис. 4б показана система, установленная в металлическом каркасе и прикрытая камнями для защиты от взрывов. Система подключена к Wi-Fi антенне, которая соединяет систему со стационаром у подножия вулкана и тем самым с Интернет-сетью (рис. 3в).

После установки система оперировалась со стационара и с кафедры UMS в Гамбурге. Были получены спектры вулканических эмиссий, которые показывают измерение концентрации отдельных компонентов газового состава во времени. На рис. 5 показан один из снятых спектров. На спектре четко видны абсорбционные линии, которые дают возможность определения составляющих газового состава. Количественная оценка концентрации составляющих получается через компьютерный анализ спектра.

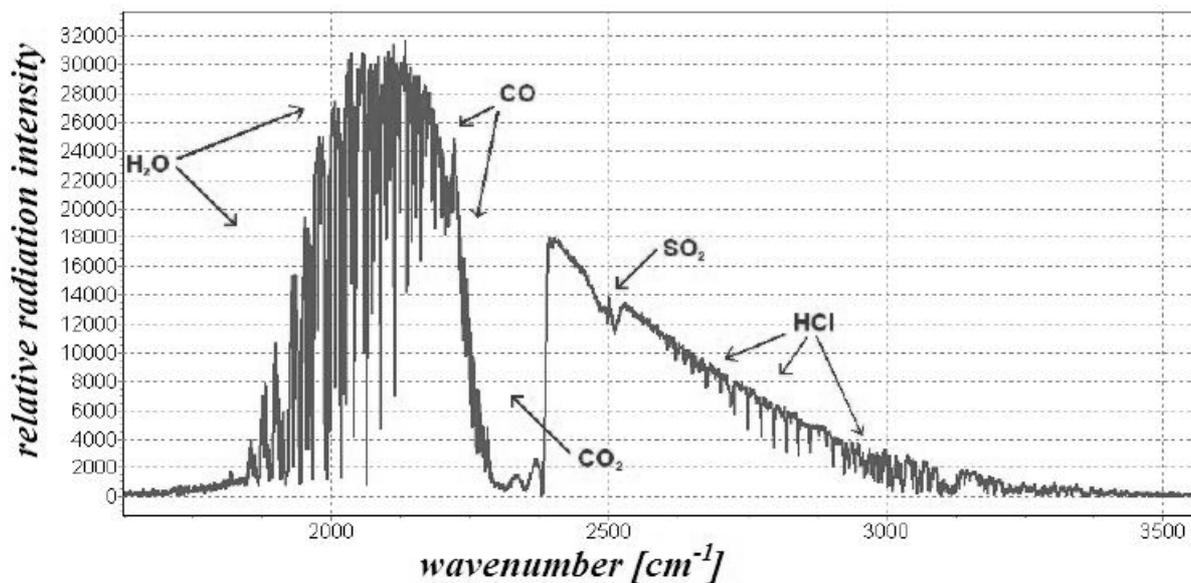


Рис. 4. Пример полученного спектра

#### Заключение

На основе метода FTIR были построены и установлены на месте измерений две системы для мониторинга газового состава вулканических эмиссий.

Система SIGIS была использована для измерения уровня SO<sub>2</sub> на вулкане Попокатепетль. С помощью этой системы возможна количественная оценка и мониторинг изменений эмиссий во времени и в пространстве. Измерения могут проводиться с больших расстояний, днем и ночью а также при облачной погоде.

Система Cerberus была разработана для измерения газового состава с кромки кратера вулкана. Непрерывные измерения вариаций концентраций отдельных составляющих были проведены на вулкане Стромболий. Система может работать самостоятельно, также возможно управление через сеть Интернет.