

**Аннотация к циклу работ, посвященных разработке метода гетеродинной спектроскопии ближнего ИК диапазона для анализа состава, структуры и динамики атмосфер земной группы.**

1. Авторы:

- a. Зеневич Сергей Геннадьевич;
- b. Газизов Искандер Шамилевич.

2. Названия:

- a. The improvement of dark signal evaluation and signal-to-noise ratio of multichannel receivers in NIR heterodyne spectroscopy application for simultaneous CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> atmospheric measurements;
- b. Portable multichannel heterodyne spectroradiometer for simultaneous atmospheric CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> precision column measurement in the near infrared range;
- c. A Concept of 2U Spaceborne Multichannel Heterodyne Spectroradiometer for Greenhouse Gases Remote Sensing.

3. Ссылки на публикации (индексируются базами WoS и Scopus, каждая работа имеет аффилиацию с ИКИ РАН):

- a. The improvement of dark signal evaluation and signal-to-noise ratio of multichannel receivers in NIR heterodyne spectroscopy application for simultaneous CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> atmospheric measurements / S.G.Zenevich, I.S.Gazizov, D.V.Churbanov et al. // OSA Continuum. – 2020. – Vol. 3. - № 7. – P. 1801–1810. Doi: 10.1364/OSAC.395094;
- b. Portable multichannel heterodyne spectroradiometer for simultaneous atmospheric CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> precision column measurement in the near infrared range / S.G.Zenevich, I.S.Gazizov, D.V.Churbanov et al. // 26th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics, Atmospheric Physics: Proc. SPIE 11560. – 2020. – P. 1156047. Doi: 10.1117/12.2575506;
- c. A concept of 2U spaceborne multichannel heterodyne spectroradiometer for greenhouse gases remote sensing / S.Zenevich, I.Gazizov, D.Churbanov et al. // Rem. Sens. – 2021. – Vol. 13. – P. 2235. Doi: 10.3390/rs13122235.

4. Общая формулировка научной проблемы и ее актуальность:

Данный цикл работ посвящен проблеме прецизионного измерения концентрации парниковых газов (ПГ), содержание которых в атмосфере оказывает ключевое влияние на изменение климата.

Выбросы ПГ оказывают комплексное воздействие на атмосферу во всем диапазоне её высот, приводя не только к усилению парникового эффекта, но и к образованию химических соединений, оказывающих дополнительное негативное воздействие на атмосферу. В связи с этим проблема высокоточного и долгосрочного мониторинга концентрации ПГ в атмосфере является актуальной. В частности, эта проблема достаточно остро стоит в России, так как значительная часть территории страны приходится на арктическую зону. Арктика – регион, подверженный наиболее быстрому потеплению в последние десятилетия. Считается, что потепление в арктических широтах приводит к существенным дополнительным выбросам метана.

Таким образом, разработка высокоточных методов дистанционного измерения ПГ для оценки их источников и стоков в глобальном масштабе, в совокупности с методами измерения процессов переноса воздушной массы, является необходимой мерой для эффективного контроля качества окружающей среды. Качественный и высокоточный мониторинг ПГ с динамической картиной их переноса также является необходимым инструментом контроля качества окружающей среды и трансграничного переноса ПГ в рамках международных соглашений.

5. Конкретная решаемая в цикле работ задача и ее значение:

В данном цикле работ решается задача по разработке многоканального лазерного гетеродинного спектрометра (МЛГС) высокого разрешения ( $\lambda/\delta\lambda \sim 10^7$ ) ближнего инфракрасного диапазона, улучшению его характеристик, а также по измерению и глубокому анализу спектров пропускания атмосферы высокого разрешения. Дистанционное зондирование атмосферы с высоким спектральным разрешением дает возможность анализировать не только химический состав атмосферы (например, среднее значение концентрации определенного ПГ), но также исследовать структуру и динамику атмосферы, путем решения обратных задач спектроскопии. Конечная цель проекта – создание сети наземных станций на основе гетеродинного спектрометра для непрерывного мониторинга ПГ в атмосфере, а также для валидации данных аналогичных спутниковых миссий.

6. Используемый подход, его новизна и оригинальность:

В основе работы МЛГС лежит принцип гетеродинной регистрации оптического излучения, который заключается в сбивании двух оптических сигналов на квадратичном по полю детекторе, в результате чего возникает сигнал на промежуточной частоте (ПЧ), который по своей несущей частоте приходится на радиодиапазон, что значительно облегчает его регистрацию и дальнейшую обработку. В качестве опорного источника или локального осциллятора (ЛО) используется лазер, а Солнце (в случае МЛГС) является исследуемым сигналом, который, пройдя через атмосферу, несет в себе информацию об атмосферном поглотителе. Основные преимущества гетеродинной спектроскопии заключаются в высоком спектральном разрешении (порядка 0,001-0,0001 см<sup>-1</sup>) и высокая чувствительность, ограниченная только квантовым пределом. Однако, реализация способа оптического гетеродинирования в ближнем ИК диапазоне имеет некоторые особенности в сравнении с классическим способом, исторически развивавшемся в среднем ИК диапазоне спектра. Классический способ подразумевает использование ЛО с постоянной частотой излучения и регистрацию сигнала ПЧ в широком спектральном диапазоне порядка единиц ГГц. В случае применения данной методики в ближнем ИК диапазоне, нашей группой в качестве ЛО используется диодный лазер с распределенной обратной связью, частота которого непрерывно перестраивается в целевой области спектра. Регистрация сигнала ПЧ происходит в узком спектральном диапазоне порядка единиц МГц. Данный факт позволяет отказаться от использования спектроанализатора сигнала ПЧ и создавать компактное измерительное оборудование на основе относительно недорогих телекоммуникационных компонентов.

Работая в режиме с высоким спектральным разрешением, очень важно стабилизировать частоту ЛО с высокой точностью, чтобы минимизировать аппаратные искажения измеряемого, полностью разрешенного контура индивидуальной колебательно-вращательной линии поглощения в спектре пропускания атмосферы. Для этой цели в структуре МЛГС используются реперные каналы, которые представляют собой однопроходные или многопроходные оптические кюветы, заполненные необходимым газом при низком давлении. В реперном канале во время работы лазера непрерывно регистрируется узкая линия поглощения. На основе положения пика наблюдаемой линии поглощения реализована дополнительная обратная связь в цикл стабилизации частоты ЛО на основе термоэлемента Пельтье. Данный способ, в отличии от стандартного, когда

используется только термоэлемент Пельтье, не зависит от температурных колебаний окружающей среды, и позволяет стабилизировать частоту ЛО с точностью 1,5 МГц. Данный подход, в приложении к методу гетеродинамирования оптического излучения в ближнем ИК диапазоне, используется нашей группой впервые в мире.

Еще одной особенностью МЛГС является многоканальная регистрация оптического излучения. Поле зрения любого гетеродинамированного спектрометра ограничено дифракционным пределом, обусловленным необходимостью совмещения волновых фронтов сбиваемых оптических сигналов. По этой причине, эффективное поле зрения спектрометра не зависит от входной оптики и всегда меньше доступного. Данный факт обуславливает длительное накопление сигнала для достижения удовлетворительного отношения сигнал/шум. На сегодняшний день, среди разработчиков гетеродинамированных спектрометров среднее значение времени, в течение которого происходит накопление сигнала составляет 10 минут. Введение многоканальной системы регистрации сигнала ПЧ, путем одновременного задействования нескольких полностью идентичных приемников, позволяет обойти фундаментальные ограничения и существенно сократить время накопления и увеличить отношение сигнал/шум. В частности, нашей группе удалось добиться сокращения времени усреднения сигнала в 10 раз и увеличения отношения сигнал/шум в 5 раз в сравнении с одноканальным прототипом гетеродинамированного спектрометра, опубликованном нашей группой в первых работах данной темы. Демонстрация возможностей многоканальной системы оптического гетеродинамирования в четырехканальном исполнении была продемонстрирована нашей группой впервые в мире.

Высокое спектральное разрешение МЛГС позволяет измерять полностью разрешенные контуры индивидуальных колебательно-вращательных линий поглощения парниковых газов (ПГ) в спектрах атмосферного пропускания. В профиле измеренной линии содержится информация о разных высотах, через которые солнечное излучение проходит по пути к поверхности перед его регистрацией. Данный факт обуславливает необычную форму линии поглощения с сильно уширенными крыльями и узким пиком. Решая обратную задачу спектроскопии, можно извлечь информацию не только о среднем значении концентрации ПГ в столбе атмосферы, но и применяя методы Тихоновской регуляризации, возможно восстанавливать вертикальное распределение значения концентрации измеряемого ПГ в атмосфере до высоты 50 км с вертикальным разрешением 2-3 км. Более того, благодаря высокоточной стабилизации частоты ЛО, удастся регистрировать и анализировать доплеровские возмущения контура линии поглощения, что, в конечном счете, позволяет извлекать информацию о проекции скорости ветра вдоль луча зондирования атмосферы. Таким образом, нашей группе удастся дистанционно измерять вертикальный профиль проекции скорости ветра до высоты 50 км с точностью 3-5 м/с и вертикальным разрешением 2-3 км. Возможность пассивных доплеровских измерений на основе спектров пропускания атмосферы высокого разрешения продемонстрирована нашей группой впервые в мире.

#### 7. Полученные результаты и их значимость:

В результате проведенных работ был разработан прототип МЛГС высокого разрешения ближнего ИК диапазона, который измеряет среднее значение концентрации углекислого газа и метана в столбе атмосферы с субпроцентной точностью. Достигнут мировой рекорд по проведению атмосферных измерений с высоким спектральным разрешением  $0,0013 \text{ см}^{-1}$  в ближнем ИК диапазоне и точностью стабилизации частоты локальных осцилляторов 1,5 МГц. Продемонстрирована возможность восстановления вертикальных профилей концентрации ПГ до высоты 50 км из спектров пропускания атмосферы высокого разрешения с вертикальным разрешением 3-5 км. Подробно описана уникальная методика пассивных доплеровских измерений профиля скорости ветра на основе анализа спектров пропускания атмосферы высокого разрешения и продемонстрированы экспериментальные результаты по профилированию скорости ветра до

высоты 50 км с точностью 3-5 м/с. Внедрение многоканальной структуры гетеродинного приемника позволило сократить время накопления сигнала до единиц секунд, демонстрируя при этом существенное значение отношения сигнал/шум. Результаты, полученные в рамках данного цикла работ, открывают ранее недоступную возможность использования метода гетеродинной регистрации оптического излучения в ближнем ИК для орбитальных исследований состава, структуры и динамики атмосфер планет земной группы в режиме солнечных затмений. В двух работах данного цикла описаны возможности использования данной технологии для орбитального исследования атмосфер Марса и Земли в ближнем ИК диапазоне.

Автор №1

С.Г.Зеневич

Автор №2

И.Ш.Газизов