

НОВЫЕ РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ И ЭЛЕМЕНТЫ

УДК 621.38.049.77

ПРИМЕНЕНИЕ СВЕРХПРОВОДНИКОВОГО ИНТЕГРАЛЬНОГО ПРИЕМНИКА В СОСТАВЕ ИНСТРУМЕНТА TELIS ДЛЯ СПЕКТРОСКОПИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ

© 2016 г. О. С. Киселев*, А. Б. Ермаков, В. П. Кошелец, Л. В. Филиппенко

*Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
Российская Федерация, 125009 Москва, ул. Моховая 11, стр. 7*

**E-mail: kiselev@hitech.cplire.ru*

Поступила в редакцию 18.02.2016 г.

Представлен разработанный в ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН сверхпроводниковый интегральный приемник (СИП) – супергетеродинный приемник, предназначенный для приема излучения в диапазоне 450...650 ГГц. Описано применение СИП в качестве одного из приемных элементов инструмента TELIS (Terahertz Limb Sounder) – прибора, установленного на высотном аэростате и предназначенного для исследования состава атмосферы в терагерцевом диапазоне в режиме наклонного сканирования. Дано описание инструмента TELIS, его приемных элементов, а также результаты нескольких успешных измерительных кампаний 2009–2014 гг., проведенных в полярных областях.

DOI: 10.7868/S0033849416110061

ВВЕДЕНИЕ

Терагерцевая область частот, располагающаяся в промежутке между 300 ГГц и 3 ТГц, находится на стыке электроники и фотоники с точки зрения применяемых методов исследования и инструментов. Терагерцевый диапазон частот обладает некоторыми уникальными свойствами, которые не так давно нашли применение на практике. Например, терагерцевое излучение используется для неразрушающего исследования объектов: благодаря относительно большой длине волны (0.1...1 мм) излучение проникает вглубь непроводящих материалов, и в то же время не ионизирует их. Такие свойства терагерцевого излучения позволяют успешно применять его при создании сканеров-детекторов оружия и взрывчатых веществ, а также для медицинской диагностики. Другая область применения терагерцевого излучения – дистанционное исследование состава газовых смесей и атмосферы. Так как большинство молекул газов и других веществ, содержащихся как в атмосфере Земли и других планет, так и в межзвездном пространстве, имеют специфические линии поглощения в данном диапазоне частот, возможно дистанционное исследование состава газов как в лаборатории, так и вне ее.

Быстрое развитие терагерцевых технологий началось не так давно, и данный диапазон до сих пор является наименее исследованным. Одна из причин этого – так называемый “терагерцевый провал” – отсутствие компактных, надежных

управляемых источников и детекторов, работающих в терагерцевом диапазоне. Низкая энергия кванта излучения (по сравнению с оптическими фотонами), накладывает особые требования на чувствительность применяемых приборов. Все перечисленное создает сложности при разработке высокочувствительных терагерцевых приемных устройств и увеличивает их стоимость.

Детектирование слабых сигналов в терагерцевом частотном диапазоне – одна из областей, в которых первенство сверхпроводниковой электроники неоспоримо. На частотах до 1.4 ТГц наилучшей чувствительностью обладают супергетеродинные приемники со смесительными элементами на основе переходов сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник (СИС), а в области более высоких частот – болометры на основе тонких сверхпроводящих пленок. Именно поэтому сверхпроводниковые приемники используются на большинстве радиотелескопов мира, а также в современных радиоастрономических спутниковых инструментах.

1. СВЕРХПРОВОДНИКОВЫЙ ИНТЕГРАЛЬНЫЙ ПРИЕМНИК

При когерентном приеме сигналов одним из важнейших элементов является гетеродин; его диапазон перестройки, спектральные характеристики и диапазон согласования со смесителем влияют на характеристики устройства в целом. Традиционными лабораторными источниками

излучения терагерцевого диапазона являются массивные генераторы на основе лампы обратной волны, либо сравнительно низкочастотные полупроводниковые аналоги (например, диод Ганна). Лишь в последние годы за счет создания мощных полупроводниковых усилителей высокой частоты (порядка 100 ГГц) и использования многокаскадных умножителей удалось “закрыть” терагерцевый диапазон полупроводниковыми источниками. Такие устройства достаточно компактны для применения в бортовых авиационных или космических системах. Тем не менее диапазон перестройки полупроводниковых генераторов до недавнего времени составлял не более 10...15% от центральной частоты и они не могли быть интегрированы на одной микросхеме со смесителем, как сверхпроводниковый генератор. Поэтому сверхпроводниковые генераторы гетеродина (СГГ) на основе распределенных джозефсоновских переходов по сочетанию массогабаритных и частотных характеристик до сих пор обладают значительными преимуществами.

В ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН была предложена и апробирована концепция сверхпроводникового интегрального приемника (СИП) [1, 2], которая основана на принципиально новом подходе – интеграции сверхпроводникового генератора гетеродина с квантовым смесителем на квазичастичной нелинейности туннельных СИС-переходов и сверхпроводниковой антенной в одной микросхеме (рис. 1). Микросхема изготавливается на кремниевой подложке толщиной 0.5 мм методами современной микроэлектроники и содержит выполненные на базе трехслойной структуры Nb–AlN–NbN сверхпроводниковый смеситель, иммерсионную линзовую дипольную или щелевую антенну, сверхпроводниковый гетеродин и дополнительный смеситель для системы фазовой автоподстройки частоты гетеродина. Размер схемы с контактными площадками составляет 4×4 мм.

Созданный прибор обладает следующими характеристиками: диапазон перестройки сверхпроводникового генератора гетеродина 300...750 ГГц, а благодаря разработке специальных алгоритмов управления, была реализована плавная перестройка частоты генератора во всем диапазоне рабочих частот; нескорректированная шумовая температура в двухполосном режиме работы приемника – до 110 К (см. рис. 2); спектральное разрешение – лучше 1 кГц. Наличие двух оптимальных частотных диапазонов приема, разделенных частотой, соответствующей мощной линии воды (557 ГГц), обусловлено изначальными требованиями к приемнику: наличие двух диапазонов приема 490...550 и 600...650 ГГц.

Благодаря выдающимся массогабаритным характеристикам, малому энергопотреблению и, в первую очередь, высокой чувствительности,

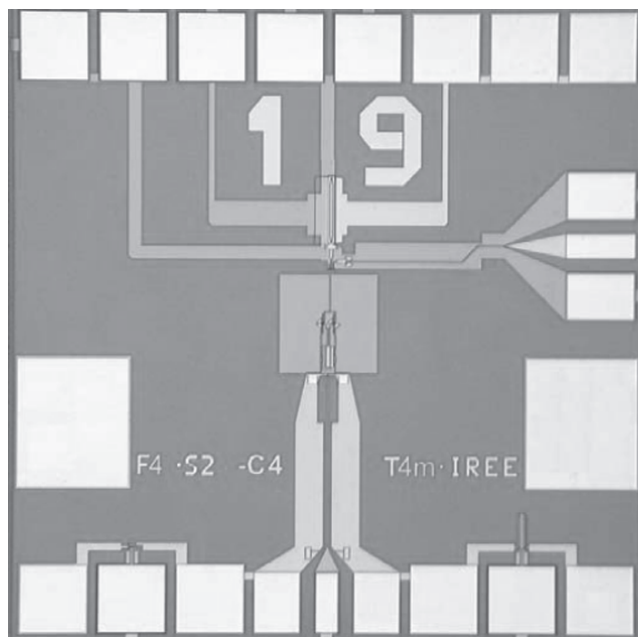


Рис. 1. Увеличенная фотография микросхемы СИП.

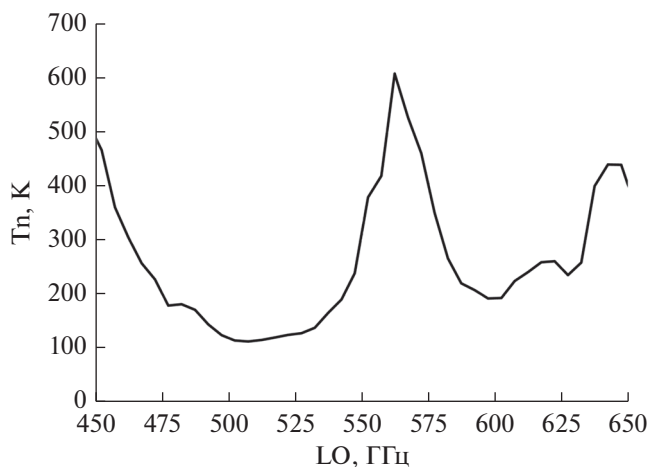


Рис. 2. Зависимость шумовой температуры (Tn), измеренной в двухполосном режиме, от частоты гетеродина (LO).

СИП был выбран для использования в качестве приемного элемента инструмента TELIS.

2. ИНСТРУМЕНТ TELIS

Создание инструмента TELIS явилось результатом совместной работы четырех институтов: Немецкого аэрокосмического центра (DLR, Германия), Лаборатории Резерфорда-Эпплтона (RAL, Великобритания), Института космических исследований Нидерландов (SRON, Нидерланды) и Института радиотехники и электроники

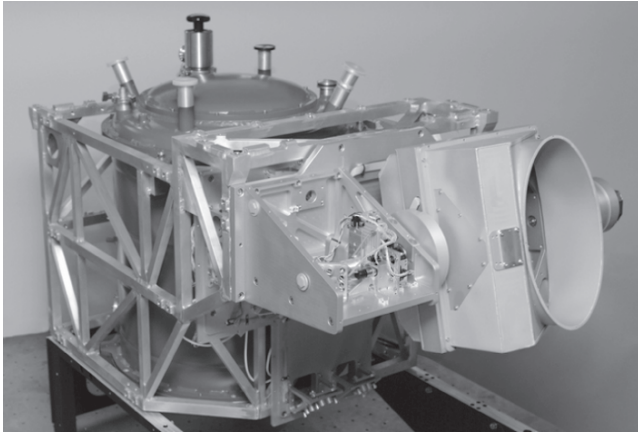


Рис. 3. Общий вид инструмента TELIS [3].

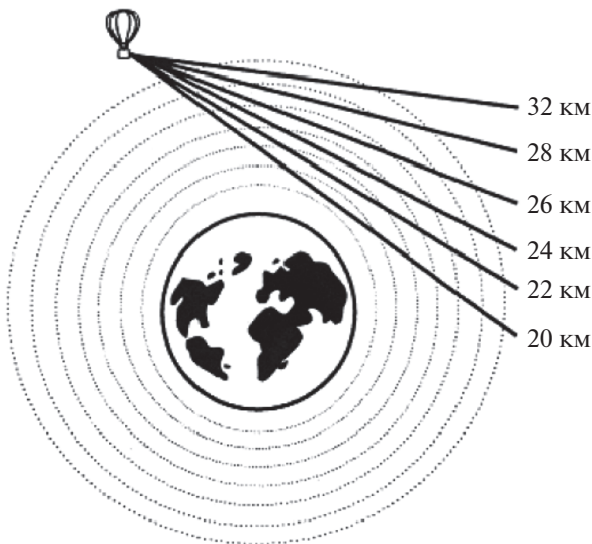


Рис. 4. Иллюстрация принципа наклонного сканирования атмосферы [5].

им. В.А. Котельникова РАН. Прибор представляет собой трехканальный гетеродинный спектрометр [3], размещенный на борту высотного аэростата и работающий в режиме наклонного сканирования атмосферы. Данный инструмент — компактный и легкий спектрометр, который предназначен для исследования состава атмосферы методом измерения спектров поглощения молекул как в субтерагерцевой, так и в терагерцевой области частот (рис. 3). Он установлен в гондole высотного аэростата вместе с фурье-спектрометром MIPAS-B [4] (создан в Институте метеорологии и исследования климата Университета Карлсруэ (IMK, Германия)) и работает в инфракрасном диапазоне ($680...2400\text{ см}^{-1}$). Направление обзора у спектрометров совпадает, следова-

тельно, они могут анализировать состав одного объема воздуха и позволяют производить измерения линий поглощения одних и тех же молекул одновременно в разных спектральных диапазонах, что увеличивает возможности по проверке полученных данных.

Суть применяемого метода исследований заключается в детектировании линий излучения молекул исследуемых газов в атмосфере. На рис. 4 проиллюстрирован принцип наклонного сканирования — телескоп инструмента, установленного на аэростате, обладает очень узким углом обзора. При изменении угла наклона меняется высота, на которой принимаемый луч касается атмосферы Земли. Основной вклад в линию излучения вносит слой атмосферы, который луч прошел по касательной. Таким образом, изменяя угол наклона телескопа, строится развертка спектра излучения в зависимости от высоты. Минимальная высота сканирования (около 10 км) ограничивается высотой, уширение линий газов на которой приводит к их значительному перекрытию и не позволяет производить спектроскопические исследования.

Измерения спектров проводятся одновременно на частотах 490...650 ГГц с помощью СИП и на 1.8 ТГц с использованием супергетеродинного приемника со смесителем на горячих электронах (НЕВ, разработка DLR). Основное зеркало телескопа может поворачиваться вокруг горизонтальной оси, обеспечивая наклонное сканирование в диапазоне высот от верхней стратосферы (30...40 км) до верхней тропосферы (10 км). Неохлаждаемый квазиоптический тракт мультиплексирует принятый сигнал, распределяя его на несколько измерительных каналов, работающих одновременно. Для радиометрической калибровки с помощью подвижного зеркала на вход инструмента может подаваться излучение калибровочного абсолютно черного тела или излучение холодного неба. В качестве оконечного спектрометра используется цифровой автокоррелятор с разрешением 2 МГц и шириной полосы 4 ГГц. Для централизованного управления инструментом и системой связи используется встроенный компьютер типа PC-104. Все данные, получаемые во время полета, передаются по радиоканалу в наземную часть системы управления, а также сохраняются на бортовом носителе информации. На рис. 5 представлена схема инструмента TELIS.

Для надежной работы СИП были созданы специальные алгоритмы управления, позволившие производить переключение частоты приема во всем рабочем диапазоне в течение одной минуты. Инструмент TELIS продемонстрировал возможность стабильной работы в сложных условиях — во время запусков температура окружающей среды изменялась в диапазоне $-90...+30^{\circ}\text{C}$.

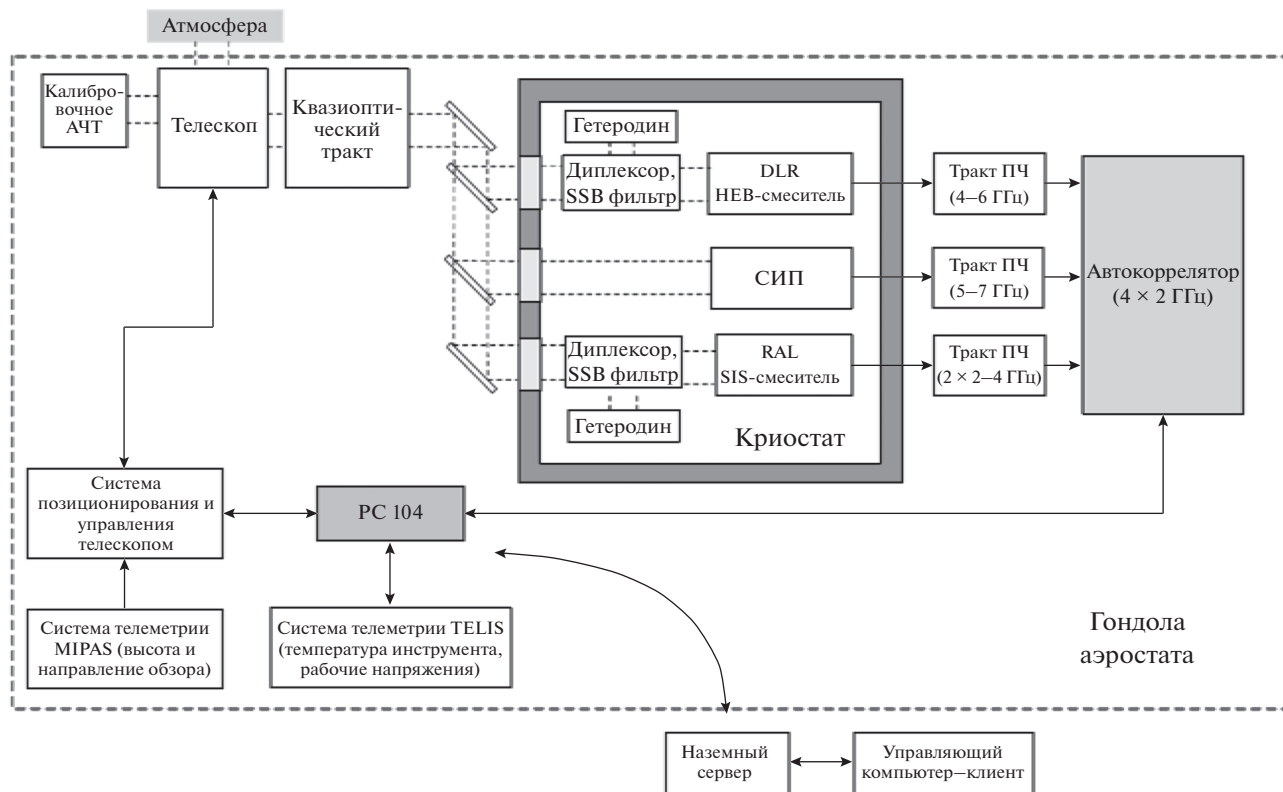


Рис. 5. Блок-схема инструмента TELIS [6].

Было совершено четыре успешных запуска аэростатов с инструментом TELIS на борту – во время полетных кампаний в Кируне, Швеция (2009, 2010, 2011 г.г.) и в Тимминсе, Канада (2014 г.). За время полетов, самый короткий из которых продолжался 10 часов, было получено большое количество исходного материала для проведения спектроскопических исследований.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ ВО ВРЕМЯ ПОЛЕТНЫХ КАМПАНИЙ ИНСТРУМЕНТА TELIS

Основной задачей полетных кампаний было исследование процессов каталитического разрушения озона галогенными соединениями в приполярных областях, аналогичных процессам, приведшим к возникновению озоновой дыры над Антарктикой. На рис. 6 и 7 представлены спектральные линии участвующих в таких процессах молекул – непосредственно озона, а также хлорпроизводных, таких как HCl и ClO.

Единичный измеренный спектр содержит информацию о составе атмосферы в слое, располагающемся на такой высоте, что принимаемое прибором излучение проходит через этот слой по касательной. Объединяя несколько спектров, из-

меренных для разных наблюдаемых высот (т.е. при разных углах наклона телескопа инструмента), можно реконструировать вертикальный профиль поглощения (рис. 8).

Время интегрирования при измерении единичного спектра составило около 1.5 с, вертикальный скан содержит обычно 10...20 разных высот наблюдения, покрывая диапазон высот от 10 до 35 км примерно за 1 мин (включая все необходимые калибровочные измерения). На рис. 6 и 7 изображены спектры только для нескольких наблюдаемых высот. Спектры получены путем усреднения 10 и 23-х последовательных измерений соответственно. Таким образом, суммарное время измерения для каждой наблюдаемой высоты составило около 16 с (для спектров, изображенных на рис. 6) и 35 с (рис. 7). Для достижения такого же соотношения сигнал/шум, инструментам, использующим полупроводниковые приемники, обладающие шумовой температурой не ниже 1800 К [7] в том же диапазоне частот, время измерения должно быть увеличено не менее чем на два порядка.

Радикал оксида хлора ClO – основное действующее хлорсодержащее вещество в реакциях каталитического разрушения озона. В свою очередь, HCl, являющийся так называемым накопителем

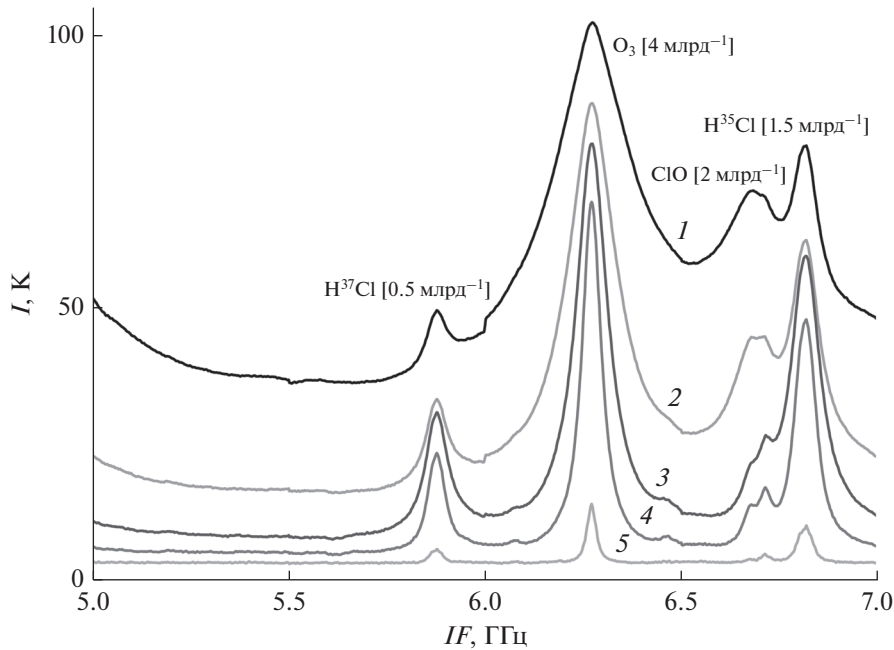


Рис. 6. Зависимости интенсивности I от промежуточной частоты IF для двух изотопов HCl , озона и ClO , измеренные для наблюдаемых высот: 22 (1), 25 (2), 28 (3), 31 км (4) и под углом 6° над горизонтом (5). Частота гетеродина: 619.1 ГГц (2010 г., Кируна). Отмечены примерные концентрации соответствующих газов [8].

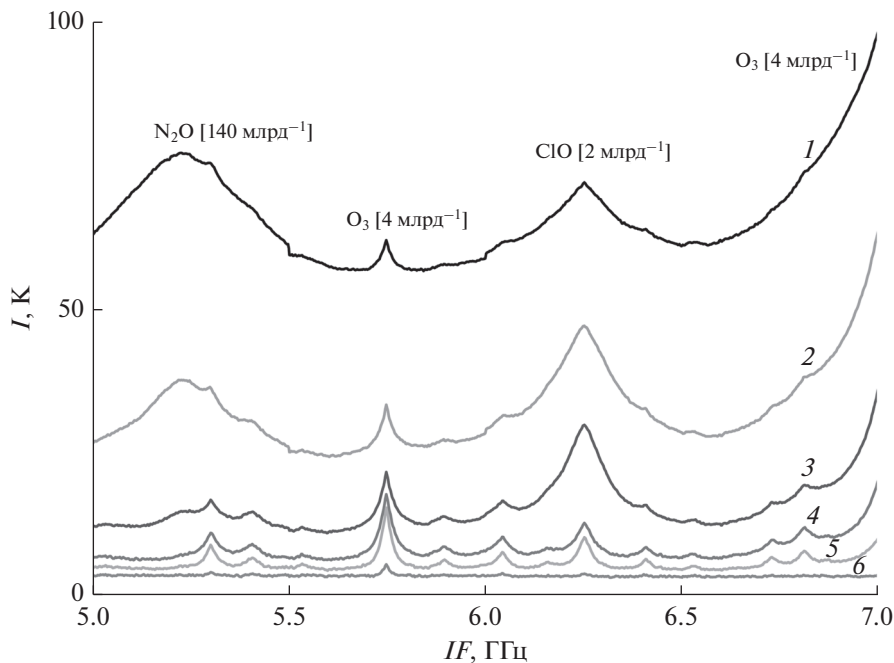


Рис. 7. Зависимости интенсивности I от промежуточной частоты IF озона и ClO , измеренные для наблюдаемых высот: 19 (1), 22 (2), 25 (3), 28 (4), 31 км (5) и под углом 6° над горизонтом (6). Частота гетеродина: 507.52 ГГц (2010 г., Кируна). Отмечены примерные концентрации соответствующих газов [8].

хлора, фактически инертен и не принимает участия в химических процессах с участием озона. Скорость протекания реакции разрушения озона зависит от концентрации ClO , которая, в свою

очередь, сильно меняется с высотой. Концентрации HCl и ClO связаны друг с другом обратной зависимостью — общее количество хлора в атмосфере делится между этими двумя соединениями

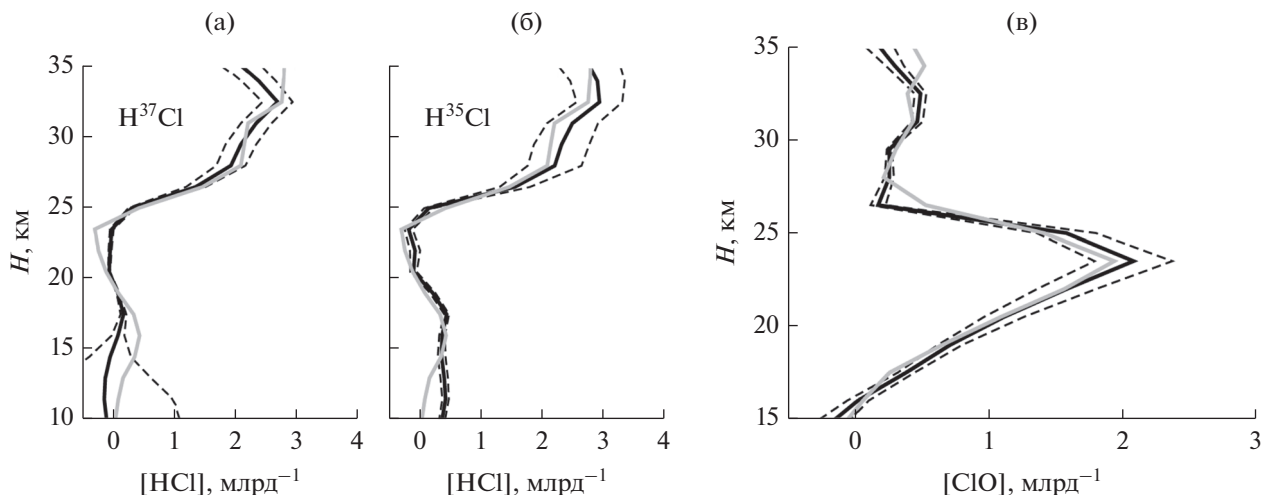


Рис. 8. Вертикальное распределение концентрации HCl с двумя изотопами (а, б) и ClO (в), измеренное во время полета инструмента TELIS 24 января 2010 г. в Арктике. H – высота наблюдаемого слоя атмосферы. Минимум на высоте 23 км соответствует перераспределению хлора между HCl (обоими изотопами) и ClO. Темные линии – результаты, измеренные инструментом TELIS, светлые – спектрометром, установленным на спутнике MLS (Microwave Limb Sounder). Штриховые линии отображают точность измерений инструмента [9].

(см. рис. 8), и активный хлор переходит из одного соединения в другое в процессе активации ClO, происходящем в результате взаимодействия с фотонами, что можно наблюдать при восходе солнца (рис. 9). Особую ценность представляют данные, представленные на рис. 8. Во время запуска инструмента TELIS 24 января 2010 г. в той же приполярной области атмосферы производились наблюдения с помощью другого терагерцевого инструмента – MLS (Microwave Limb Sounder), что позволило провести дополнительную проверку получаемых обоими инструментами данных.

Широкий диапазон перестройки СГГ дает возможность почти одновременно измерять спектры большого количества молекул, линии поглощения которых расположены в диапазоне 450...650 ГГц. Для полетных измерений были заранее оптимизированы восемь частот СГГ, на которых проводились измерения – от 495.04 ГГц (для исследования $H_2^{18}O$) до 619.10 ГГц (для HCl, ClO и HOCl), переключение между которыми занимало не более 1 мин. Такая легкость перестройки совместно с малым временем усреднения дала возможность получать вертикальные профили концентрации большого количества молекул фактически для одной и той же области атмосферы.

Основной научной задачей последнего полета инструмента TELIS, прошедшего осенью 2014 г. в канадском городе Тимминс, было исследование концентрации другого галогенсодержащего вещества – каталитического деструктора озона, BrO. Особенностью измерения концентрации данного вещества является чрезвычайно малая интенсивность линии его поглощения (менее 0.3 К),

что потребовало проведения продолжительных (более одного часа) измерений. Несмотря на это, для получения корректных данных оказалось необходимым увеличить точность калибровки инструмента, что потребовало проведения дополнительных лабораторных исследований (например, измерения соотношения полос приема). Такие исследования были проведены, и в данный момент идет обработка полученных во время полета данных.

Результаты исследований, проведенных с помощью инструмента TELIS, продемонстрировали

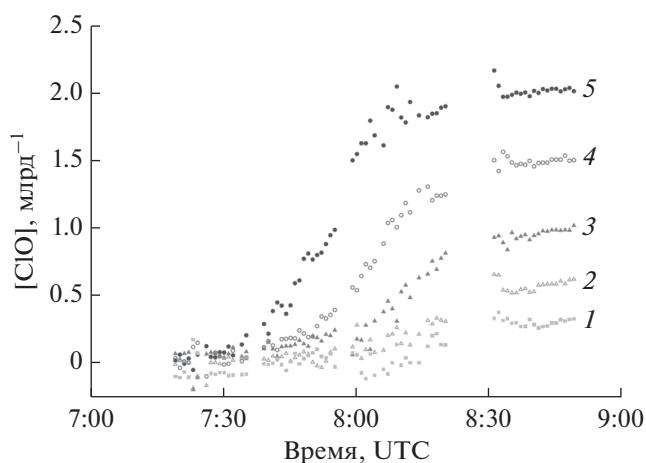


Рис. 9. Зависимость концентрации ClO от времени для пяти разных наблюдаемых высот: 17.5 (1), 19 (2), 20.5 (3), 22 (4), 23.5 км (5). Промежутки между группами данных обусловлены дополнительными калибровочными измерениями. Временное разрешение – 1 мин [9].

высочайшую чувствительность СИП и возможность измерения с его помощью следовых концентраций газов (лучше 1 млрд^{-1}); они были представлены в нескольких статьях по химии атмосферы [9–12]. В настоящий момент проводятся исследования по применению наработок в области терагерцевой газовой спектроскопии в лабораторных условиях. На базе сверхпроводникового интегрального приемника был создан лабораторный спектрометр для исследования состава газов. Тем не менее разница в пути поглощения в случае атмосферных наблюдений (сотни километров) и в лабораторной газовой ячейке (десятки сантиметров) потребовала усложнения установки для получения сходных характеристик чувствительности к малым концентрациям газов. В данный момент ведутся работы в двух направлениях: 1) увеличить длину поглощения путем применения многопроходовой газовой ячейки, 2) увеличить контраст сигнала, исследуя линии поглощения на фоне не широкополосного шумового сигнала, а на фоне линии излучения узкополосного перестраиваемого терагерцевого генератора.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (соглашение № 14.607.21.0100; идентификатор RFMEFI60714X0100).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Koshelets V.P., Shitov S.V., Filippenko L.V. et al.* // Appl. Phys. Lett. 1996. V. 68. № 9. P. 1273.
2. *Koshelets V.P., Shitov S. V.* // Supercond. Sci. Technol. 2000. V. 13. № 5. P. R53.
3. *Birk M., Wagner G., de Lange G. et al.* // Proc. 21st Int. Symp. Space THz Technol. Oxford. 23–25 Mar. 2010. Oxford: Univ. 2010. P. 195.
4. *Friedl-Vallon F., Maucher G., Seefeldner M. et al.* // Appl. Opt. 2004. V. 43. № 16. P. 3335.
5. *Suttiwong N.* Development and Characterization of the Balloon Borne Instrument TELIS (TErahertz and sub-millimeter LImb Sounder): 1.8 THz receiver. PhD thesis. Bremen: Universität, 2010. 164 p.
6. *Киселев О.С.* Исследование основных характеристик и разработка алгоритмов управления сверхпроводниковым интегральным приемником. Дис. ... канд. физ.-мат. наук. М.: ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, 2011. 124 с.
7. *Sobis P., Drakinskiy V., Wadefalk N. et al.* // Proc. ESA ESTEC Micro- and Millimetre Wave Technol. Techn. Workshop. Noordwijk. 25–27 Nov. 2014, Noordwijk: Europ. Space Research and Technol. Center (ESTEC), 2014. P. 1.
8. *Koshelets V.P., Dmitriev P.N., Faley M.I. et al.* // IEEE Trans. 2015. V. TST-5. № 4. P. 687.
9. *De Lange A., Birk M., de Lange G. et al.* // Atmospheric Measurements Techniques. 2012. V. 5. № 2. P. 487.
10. *Xu J., Schreier F., Vogt P. et al.* // Geoscientific Instrumentation, Method and Data System. Discuss. 2013. V. 3. P. 251.
11. *Kasai Y., Sagawa H., Kreyling D. et al.* // Atmospheric Measurements Techniques. 2013. V. 6. № 9. P. 2311.
12. *Sagawa H., Sato T.O., Baron P. et al.* // Atmospheric Measurements Techniques. 2013. V. 6. № 12. P. 3325.

Сдано в набор 13.07.2016 г.	Подписано к печати 15.09.2016 г.	Дата выхода в свет 23.11.2016 г.	Формат $60 \times 88^{1/8}$
Цифровая печать	Усл. печ. л. 12.75	Усл. кр.-отт. 2.5 тыс.	Уч.-изд. л. 12.75
	Тираж 189 экз.	Зак. 794	Бум. л. 6.375
		Цена свободная	

Учредители: Российская академия наук, Институт радиотехники и электроники РАН

Издатель: Российская академия наук. Издательство “Наука”, 117997 Москва, Профсоюзная ул., 90
 Оригинал-макет подготовлен МАИК “Наука/Интерпериодика”
 Отпечатано в ППП “Типография “Наука”, 121099 Москва, Шубинский пер., 6