

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИССЛЕДОВАНИЯ
ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ И ОСНОВНЫХ ГАЗОВЫХ КОМПОНЕНТ
ВОЗДУХА НА ПОГРЕШНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ
УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА В АТМОСФЕРЕ КОРРЕЛЯЦИОННЫМ
ИК-РАДИОМЕТРОМ

© 2011 г. С. Ф. Баландин, С. А. Шишигин*

Учреждение Российской академии наук Институт оптики атмосферы
им. В.Е. Зуева Сибирского отделения РАН, Томск

*E-mail: bal@iao.ru

Поступила в редакцию 21.02.2011 г.

Выбран спектральный диапазон 920–960 см⁻¹ для спутникового измерения CO₂ в атмосфере корреляционным методом. Оценена оптимальная функция пропускания измеряемого газа в корреляционной канале радиометра. Показано, что влияние атмосферных газов (H₂O, CO, O₃, N₂O, CH₄) и ошибки задания температуры поверхности Земли и ее вертикального распределения в атмосфере на погрешность измерения содержания CO₂ во всей толще атмосферы могут достигать нескольких процентов.

Ключевые слова: корреляционный радиометр, углекислый газ, атмосфера, спутник, излучение

ВВЕДЕНИЕ

Диоксид углерода CO₂ до высоты 80 км хорошо перемешан. Концентрация CO₂ в воздухе превышает 370 ppm (Седунов и др., 1991). Сезонные вариации приземных значений концентрации CO₂ составляют не более 5%, а межгодовая изменчивость менее 1%. Современные базы данных спектроскопических параметров линий поглощения атмосферных газов и разработанные процедуры расчета прозрачности атмосферы позволяют получить из спектроскопических измерений солнечного излучения, прошедшего атмосферу, информацию о пространственных и временных вариациях CO₂ в атмосфере с погрешностью 5–10% (Акименко и др., 1988). Этого достаточно при решении многих задач атмосферной оптики, но ошибки измерений не позволяют отслеживать причины и скорость изменения глобального содержания CO₂ в атмосфере.

К настоящему времени теоретически и экспериментально проработаны возможности дистанционного определения концентрации CO₂ в тропосфере и нижней стратосфере по данным измерений уходящего инфракрасного (ИК) излучения с помощью спутниковых ИК-зондировщиков высокого спектрального разрешения типа AIRS (дифракционный ИК-спектрометр), IASI (Фурье-спектрометр). Мониторинг измерений концентраций CO₂ в атмосфере данными зондировщиками затруднен тем, что измерения чувствительны к

вариациям вертикального профиля температуры, наличию облачности в поле зрения прибора, вариациям температуры и излучательной способности земной поверхности. (Успенский и др., 2006; Успенский и др., 2011).

Использование корреляционной методики регистрации излучения позволяет уменьшить влияние неизмеряемых компонент атмосферы (концентрации других газов, аэрозоля и их радиационные изменения от температуры, давления) на регистрируемый сигнал. В данном методе из регистрируемой ИК-радиации в выбранном спектральном участке выделяется только часть (10⁻³–10⁻⁶) излучения, коррелирующего с функцией пропускания эталонной кюветы с исследуемым газом.

Оперативная обработка выходного сигнала корреляционного радиометра осуществляется на основе калибровочных кривых, полученных экспериментально, а также они могут быть рассчитаны на основе современных моделей, программных пакетов, кодов вычислений спектроскопических задач атмосферной оптики.

Измерения содержания CO₂ в атмосфере с необходимой точностью проводятся только наземными станциями (Акименко и др., 1988; Кашин и др., 2007; Тимофеев, Шульгина, 2009). В данной работе проведен анализ влияния параметров атмосферы на измерения содержания CO₂ во всей толще атмосферы со спутника корреляционным радиометром.

МЕТОДЫ КОРРЕЛЯЦИОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ ДЛЯ СПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ CO₂ В АТМОСФЕРЕ

В работе (Tolton, 2004) рассмотрена возможность измерения содержания CO₂ во всей толще атмосферы корреляционным радиометром (GFCRs) в спектральных областях 6300 см⁻¹ (1.6 мкм) и 5000 см⁻¹ (2 мкм) со спутника по рассеянному солнечному излучению поверхностью Земли. Проведен теоретический анализ влияния на погрешность измерения содержания CO₂ в атмосфере положения анализируемых участков излучения в спектральных областях 6000–6600 и 4600–5200 см⁻¹, изменения температуры, давления, влажности воздуха.

С целью учета высоты рассеивающей солнечный свет поверхности Земли и изменения давления воздуха рассмотрена возможность одновременного измерения корреляционным радиометром содержания газа с известной стабильной концентрацией (O₂) в спектральной области 13 100 см⁻¹ (760 нм).

Результаты оценок влияния изменения температуры на 10° и влажности воздуха на 10%, изменения на 10 м высоты поверхности рассеяния солнечного излучения на ошибку определения средней концентрации CO₂ в атмосферном столбе воздуха не превышают ~1.1 ppm (Tolton, 2004). Предположение об идеальном рассеивающей (Ламбертовой) земной поверхности; неучет дифракционных и поляризационных эффектов распространения, отражения и рассеивания солнечного излучения; погрешности регистрации мощности излучения современными приемниками; необходимость контроля точного положения Солнца — все это снижает достоверность результатов данных оценок точности измерения содержания CO₂ в атмосфере рассматриваемым методом.

Основным преимуществом методов корреляционной спектроскопии атмосферных газов является отсутствие влияния неселективного взаимодействия излучения со средой на погрешность измерений содержания исследуемого газа при высоком спектральном разрешении частотного спектра, поглощаемого или испускаемого искомым газом с помощью высокоэффективного и селективного спектрального светофильтра, которым служит проба самого искомого газа. Аэрозольное ослабление излучения в узких спектральных участках полос поглощения атмосферных газов практически не зависит от длины волны. Следовательно, регистрация содержания CO₂ в столбе атмосферы корреляционными радиометрами со спутника по отраженному солнечному излучению поверхностью Земли во многом подобна регистрации с помощью спектрометров высокого разрешения типа “Русалка”, “Оракул”.

По предварительным оценкам разработчиков данной аппаратуры, точность интегральных измерений содержания CO₂ в столбе атмосферы составляет нескольких процентов при “благоприятных” по аэрозолю условиям измерений (Кораблев и др., 2005).

Метод регистрации отраженного и рассеянного солнечного излучения применим только на освещенной Солнцем части планеты, в то время как регистрация теплового уходящего излучения в дальней (6–15 мкм) ИК-области корреляционным радиометром позволяет изучать круглосуточные вариации характеристик состава атмосферы.

ВЫБОР СПЕКТРАЛЬНОГО ДИАПАЗОНА ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ РАДИОМЕТРОМ

Рассмотрим возможности измерения содержания CO₂ в атмосфере спутниковым корреляционным радиометром, анализирующим уходящее ИК-тепловое излучение Земли. Рабочий участок спектра выбирается, с одной стороны, достаточно широким, чтобы содержать большое количество линий поглощения исследуемого газа, а с другой, — настолько узким, чтобы минимизировать наличие линии поглощения других газов и их перекрытие с линиями поглощения исследуемого газа. За счет суммирования сигналов от многих линий поглощения газа достигается высокая чувствительность метода. Высокое быстродействие прибора, возможность использования слабых естественных источников излучения, малая чувствительность к вариациям его яркости, минимальный поток выходных данных — эти свойства пассивного корреляционного радиометра необходимы в аэрокосмической аппаратуре, когда требуется оперативное картографирование распределения конкретного газа в атмосфере.

В ИК-области (~10 мкм) тепловое излучение Земли близко по своим характеристикам к излучению абсолютно черного тела (коэффициент серости земной поверхности слабо зависит от типа подстилающей поверхности Земли). Ослабление данного излучения атмосферными дымками минимально по сравнению с ослаблением в остальных рассматриваемых спектральных полосах. В области 10 мкм тепловое излучение поверхности Земли более чем на два порядка величины больше, чем в ближнем ИК-диапазоне и значительно превышает отраженное и рассеянное солнечное излучение (Баландин и др., 2008).

Проведем предварительный анализ спектра ослабления CO₂ в диапазоне 800–1250 см⁻¹ с целью выбора наиболее информативного участка спектра для измерений содержания CO₂ со спутника. Расчеты спектров ослабления ИК-излуче-

ния атмосферными газами основаны на использовании информационной системы “СПЕКТРА” Института оптики атмосферы (ИОА СО РАН). На рис. 1 представлены спектры пропускания атмосферных газов в длинноволновой ИК-области спектра при давлении 1 атм, температуре 296 К и длине трассы $L_{\text{тр}}$ в соответствии с содержанием данного газа в столбе атмосферы.

Наиболее информативным участком спектра для измерений содержания CO_2 во всей толще атмосферы со спутника является область 920–960 см^{-1} . В данном интервале частот ИК-излучения наблюдается минимальное наличие линии поглощения молекул воды, и практически отсутствуют спектральные линии озона и других атмосферных газов.

ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ АТМОСФЕРЫ НА ПОКАЗАНИЯ РАДИОМЕТРА

Интенсивность восходящего излучения зависит от ряда атмосферных параметров – вертикаль-

ного распределения температуры воздуха, концентрации поглощающих газов, температуры подстилающей поверхности и др. Рассмотрим влияние перечисленных выше параметров на показания корреляционного радиометра.

Для оценки чувствительности данного метода корреляционной спектроскопии к неизмеряемым газам, изменениям температуры воздуха и поверхности Земли при измерении содержания CO_2 в атмосфере использовалась модель стандартной атмосферы.

На рис. 2 приведены функции пропускания атмосферы в различных интервалах высот в спектральном диапазоне 920–960 см^{-1} . Основной вклад в ослабление излучения вносят нижние слои атмосферы до высоты 10 км, обусловленный большим содержанием паров воды и углекислого газа.

Отношение разности мощности регистрируемых сигналов S_1, S_2 в каждом из каналов корреляционного спектрометра к их сумме Φ (аппаратурная функция) для неоднородной атмосферы имеет вид (Баландин и др., 2008)

$$\Phi = \frac{\left[\int_{\Delta\nu} T_{a_1} T_c d\nu - \frac{1}{\Delta\nu} \int_{\Delta\nu} T_{a_1} d\nu \int_{\Delta\nu} T_c d\nu \right] + \frac{\sum_{i=1}^{n-1} (B_{a_i} - B_{a_{i+1}})}{(\varepsilon B_e - B_{a_1})} \left[\int_{\Delta\nu} T_{a_{i+1}} T_c d\nu - \frac{1}{\Delta\nu} \int_{\Delta\nu} T_{a_{i+1}} d\nu \int_{\Delta\nu} T_c d\nu \right] + J_c}{\left[\int_{\Delta\nu} T_{a_1} T_c d\nu + \frac{1}{\Delta\nu} \int_{\Delta\nu} T_{a_1} d\nu \int_{\Delta\nu} T_c d\nu \right] + \frac{\sum_{i=1}^{n-1} (B_{a_i} - B_{a_{i+1}})}{(\varepsilon B_e - B_{a_1})} \left[\int_{\Delta\nu} T_{a_{i+1}} T_c d\nu + \frac{1}{\Delta\nu} \int_{\Delta\nu} T_{a_{i+1}} d\nu \int_{\Delta\nu} T_c d\nu \right] + \frac{2B_{a_n} \int_{\Delta\nu} T_c d\nu}{(\varepsilon B_e - B_{a_1})}}, \quad (1)$$

где ε – относительная излучательная способность (степень черноты) поверхности земли; $B(\nu, \theta)$ – светимость абсолютно черного тела с температурой θ на частоте ν ; индекс e относится к земле, индекс a – к атмосфере; n – число рассматриваемых последовательных однородных горизонтальных слоев атмосферы; T_{a_i} – функция пропускания излучения расположенными выше слоями атмосферы, начиная с i ; $T_c(\nu)$ – функция пропускания газа в корреляционной кювете; J_c – слагаемое, обусловленное излучением, испускаемым в корреляционном канале радиометра. Солнечной радиацией пренебрегаем.

При использовании ИК-фотоприемника с порогом чувствительности 10^{-9} Вт/см Гц^{1/2} минимальное угловое поле зрения должно составлять не менее 8°. Это обусловлено энергетическими требованиями к уровню полезного сигнала, необходимого для надежной регистрации изменения

информационного сигнала на величину не более 10^{-5} , соответствующего изменению содержания углекислого газа во всей толще атмосферы на ~1%. Пространственное разрешение на местности при регистрации с высоты 200 и 500 км составит соответственно ~28 и 70 км. Повышение пороговой чувствительности ИК-фотоприемника на два порядка (Ерофейчев, 1996) позволит довести пространственное разрешение до 2.8 и 7 км.

Максимальный уровень аппаратурной функции Φ (1) для многослойной модели атмосферы наблюдается при функции пропускания газа в корреляционном канале радиометра, соответствующей пропусканию (T) двуокиси углерода при давлении 1 атм и температуре 296 К на трассе длиной $L_{\text{тр}} \sim 250$ м (рис. 3а). Ослабление входного оптического излучения при этом происходит на 80% (рис. 3б), снижая в 5 раз точность регистрации малых изменений светового потока из-за постоянного уровня собственного шумового сигнала фо-

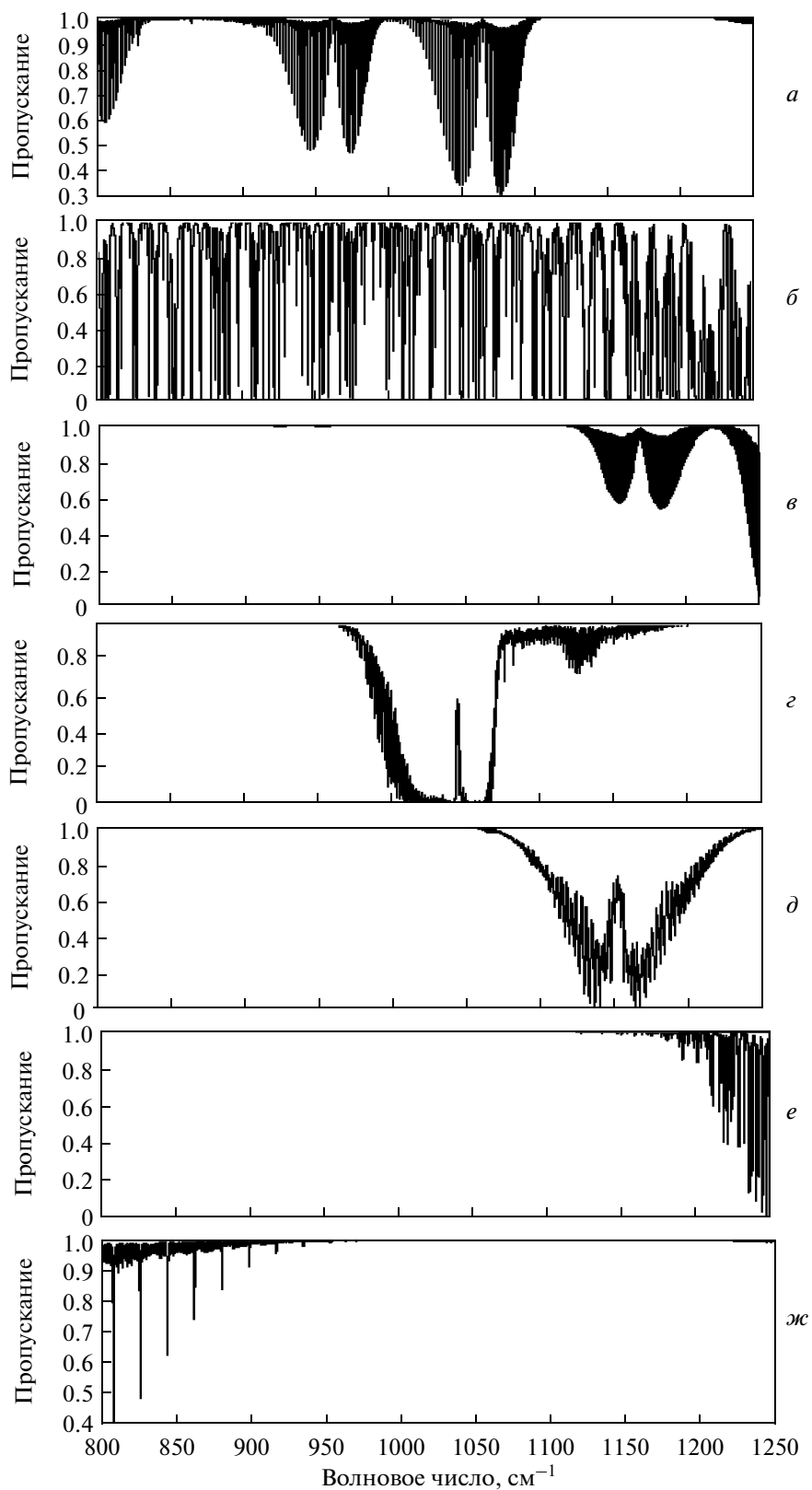


Рис. 1. Спектры пропускания атмосферных газов в длинноволновой ИК-области спектра при $P = 1 \text{ атм}$, $T = 296 \text{ К}$: *a* – CO_2 ($L_{\text{тр}} = 3 \text{ м}$); *б* – H_2O ($L_{\text{тр}} = 100 \text{ м}$); *в* – CH_4 ($L_{\text{тр}} = 0.01 \text{ м}$); *г* – O_3 ($L_{\text{тр}} = 0.01 \text{ м}$); *д* – N_2O ($L_{\text{тр}} = 0.01 \text{ м}$); *е* – SO_2 ($L_{\text{тр}} = 0.01 \text{ м}$); *ж* – NO_2 ($L_{\text{тр}} = 0.01 \text{ м}$).

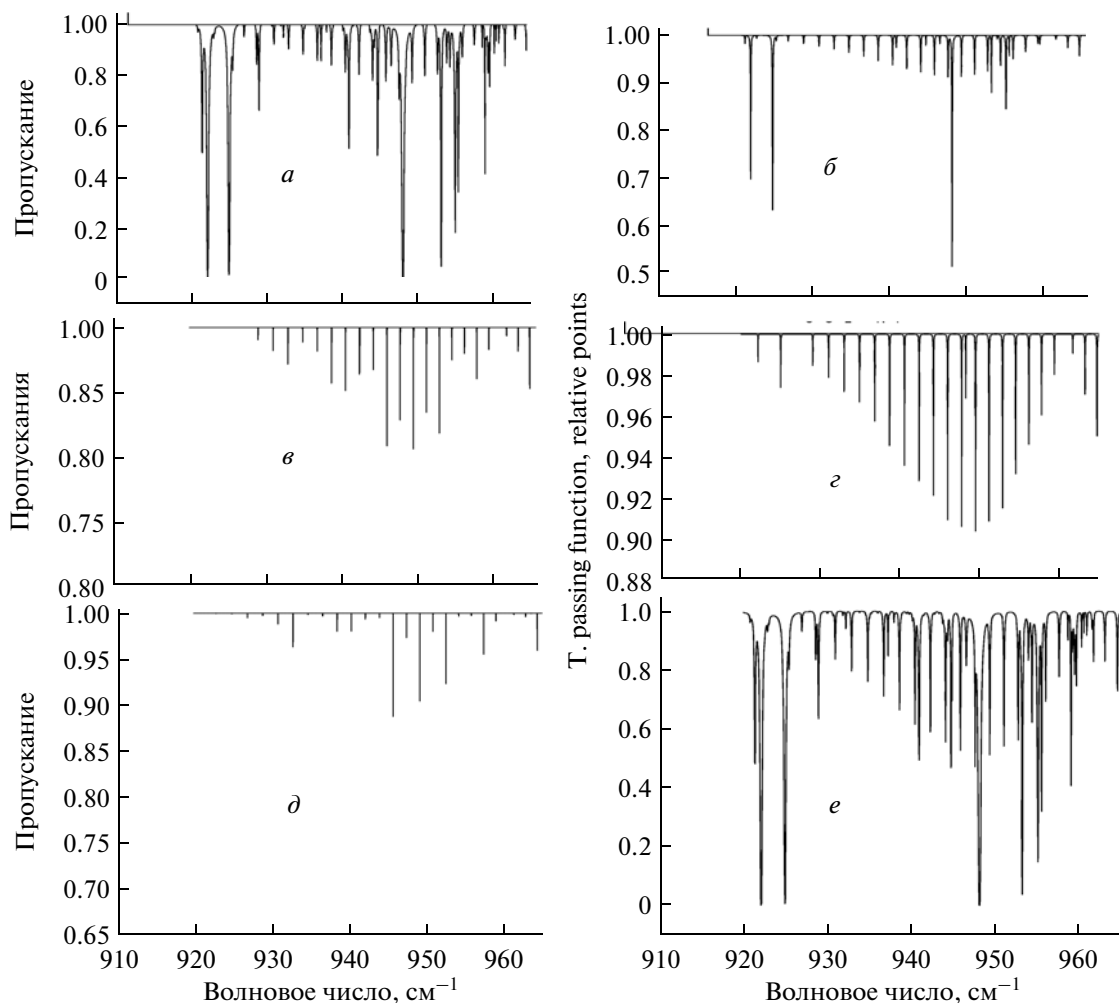


Рис. 2. Пропускание атмосферы в интервале высот: а – 0–5 км; б – 5–10 км; в – 10–20 км; г – 20–30 км; д – 30–40 км; е – 0–40 км.

топриемника. Пропускание трассы длиной 50 м приводит к ослаблению анализируемого оптического излучения на 40%. Снижение (на 10–15%) величины аппаратной функции при использовании функции пропускания фильтра в корреляционном канале радиометра соответствующей пропусканию трассы длиной 50 м повысит в ~3 раза чувствительность прибора.

В реальном приборе для измерения CO_2 в атмосфере со спутника вместо корреляционной кюветы целесообразно использование интерференционно-поляризационного фильтра, имитирующего оптимальную спектральную функцию пропускания CO_2 в выбранном участке спектра (Борисов и др., 1986).

Состояние земной атмосферы характеризуется пространственно-временными изменениями метеорологических величин. Сведения о вертикальном распределении температуры, влажности воздуха и других газовых примесей необходимы при

пассивном зондировании атмосферы космическими средствами. Измерения содержания CO_2 в атмосфере с помощью корреляционного радиометра требуют априорного знания вертикального распределения метеорологических величин атмосферы для определения аппаратных (калибровочных) функций (1) в зависимости от района земного шара, времени суток. Ниже приведены результаты расчетов влияния основных параметров атмосферы на погрешность данных измерений.

Расчеты аппаратной функции (1), выполненные при средней удельной влажности 1.86 г/кг (зима) и 8.06 г/кг (лето) в нижнем (0–5 км) слое атмосферы для вертикальной атмосферной трассы длиной 40 км, показали, что данные изменения влажности воздуха приводят к погрешности измерения CO_2 во всей толще атмосферы не более 0.3%.

Основной вклад в погрешность измерений вносят отклонения в используемой модели темпе-

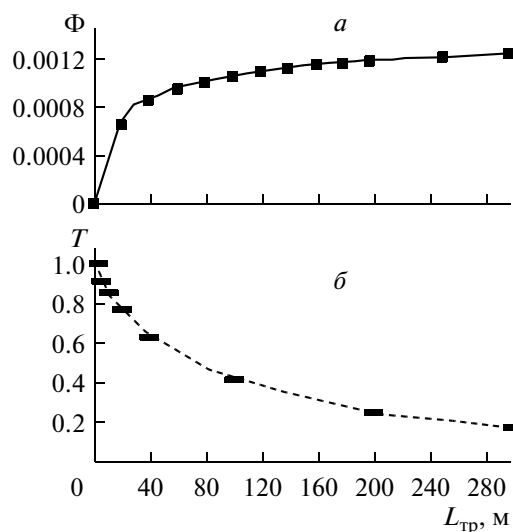


Рис. 3. *a* – Уровень выходного сигнала радиометра (Φ) при регистрации CO_2 во всей толще атмосферы; *b* – функция пропускания (T) двуокиси углерода при давлении 1 атм и температуре 296 К в зависимости от длины трассы $L_{\text{тр}}$.

ратуры поверхности Земли и вертикального распределения температуры воздуха в атмосфере от истинных значений вертикального распределения температуры в исследуемом районе. Изменение средней температуры поверхности Земли в поле зрения прибора от 280 до 305 К приводит к изменению аппаратной функции (1) от 0.001526 до 0.002536. Использовалась функция пропускания корреляционного канала, которая соответствует

пропусканию корреляционной кюветы длиной 50 м с газом CO_2 при давлении 1 атм, температуре 296 К. Следовательно, погрешность определения средней температуры земной поверхности в 0.5 К приводит к увеличению погрешности измерения содержания CO_2 в атмосфере на ~1 %.

В таблице приведена зависимость изменения аппаратной функции $\Delta\Phi$ от отклонения температуры $\Delta\theta$ в одном из выделенных интервалах высот атмосферы на 5 К.

Ошибка определения вертикального профиля температуры воздуха на 1 К (Поляков и др., 2010) в одном из нижних слоев атмосферы приводит к погрешности измерения содержания CO_2 во всей толще атмосферы на 1.6%. В более высоких слоях атмосферы погрешность задания профиля температуры воздуха меньше влияет на аппаратную функцию и убывает с высотой от 1% до 0.03%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования показали, что влияние вариаций параметров атмосферы на погрешность измерений содержания CO_2 во всем столбе атмосферы в спектральном интервале 920–960 cm^{-1} корреляционным спектральным газоанализатором со спутника в любое время суток может достигать нескольких процентов в условиях чистого неба при однородном распределении концентрации исследуемого газа в горизонтальных слоях атмосферы, априорном задании с необходимой точностью вертикального распределения метеорологических параметров атмосферы.

Изменения аппаратной функции в зависимости от вариаций температуры воздуха

Интервалы высот атмосферы, км	Изменение аппаратной функции, $\Delta\Phi$	Относительное изменение аппаратной функции, $\frac{\Delta\Phi}{\Phi}$ %	Относительное изменение аппаратной функции при изменении температуры на 1 К, $\frac{\Delta\Phi}{\Phi\Delta\theta}$ %
0–5	0.00020572	7.9	1.6
5–10	0.00020653	То же	То же
10–20	0.00012809	4.9	1
20–30	0.00001518	0.58	0.12
30–40	0.00000367	0.14	~0.03

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Акименко Р.М., Арефьев В.Н., Брижанская Л.Л., Каменоградский Н.Е., Кашин Ф.В., Сорокина Л.И., Спекторов Л.А. Исследование углекислого газа в атмосфере // Оптика атмосферы. 1988. Т. 1. № 9. С. 49–53.
- Баландин С.Ф., Старновский С.А., Шишигин С.А. Анализ возможного применения метода корреляции газовых светофильтров для измерения содержания метана в атмосфере со спутника // Оптика атмосферы и океана. 2008. Т. 21. № 10. С. 897–901.
- Борисов Ю.А., Гельфонд Ю.В., Конопелько Л.А., Лукинов Ю.И., Хапланов Г.М. Физический эквивалент оптической плотности поглощающей среды для проверки оптического газоанализатора // Тр. ЦАО. Методы и приборы для исследования малых газовых примесей в атмосфере. М.: Гидрометеиздат, 1986. Вып. 161. С. 72–80.
- Ерофейчев В.Г. Инфракрасные фокальные матрицы // Оптический журнал. 1996. № 6. С. 4–17.
- Кашин Ф.В., Арефьев В.Н., Каменоградский Н.Е., Семенов В.К., Синяков В.П. Содержание углекислого газа в толще атмосферы центральной части Евразии (станция мониторинга “Иссык-Куль” // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2007. Т. 43. № 4. С. 521–530.
- Кораблев О.И., Виноградов И.И., Гнедых В.И., Поверев М.В., Родин А.В., Федорова А.А. Микроспектрометр парниковых газов // Вопросы миниатюризации в современном космическом приборостроении. Сб. ст. выездного семинара, Таруса. М.: ИКИ, 2005. С. 235–248.
- Поляков А.В., Тимофеев Ю.М., Успенский А.Б. Температурно-влажностное зондирование атмосферы по данным спутниковых ИК-зондировщиков высокого спектрального разрешения (ИКФС-2) // Исслед. Земли из космоса. 2010. № 4. С. 85–90.
- Седунов Ю.С., Авдюшин С.И., Борисенков Е.П., Волковицкий О.А., Петров Н.Н., Рейтенбах Р.Г., Смирнов В.И., Черников А.А. Атмосфера. Справочник. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 509 с.
- Тимофеев Ю.М., Шульгина Е.М. Российские исследования в области атмосферной радиации в 2003–2006 гг. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2009. Т. 45. № 2. С. 193–208.
- Успенский А.Б., Кухарский А.В., Романов С.В., Рублев А.Н. Мониторинг концентраций диоксида углерода и общего содержания метана в тропосфере над Сибирью по данным спутниковых ИК-зондировщиков AIRS, IASI // Исслед. Земли из космоса. 2011. № 1. С. 14–21.
- Успенский А.Б., Кухарский А.В., Рублев А.Н. Детектирование тропосферных вариаций CO₂ по данным спутникового ИК-зондировщика высокого спектрального разрешения // Исслед. Земли из космоса. 2006. № 4. С. 42–51.
- Tolton Boyd T. A concept for a gas-filter correlation radiometer to remotely sense the atmospheric carbon dioxide column from space // *Atm. Ocean. Tech.* 2004. V. 21. P. 837–852.

Influence of Parameters of Atmosphere to Measuring of the Content of Carbon Dioxide in Air by a Correlation IR-Radiometer from Satellite

S. F. Balandin, S. A. Shishigin

V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk

Is selected of a spectral range 920–960 cm⁻¹ for measuring carbon dioxide in an atmosphere from the satellite by a correlation method, the optimal function of transmission investigate gas in the correlation channel of a radiometer is estimated. Influence of atmospheric gases (H₂O, CO, O₃, N₂O, CH₄) and Earth surface temperature error as well as its vertical distribution on the error of CO₂ content measurement in the atmosphere can reach several percents.

Keywords: correlation radiometer, carbon dioxide, atmosphere, satellite, radiation