

Эффект температурно-независимого поглощения и его использование для зондирования парниковых газов в атмосфере

Н.В. Рокотян, К.Г. Грибанов, В.И. Захаров*

Уральский государственный университет им. А.М. Горького
620083, г. Екатеринбург, пр. Ленина, 51

Поступила в редакцию 14.02.2011 г.

Предложен метод устранения температурной неопределенности при решении обратных задач по определению количества искомым газам в атмосфере из ее ИК-спектров пропускания высокого разрешения. Для зондирования предлагается использовать линии колебательно-вращательных спектров атмосферных молекул, обладающие эффектом температурно-независимого поглощения, т.е. линии, коэффициент поглощения которых практически не зависит от вариаций температуры в заданном температурном интервале. Представлены критерии и алгоритм поиска таких линий, а также произведена выборка температурно-независимых и изолированных линий из базы данных HITRAN-2004 для молекул CH_4 и CO_2 в спектральном диапазоне $4000\text{--}9000\text{ см}^{-1}$ для температурного интервала $220\text{--}310\text{ К}$. Выбранные линии апробированы на примере определения количества CH_4 и CO_2 в атмосфере из ее ИК-спектров пропускания высокого разрешения, зарегистрированных на Уральской атмосферной Фурье-станции в Коуровке.

Ключевые слова: температурно-независимое поглощение, дистанционное зондирование, Фурье-спектрометрия, парниковые газы; *temperature-independent absorption, remote sensing, FTIR spectrometry, greenhouse gases.*

Введение

В последние 150 лет наблюдается стремительный рост содержания ключевых парниковых газов в атмосфере Земли, таких как CO_2 и CH_4 , что является, вероятно, основной причиной увеличения парникового эффекта и роста приземных температур. Если в середине XIX в. концентрация двуокиси углерода в атмосфере составляла $280\text{--}290$ миллионных долей, то в настоящее время данная величина приближается к 390 миллионным долям [1]. Средний рост концентрации CO_2 за период $2001\text{--}2010$ гг. составил примерно 2 миллионные доли в год. Несмотря на относительно небольшое содержание CO_2 в атмосфере, он играет важную роль в парниковом эффекте [2].

Метан является не менее значимым парниковым газом. Так, вычисленное на одну молекулу воздействие метана на парниковый эффект примерно в 25 раз интенсивнее, чем воздействие молекулы CO_2 . Начиная с 1700 г. содержание атмосферного метана возросло более чем в 2 раза и по последним измерениям достигает $1,8$ миллионной доли [3]. Согласно палеоклиматическим данным в настоящее время количественное содержание CO_2 и CH_4 в атмосфере Земли значительно больше, чем когда-либо за последние 420 тыс. лет ее эволюции [4].

В связи с быстрым ростом содержания парниковых газов в атмосфере важной задачей является их мониторинг с помощью спутникового и наземного зондирования в инфракрасном диапазоне спектра с высоким разрешением [5, 6]. Для решения проблемы глобального мониторинга парниковых газов в атмосфере такой подход является перспективным. Однако восстановление атмосферных параметров из результатов наблюдений ИК-спектров атмосферы представляет собой, в общем случае, некорректную обратную задачу с априорной информацией [7, 8], решение которой может быть неоднозначным и неустойчивым. При решении обратных задач по определению концентрации искомым газам в атмосфере из ее ИК-спектров пропускания, измеряемых спутниковыми спектрометрами типа SCHIAMACY [9], TANSO/GOSAT [10] и ИК-Фурье-спектрометрами наземного базирования Международной сети TCCON (Total Carbon Column Observing Network) [11], имеет место температурная неопределенность, связанная с неточным знанием вертикального профиля температуры атмосферы. При решении этих задач вертикальный профиль температуры, как правило, берется из модельных данных ретроспективного анализа [12].

Для большей части земного шара сеть метеорологических обсерваторий очень редкая, в результате и данные ретроспективного анализа недостаточно точны, например ошибка в $3\text{--}5\text{ К}$ в профиле температуры вполне вероятна для ретроспективного анализа атмосферы над территориями России, Африки, Южной Америки, Арктики, Антарктики и других

* Никита Валерьевич Рокотян (nrokotyian@gmail.com); Константин Геннадьевич Грибанов (kgribanov@remotesensing.ru); Вячеслав Иосифович Захаров (v.zakharov@remotesensing.ru).

регионов. Колебательно-вращательный спектр поглощения (пропускания) достаточно чувствителен к температурным вариациям, поэтому ошибка в температурном профиле в несколько градусов для слабовариабельных газов (наблюдаемые максимальные вариации полного содержания в атмосферном столбе CO_2 составляют 2%, а CH_4 – 8% [13]) может давать сравнимый или даже больший вклад в функцию пропускания, чем вклад от характерных вариаций средней концентрации искомого газа в атмосфере. Это может привести к существенным ошибкам в результатах решения обратной задачи по определению концентрации парниковых газов из измеренных ИК-спектров пропускания атмосферы высокого разрешения. На рис. 1 приведены примеры того, какую ошибку в определении концентрации искомого газа может вызывать изменение профиля температуры на 1%.

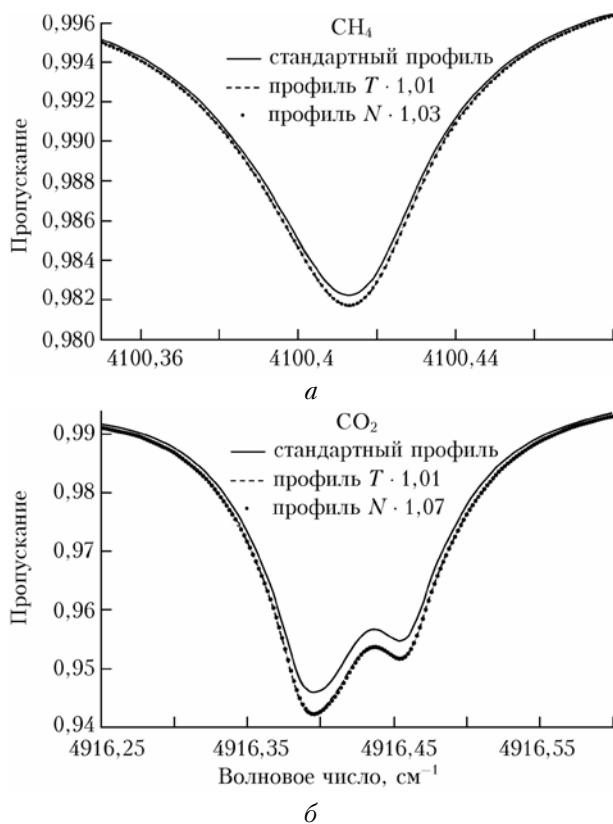


Рис. 1. Изменение в спектре пропускания атмосферы при увеличении температурного профиля на 1% (3 К для приземных значений) соответствует изменению при увеличении концентрации CH_4 в атмосферном столбе на 3% (а), а CO_2 на 7% (б). Исходная модель атмосферы – «лето средних широт»

При расчетах функции пропускания атмосферы изменение профиля температуры на 1% осуществлялось умножением начального профиля на множитель 1,01.

В настоящей статье для устранения такой неопределенности предлагается использовать линии, обладающие эффектом температурно-независимого поглощения, коэффициент поглощения которых слабо зависит от вариаций температуры на заданном тем-

пературном интервале. Здесь представлены критерии и алгоритм поиска таких линий, а также произведена выборка температурно-независимых линий из базы данных HITRAN-2004 [14] для углеродсодержащих атмосферных газов CH_4 и CO_2 в спектральном диапазоне $4000\text{--}9000\text{ см}^{-1}$ для температурного интервала 220–310 К. Такой температурный интервал позволяет охватить практически годовую вариацию температуры тропосферы в вертикальном профиле.

Отбор линий

Коэффициент поглощения в линии пропорционален заселенности поглощающего уровня N_e [15], т.е.

$$N_e \sim \frac{\exp(-E/kT)}{Q(T)}, \quad (1)$$

где E – энергия нижнего уровня; k – постоянная Больцмана; T – температура газа; $Q(T)$ – статсумма по колебательно-вращательным уровням молекулы. Исходя из монотонных температурных зависимостей числителя и знаменателя в (1), можно ожидать, что для линий с определенными значениями энергии нижнего уровня это отношение будет близко к константе в некотором температурном интервале.

В настоящей статье были произведены поиск и отбор таких линий в спектрах поглощения ближнего ИК-диапазона для молекул CH_4 и CO_2 из базы данных HITRAN-2004 [14] для температурного интервала 220–310 К. Для нахождения и отбора линий была разработана программа, рассчитывающая разность между максимальным и минимальным значениями интенсивности спектральных линий для заданного атмосферного газа в заданном температурном интервале. Линии, интенсивность которых отличается более чем на 5% от максимальной интенсивности в заданном температурном интервале, отбрасываются.

Следующим шагом является отбор линий, удовлетворяющих критерию изолированности в ИК-спектре солнечного излучения, прошедшего сквозь атмосферу (не перекрывающихся с другими линиями этого газа, с линиями других атмосферных газов и с солнечными линиями). Отбор изолированных линий произведен по модельным спектрам пропускания атмосферы, сгенерированным с использованием программного обеспечения FIRE-ARMS [16, 17] (Fine InfraRed Explorer of Atmospheric Radiation MeasurementS, <http://remotesensing.ru/soft.html>). При моделировании использовался спектр излучения Солнца в ближней ИК-области, приведенный в [18].

Эксперимент и решение обратной задачи

Для апробации выбранных линий на примере решения обратной задачи по определению концентрации CH_4 и CO_2 в атмосфере из ее ИК-спектров пропускания были отобраны 182 экспериментальных спектра. Эти спектры были измерены в условиях безоблачной атмосферы за период июнь–сентябрь 2010 г. на Уральской атмосферной Фурье-станции

(УАФС). Станция расположена в фоновом лесном районе примерно в 80 км на северо-запад от г. Екатеринбург на территории Коуровской астрономической обсерватории Уральского государственного университета (57,038° с.ш.; 59,545° в.д., высота около 300 м над ур. м.). УАФС оборудована современным Фурье-спектрометром высокого разрешения Bruker IFS125M, обладающим полным рабочим спектральным диапазоном 450–25000 см⁻¹ и максимальным спектральным разрешением 0,0035 см⁻¹. Фурье-спектрометр сопряжен с автоматизированным солнечным трекером A547N, который расположен на крыше рабочего павильона и направляет солнечное излучение через систему зеркал на вход спектрометра. УАФС предназначена для мониторинга следовых газов в атмосфере, накопления временных рядов данных, а также для задач валидации данных спутникового зондирования, таких как GOSAT, OCO-2 и др.

Измерения спектров пропускания атмосферой солнечного излучения проводились в спектральном диапазоне 4000–12000 см⁻¹ с разрешением 0,02 см⁻¹ в ясные безоблачные дни в соответствии с требованиями Международной сети TCCON [11]. Для регистрации метеоданных в процессе измерений был использован автоматизированный ультразвуковой метеорологический комплекс МЕТЕО-2, разработанный в Институте оптики атмосферы СО РАН [19], для прецизионного измерения атмосферного давления и компонент скоростей ветра. При решении обратных задач по определению концентраций искомого газа в атмосфере из ее ИК-спектров пропускания использованы образцы спектров, соответствующие безветренным состояниям атмосферы со слабым аэрозольным замутнением. Для отбора спектров атмосферы со слабым аэрозольным замутнением (аэрозольная оптическая толщина в области 1,02 мкм не более 0,05) были использованы независимые измерения аэрозольной оптической толщи, сделанные с помощью солнечного фотометра CIMEL CE-318. Данный фотометр является локальным сегментом Международной сети Aerosol Robotic Network (AERONET) [20] и размещен рядом с солнечным трекером. Определение средней концентрации искомого газа в атмосферном столбе было осуществлено с помощью стандартного для участников TCCON программного пакета GFIT [11].

Модельный спектр пропускания атмосферы $F_v(\mathbf{x}, \mathbf{b})$ определяется как результат следующей свертки:

$$F_v(\mathbf{x}, \mathbf{b}) = \int_0^{\infty} dv' \exp\{-\tau(v')\} F_{ILS}(v - v'), \quad (2)$$

где \mathbf{x} — вектор атмосферных параметров; \mathbf{b} — исходные профили концентрации атмосферных газов, которые считаются известными; $F_{ILS}(v - v')$ — аппаратная функция спектрометра; $\tau(v)$ — оптическая толщина молекулярной атмосферы:

$$\tau(v) = \int_0^H N(h) \left(\sum_i n_i \sum_j S_{ij}(T(h)) \times \right.$$

$$\left. \times \Phi_{ij}(v_{ij} - v, T(h), p(h)) \right) \sec(\theta(h)) dh. \quad (3)$$

Здесь $T(h)$, $p(h)$ и $N(h)$ — температура, давление и концентрация молекул в атмосфере на высоте h ; n_i — относительная концентрация i -го газа; S_{ij} — интенсивность j -й линии i -го газа; v_{ij} — волновое число центра линии, см⁻¹; θ — зенитный угол; Φ_{ij} — контур спектральной линии. Аппаратная функция спектрометра должна удовлетворять условию нормировки:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} F_{ILS}(v) dv = 1. \quad (4)$$

В настоящей статье при моделировании спектров использовалась аппаратная функция вида $\sin(x)/x$.

Практическая реализация решения обратной задачи в программном пакете GFIT предполагает минимизацию квадратической невязки между измеренным спектром y_v и модельным спектром $F_v(\mathbf{x}, \mathbf{b})$:

$$J(\mathbf{x}) = \sum_v \|F_v(\mathbf{x}, \mathbf{b}) - y_v\|^2. \quad (5)$$

Для этого используется метод масштабирования начального приближения для вертикального профиля искомого газа. В данном методе минимизация (5) осуществляется умножением искомого профиля на число. В качестве вектора фиксированных параметров обратной задачи \mathbf{b} могут выступать высотные профили концентрации тех атмосферных газов, которые в данном восстановлении считаются известными и фиксируются, а также вертикальный профиль температуры. Источниками ошибок в восстановлении искомого параметра атмосферы данным методом могут быть неполнота прямой модели, шум измерения, а также ошибки в интенсивности, частоте и уширении спектральной линии, заложенные в базе данных HITRAN, неточное знание вертикального профиля температуры. Ошибка, связанная с неточным знанием профиля температуры, может быть минимизирована путем использования температурно-независимых линий поглощения.

Результаты исследования

По результатам поиска в базе данных HITRAN-2004 из спектрального диапазона 4000–9000 см⁻¹ были отобраны 22 линии (14 линий CH₄ и 8 линий CO₂), обладающие эффектом температурно-независимого поглощения и удовлетворяющие критерию изолированности (таблица).

Характерное изменение интенсивности линии на заданном температурном интервале 220–310 К на примере некоторых отобранных линий продемонстрировано на рис. 2.

Как показано на рис. 3, такие линии практически не приводят к заметному изменению функции пропускания атмосферы при изменении температуры в заданном температурном интервале.

Изолированные спектральные линии газов CH₄ и CO₂, обладающие эффектом температурно-независимого поглощения в спектре пропускания атмосферы

Молекула	Изотоп	Центр длины, см ⁻¹	Энергия нижнего уровня, см ⁻¹	Идентификация перехода, принятая в БД HITRAN				Интенсивность		Максимальное отклонение, %	Ширина ок-на, см ⁻¹
				Квантовые числа верхнего колебательного состояния	Квантовые числа нижнего колебательного состояния	Вращательные квантовые числа верхнего состояния	Вращательные квантовые числа нижнего состояния	min	max		
CH ₄	211	4258,6944	293,1542	1 0 0 1 1F2	0 0 0 0 1A1	8A1 15	7A2 1	2,87E-21	3,01E-21	4,77	0,18
CH ₄	211	4276,6343	293,1542	1 0 1 1 1F1	0 0 0 0 1A1	7A1 16	7A2 1	1,02E-21	1,06E-21	4,77	0,70
CH ₄	211	4311,1424	293,1542	1 0 1 1 1F2	0 0 0 0 1A1	7A1 18	7A2 1	1,55E-21	1,63E-21	4,77	0,30
CH ₄	211	4315,9516	293,1787	1 0 1 1 1F2	0 0 0 0 1A1	7F2 56	7F1 2	1,41E-21	1,48E-21	4,78	0,10
CH ₄	211	4349,8222	293,1542	1 0 1 1 1F1	0 0 0 0 1A1	7A1 22	7A2 1	1,23E-21	1,28E-21	4,77	0,17
CH ₄	211	4355,2430	293,1266	1 0 1 1 1F2	0 0 0 0 1A1	7F1 71	7F2 1	9,69E-22	1,01E-21	4,77	0,30
CH ₄	211	4392,6483	293,1230	1 0 1 1 1F2	0 0 0 0 1A1	8F2 63	7F1 1	1,56E-21	1,64E-21	4,77	0,60
CH ₄	211	4392,7444	293,1266	1 0 1 1 1F2	0 0 0 0 1A1	8F1 61	7F2 1	1,11E-21	1,16E-21	4,77	0,55
CH ₄	211	5926,4662	293,1266	0 0 2 0 1F2	0 0 0 0 1A1	6F1191	6F1 1	2,73E-22	2,86E-22	4,77	0,18
CH ₄	211	5926,4837	293,1230	0 0 2 0 1F2	0 0 0 0 1A1	6F2199	6F2 1	2,70E-22	2,83E-22	4,77	0,70
CH ₄	211	5926,5755	293,1542	0 0 2 0 1F2	0 0 0 0 1A1	6A1 70	6A1 1	4,44E-22	4,65E-22	4,77	0,30
CH ₄	211	5926,6250	293,1646	0 0 2 0 1F2	0 0 0 0 1A1	6F1193	6F1 2	2,62E-22	2,75E-22	4,77	0,10
CH ₄	211	5926,6482	293,1701	0 0 2 0 1F2	0 0 0 0 1A1	6E 132	6E 1	1,74E-22	1,83E-22	4,77	0,17
CH ₄	211	5926,6785	293,1787	0 0 2 0 1F2	0 0 0 0 1A1	6F2200	6F2 2	2,56E-22	2,68E-22	4,78	0,30
CO ₂	626	6207,2457	234,0833	3 0 0 13	0 0 0 01	—	P 24e	1,27E-23	1,33E-23	4,66	0,50
CO ₂	626	6209,1240	197,4166	3 0 0 13	0 0 0 01	—	P 22e	1,42E-23	1,48E-23	4,72	0,40
CO ₂	626	6243,9124	197,4166	3 0 0 13	0 0 0 01	—	R 22e	1,62E-23	1,69E-23	4,72	0,60
CO ₂	626	6245,1233	234,0833	3 0 0 13	0 0 0 01	—	R 24e	1,45E-23	1,52E-23	4,66	0,50
CO ₂	626	6327,0609	234,0833	3 0 0 12	0 0 0 01	—	P 24e	1,21E-23	1,26E-23	4,66	0,50
CO ₂	626	6328,9556	197,4166	3 0 0 12	0 0 0 01	—	P 22e	1,35E-23	1,42E-23	4,72	0,50
CO ₂	626	6363,7277	197,4166	3 0 0 12	0 0 0 01	—	R 22e	1,49E-23	1,56E-23	4,72	0,60
CO ₂	626	6364,9220	234,0833	3 0 0 12	0 0 0 01	—	R 24e	1,32E-23	1,38E-23	4,66	0,60

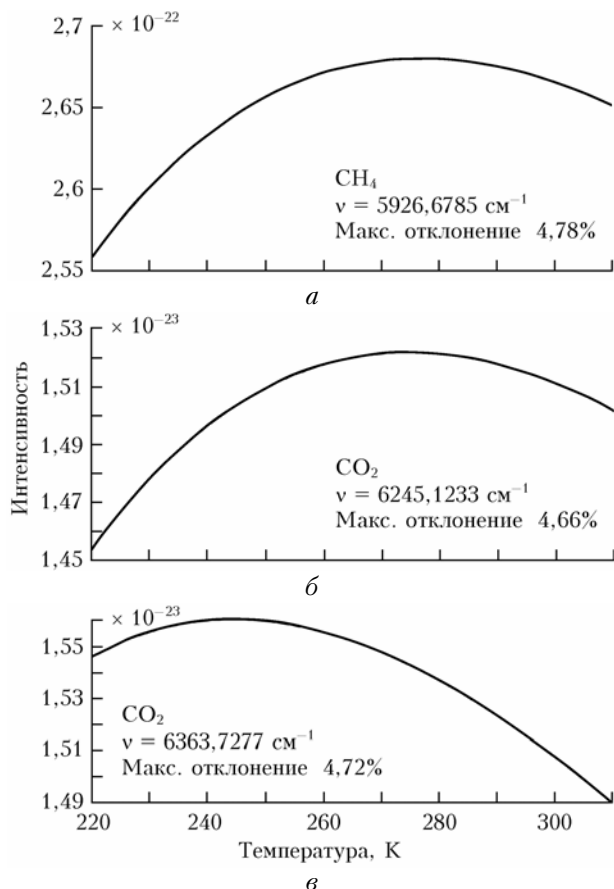


Рис. 2. Зависимость интенсивности линии от температуры в интервале 220–310 К на примере нескольких отобранных линий

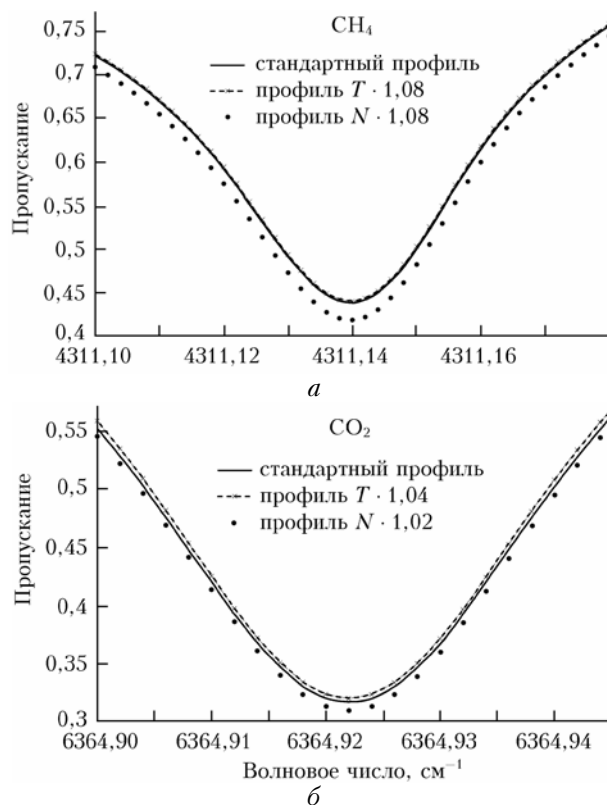


Рис. 3. Изменение профиля температуры (T) на 4–8% (10–25 К для приземных значений) приводит к меньшему изменению функции пропускания в отобранных линиях, чем максимальная вариация концентрации искомого газа в атмосферном столбе: 8% для CH₄ (a), 2% для CO₂ ($б$). Исходная модель атмосферы – «лето средних широт»

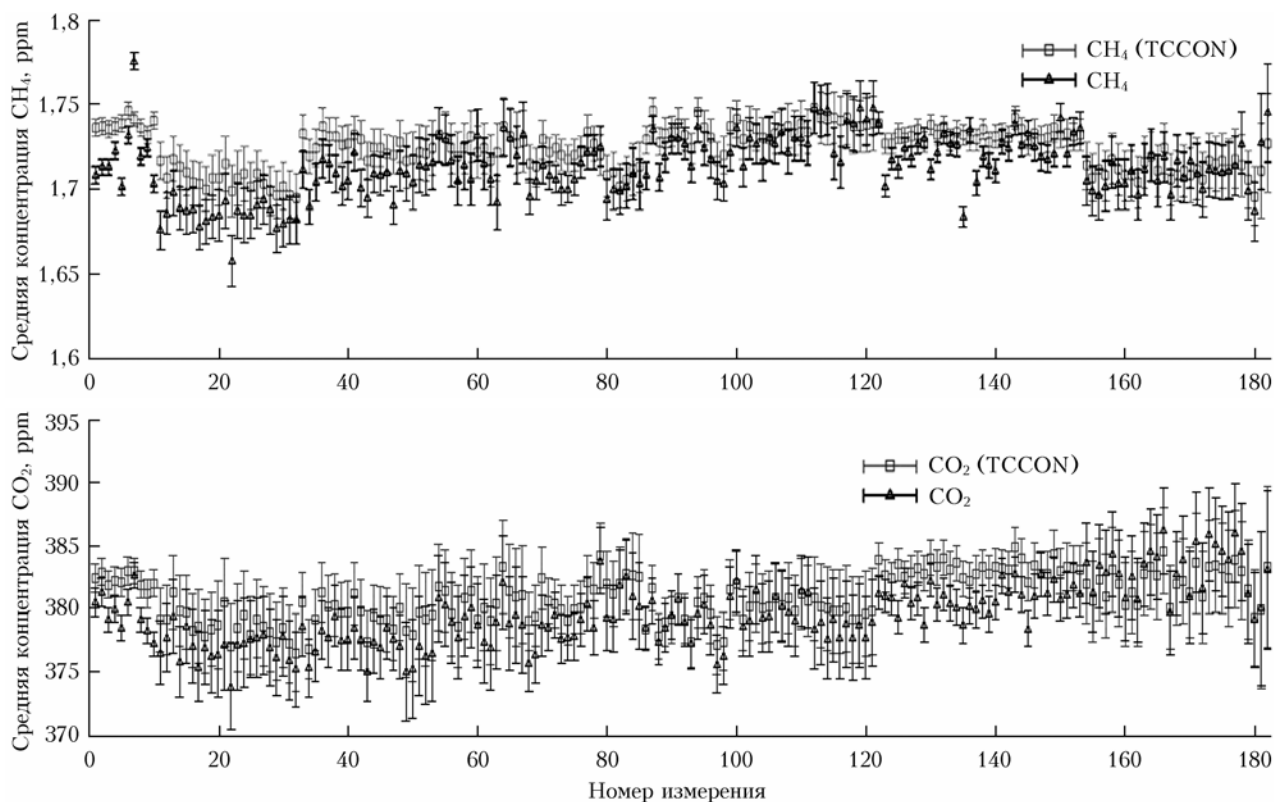


Рис. 4. Средние концентрации CH_4 и CO_2 , определенные по микроокнам, рекомендованным сообществом TCCON, и по микроокнам в окрестности обнаруженных температурно-независимых линий поглощения

Вариация температурного и концентрационных профилей при построении графиков на рис. 3 осуществлялась умножением начальных профилей на множители, соответствующие указанным процентам (например, изменению на 8% соответствует множитель 1,08, на который умножается каждое значение профиля на высотной сетке атмосферной модели). Использование таких линий может существенно уменьшить ошибку в определении концентрации в задачах зондирования парниковых газов по спектрам пропускания атмосферы, когда профиль температуры точно не известен или не определяется.

Выбранные линии апробированы на примере определения средней концентрации двуокиси углерода и метана в атмосферном столбе с помощью программного пакета GFIT с использованием отобранных спектральных микроокон (см. таблицу) и микроокон, рекомендованных сообществом Международной сети TCCON.

Полученные обоими методами концентрации искомого газа, приведенные к атмосферному столбу сухого воздуха, варьируются следующим образом: CH_4 в интервале 1,65–1,75 ppm, CO_2 в интервале 373–385 ppm (рис. 4).

Заключение

Сравнительный анализ полученного среднего содержания CH_4 и CO_2 в атмосфере по найденному набору микроокон и по стандартному набору, рекомен-

дованному сообществом сети TCCON, показывает приемлемое согласие между обоими результатами (см. рис. 4). Однако использование спектральных линий, обладающих эффектом температурно-независимого поглощения, позволяет минимизировать ошибку, связанную с неточным знанием вертикального профиля температуры. Например, разбив температурный интервал 220–310 K на два интервала 220–272 и 245–310 K (характерные для вариаций температур в нижней и средней тропосфере зимой и летом), можно использовать различные линии CO_2 — для зимы линию $6363,7277 \text{ см}^{-1}$, для лета линию $6245,1233 \text{ см}^{-1}$ (см. рис. 2), что позволит уменьшить ошибку определения полного содержания. Такой подход предоставляет потенциальную возможность заведомо получать более точные результаты при решении обратной задачи по определению средней концентрации искомого газа в атмосфере из ее ИК-спектров пропускания.

В дальнейшем планируется произвести аналогичный поиск и выборку температурно-независимых линий для других атмосферных газов, таких как CO, H_2O и HDO, и апробировать найденные линии для решения обратной задачи по определению содержания этих газов из ИК-спектров высокого разрешения, измеряемых на УАФС.

Авторы признательны О.Б. Родимовой и О.Н. Сулакшиной за обсуждение результатов работы и полезные замечания, а также В.И. Перевалову и С.А. Ташкуну за консультации по идентификации колебательно-вращательных уровней выбранных температурно-независимых линий в молекулах CH_4 и CO_2 .

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 09-01-00649 и 09-01-00474) и Минобрнауки РФ (госконтракты № П1151 и П1571).

1. *Dr. Pieter Tans*. NOAA/ESRL (www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/) and *Dr. Ralph Keeling*, Scripps Institution of Oceanography (scrippsco2.ucsd.edu/)
2. *Будыко М.И.* Климат в прошлом и будущем. М.: Гидрометеиздат, 1980. 352 с.
3. *Wuebbles D.J., Hayhoe K.* Atmospheric methane and global change // *Earth-Science Rev.* 2002. V. 57. P. 177–210.
4. *Petit J.R., Jouzel J., Raynaud D., Barkov N.I., Barnola J.M., Basile I., Bender M., Chappellaz J., Davis J., Delaygue G., Delmotte M., Kotlyakov V.M., Legrand M., Lipenkov V., Lorius C., Pépin L., Ritz C., Saltzman E., Stievenard M.* Climate and Atmospheric History of the Past 420,000 years from the Vostok Ice Core, Antarctica // *Nature (Gr. Brit.)*. 1999. V. 399, N 6735. P. 429–436.
5. *Kobayashi H.*, Ed. Interferometric Monitor for Greenhouse Gases: IMG Project Technical Report // IMG Mission Operation & Verification Committee, CRIEPI; Tokyo, Japan. 1999. P. 45.
6. *Notholt J., Schrems O.* Ground-based FTIR measurements of vertical column densities of several trace gases above Spitzbergen // *Geophys. Res. Lett.* 1994. V. 21, N 13. P. 1355–1358.
7. *Васин В.В., Азеев А.Л.* Некорректные задачи с априорной информацией. Екатеринбург: УИФ «Наука», 1993. 262 с.
8. *Rogers C.D.* Inverse methods for atmospheric sounding. Theory and practice. Singapore: World Scientific, 2000. 206 p.
9. *Burrows J.P., Hölzle P.E., Goede A.P.H., Visser H., Fricke W.* SCIAMACHY – Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric Chartography // *Acta Astronaut.* 1995. V. 35, N 5. P. 445–451.
10. *Hamazaki T., Kaneko Y., Kuze A.* Carbon dioxide monitoring from the GOSAT satellite // Proc. XX-th ISPRS congress, 12–23 July 2004. Istanbul, Turkey, 2004.
11. URL: <http://tccon.caltech.edu/>
12. URL: <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html>
13. *Nakazawa T., Sugawara S., Inoue G., Machida T., Masyutov S., Mukai H.* Aircraft measurements of the concentrations of CO₂, CH₄, N₂O, and CO and the carbon and oxygen isotopic ratios of CO₂ in the troposphere over Russia // *J. Geophys. Res. D.* 1997. V. 102, N 3. P. 3843–3859.
14. *Rothman L.S., Jacquemart D., Barbe A., Benner D.C., Birk M., Brown L.R., Carleer M.R., Chackerian C., Jr., Chance K., Coudert L.H., Dana V., Devi V.M., Flaud J.-M., Gamache R.R., Goldman A., Hartmann J.-M., Jucks K.W., Maki A.G., Mandin J.-Y., Massie S.T., Orphal J., Perrin A., Rinsland C.P., Smith M.A.H., Tennyson J., Tolchev R.N., Toth R.A., Auwera J.V., Varanasi P., Wagner G.* The HITRAN-2004 molecular spectroscopic database // *J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer.* 2005. V. 96, N 4. P. 139–204.
15. *Герцберг Г.* Колебательные и вращательные спектры многоатомных молекул / Пер. с англ. М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1949. 647 с.
16. *Грибанов К.Г., Захаров В.И., Ташкун С.А.* Пакет программ FIRE-ARMS и его применение в задачах пассивного ИК-зондирования атмосферы // *Оптика атмосф. и океана.* 1999. Т. 12, № 4. С. 372–378.
17. *Gribanov K.G., Zakharov V.I., Tashkun S.A., Tyuterev V.I.G.* A new software tool for radiative transfer calculations and its application to IMG/ADEOS data // *J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer.* 2001. V. 68, N 4. P. 435–451.
18. URL: <http://kurucz.harvard.edu/sun.html>
19. URL: <http://www.iao.ru/en/resources/equip/dev/meteo2/>
20. URL: <http://aeronet.gsfc.nasa.gov/>

N.V. Rokotyán, K.G. Gribanov, V.I. Zakharov. **Effect of temperature-independent absorption and its use in remote sensing of atmospheric carbon gases.**

Temperature uncertainty, existing in the solution of inverse problem of retrieval of concentration of atmospheric gases from satellite and ground-based high resolution IR spectra, can be eliminated by using vibrational-rotational spectral lines of atmospheric molecules with the effect of temperature-independent absorption. Absorption coefficient of the lines is virtually independent on temperature variations at a given temperature interval. This paper presents criteria and algorithm of temperature-independent lines selection with a list of selected isolated temperature-independent lines from HITRAN-2004 database for CH₄ and CO₂ molecules from spectral region of 4000–9000 cm⁻¹ for temperature interval of 220–310 K. The selected lines were applied for atmospheric CH₄ and CO₂ retrieval from high-resolution IR spectra of the atmosphere, obtained in the Ural Atmospheric Fourier Station in Kourovka.