

XX СИМПОЗИУМ ПО МОЛЕКУЛЯРНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ
ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ (HIGHRUS-2023)

УДК 629.3.054.254

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕНОСА ИЗЛУЧЕНИЯ В БЛИЖНЕМ
ИК-ДИАПАЗОНЕ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ МЕТАНА
В АТМОСФЕРЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗЛИЧНЫХ
СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИХ БАЗ ДАННЫХ¹

© 2024 г. Т. Ю. Чеснокова^{a, *}, А. В. Ченцов^a, К. Г. Грибанов^b, И. В. Задворных^b, В. И. Захаров^{b, c}

^aИнститут оптики атмосферы им. В. Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия

^bУральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия

^cИнститут математики и механики им. Н. Н. Красовского УрО РАН, Екатеринбург, Россия

*e-mail: ches@iao.ru

Поступила в редакцию 11.10.2023 г.

После доработки 11.10.2023 г.

Принята к публикации 05.11.2023 г.

Проведено моделирование атмосферных солнечных спектров в полосах поглощения метана в ближнем ИК-диапазоне и сделано сравнение со спектрами, измеренными на наземном фурье-спектрометре с высоким спектральным разрешением в различных атмосферных условиях. Определено содержание метана в столбе атмосферы с использованием различных версий спектроскопических баз данных HITRAN (2008, 2012, 2016, 2020), GEISA (2015, 2020) и ATM (2016, 2020) и банка линий CH₄ GOSAT2014. Для каждой спектроскопической базы было рассчитано усредненное по 1346 спектрам значение RMS (отклонение рассчитанных спектров от измеренных). Было обнаружено, что наименьшее значение RMS наблюдалось для результатов, полученных с линиями поглощения CH₄ из ATM2020, ATM2016 и HITRAN2008. Были выявлены параметры линий поглощения CH₄ в спектроскопических базах данных, которые вносят наибольшую погрешность в моделирование переноса излучения в атмосфере в спектральном диапазоне 6000–6100 см⁻¹.

Ключевые слова: атмосферное пропускание, метан, линии поглощения, спектроскопические базы данных

DOI: 10.31857/S0044453724060054, EDN: PYGQJO

ВВЕДЕНИЕ

В отчете международной рабочей группы по исследованию изменения климата IPCC [1] отмечается, что возрастание концентрации парниковых газов в атмосфере играет большую роль в потеплении климата, наблюдаемого в последние десятилетия. При этом имеется заметная корреляция между увеличением концентрации углекислого газа и метана и возрастанием средней глобальной температуры поверхности Земли. В настоящее время содержание CH₄ в атмосфере превышает доиндустриальный уровень более чем в 2.5 раза. Метан является вторым после CO₂ атмосферным газом по величине радиационного форсинга, вызванного увеличением концентрации в атмосфере с 1750 г. по 2005 г. [2]. Метан поступает в атмосферу из природных и антропогенных источников, и его время жизни в атмосфере составляет около 9 лет [3]. Для

мониторинга атмосферного содержания CH₄ используются измерения спутниковых и наземных спектрометров, регистрирующих солнечное излучение, прошедшее через атмосферу. Для решения обратной задачи определения содержания метана из измеренных спектров необходима точная информация по параметрам линий поглощения атмосферных газов. Для моделирования атмосферного радиационного переноса используются такие параметры, как интенсивность, положение центра линии, коэффициенты уширения воздухом и самоуширения, коэффициент сдвига центра линии, вызванного давлением, и энергия нижнего уровня. Параметры линий определяются экспериментально и теоретически и содержатся в специализированных спектроскопических базах данных. Погрешность в параметрах линий поглощения CH₄ может приводить к погрешности около 8% в измерениях концентрации метана в атмосфере с использованием фурье-спектрометра [4]. Также важно точно знать параметры линий поглощения

¹ Иркутская обл., пос. Чара, 3–7 июля 2023 года.

при лидарном зондировании содержания метана в атмосфере, особенно, в случае узкой аппаратной функции спектрального распределения мощности лазерного излучения. Различия в коэффициентах поглощения метана за счет использования спектроскопических баз данных HITRAN2016 и GEISA2015 достигают 50% в спектральных диапазонах лазерного зондирования метана [5]. В наших предыдущих исследованиях [6,7] было показано, что различия в параметрах линий поглощения CH_4 в спектроскопических базах данных могут приводить к различиям в результатах определения общего содержания метана из измеренных солнечных спектров более 2%.

Спектроскопические базы данных регулярно обновляются. При этом сравнение измеренных атмосферных спектров и модельных спектров показывает, что информация в новых версиях не всегда лучше, чем в предшествующих версиях. В отдельных спектральных интервалах могут наблюдаться большие расхождения. Поэтому необходимо регулярно проводить оценки появляющейся новой спектроскопической информации на основе атмосферных измерений спектров поглощения с высоким спектральным разрешением.

Целью нашего исследования была оценка влияния различия информации по параметрам линий поглощения в спектроскопических базах данных (БД) на определение общего содержания CH_4 из атмосферных спектров солнечного излучения, измеренных на наземном фурье-спектрометре в ближнем ИК диапазоне и валидация параметров линий поглощения CH_4 в новых версиях БД на основе большого набора измеренных атмосферных спектров. В исследовании участвовали различные версии спектроскопических БД HITRAN (2008 [8], 2012 [9], 2016 [10], 2020 [11]), GEISA (2015 [12], 2020 [13]) и ATM (2016, 2020) [14, 15], а также экспериментальный банк линий поглощения метана GOSAT [16], разработанный для обработки измерений спутникового спектрометра в ближнем ИК-диапазоне. В отличие от предыдущих наших исследований [6, 7] в данной работе были сделаны оценки с новыми версиями этих БД, опубликованными в 2021–2022 гг. Кроме того, на основе большого числа солнечных спектров, измеренных в различных атмосферных условиях, были выявлены параметры отдельных линий поглощения CH_4 в спектроскопических БД, вносящие наибольшую погрешность в моделирование атмосферного переноса излучения в ближнем ИК-диапазоне.

МОДЕЛИРОВАНИЕ АТМОСФЕРНОГО ПРОПУСКАНИЯ

Сначала мы провели моделирование атмосферного пропускания на вертикальной трассе через всю атмосферу, используя различные базы данных по

линиям поглощения метана, и сравнили модельные результаты между собой. Был рассмотрен ближний ИК диапазон, в котором присутствуют области октады и тетрадекады с сильными линиями поглощения метана. В области октады ($4190\text{--}4315\text{ см}^{-1}$) в новой версии HITRAN2020 были улучшены данные по линиям поглощения метана согласно БД SEOM-IAS [17], которая была создана для обработки спутниковых измерений и протестирована на спектрах, полученных со спутникового сенсора TROPOMI. В диапазоне $4315\text{--}4600\text{ см}^{-1}$ в HITRAN2020 модернизация данных по метану проводилась за счет выборочного применения параметров линий поглощения из экспериментальных списков линий [18,19]. В области тетрадекады наблюдается более сложная ситуация и исследования продолжаются. В HITRAN2020 в диапазоне $5500\text{--}6300\text{ см}^{-1}$, в основном, остались данные по метану из версии HITRAN2016Beta, которая основана на экспериментальном банке линий CH_4 GOSAT2014 [16]. Только параметры уширения некоторых отдельных линий были скорректированы из измерений [20].

В 2010 г. был опубликован экспериментальный банк данных по линиям поглощения метана в GOSAT2010 для обработки измерений солнечных спектров фурье-спектрометром TANSO-FTS, расположенном на спутнике GOSAT. Позднее был создан банк поглощения CH_4 GOSAT2014 [16], в котором по сравнению с предыдущей версией были уточнены положения и интенсивности линий за счет использования новых лабораторных измерений, а также определены новые коэффициенты уширения воздухом и сдвига линий. Кроме того, расширена идентификация линий CH_4 . Банк GOSAT2014 содержит параметры 12150 линий метана в диапазоне $5550\text{--}6240\text{ см}^{-1}$ с обрезкой по интенсивности $5 \times 10^{-25}\text{ см}^2/\text{молекула}$ при температуре 296 К. Данные из банка линий GOSAT вошли также в новую версию спектроскопической базы данных GEISA2020.

Моделирование атмосферного пропускания производилось методом полинейного счета line-by-line [21] с использованием контура Фойгта со спектральным разрешением 0.02 см^{-1} . В качестве метео-модели применялась модель лета средних широт [22] с содержанием метана 1.8 ppm. Атмосфера разбивалась на 45 слоев от 0 до 100 км с постоянными значениями температуры, давления и концентрации газов. Разница в пропускании, вычисленном с линиями поглощения CH_4 из различных баз данных, приведена на рис. 1. Банк линий метана GOSAT2014 содержит параметры линий только в области тетрадекады $5550\text{--}6240\text{ см}^{-1}$, поэтому сравнение с ним было сделано только в этом диапазоне. Имеются большие различия (более 0.1 в пропускании) между результатами моделирования с различными базами данных, в частности даже между двумя новыми версиями HITRAN2020 и GEISA2020.

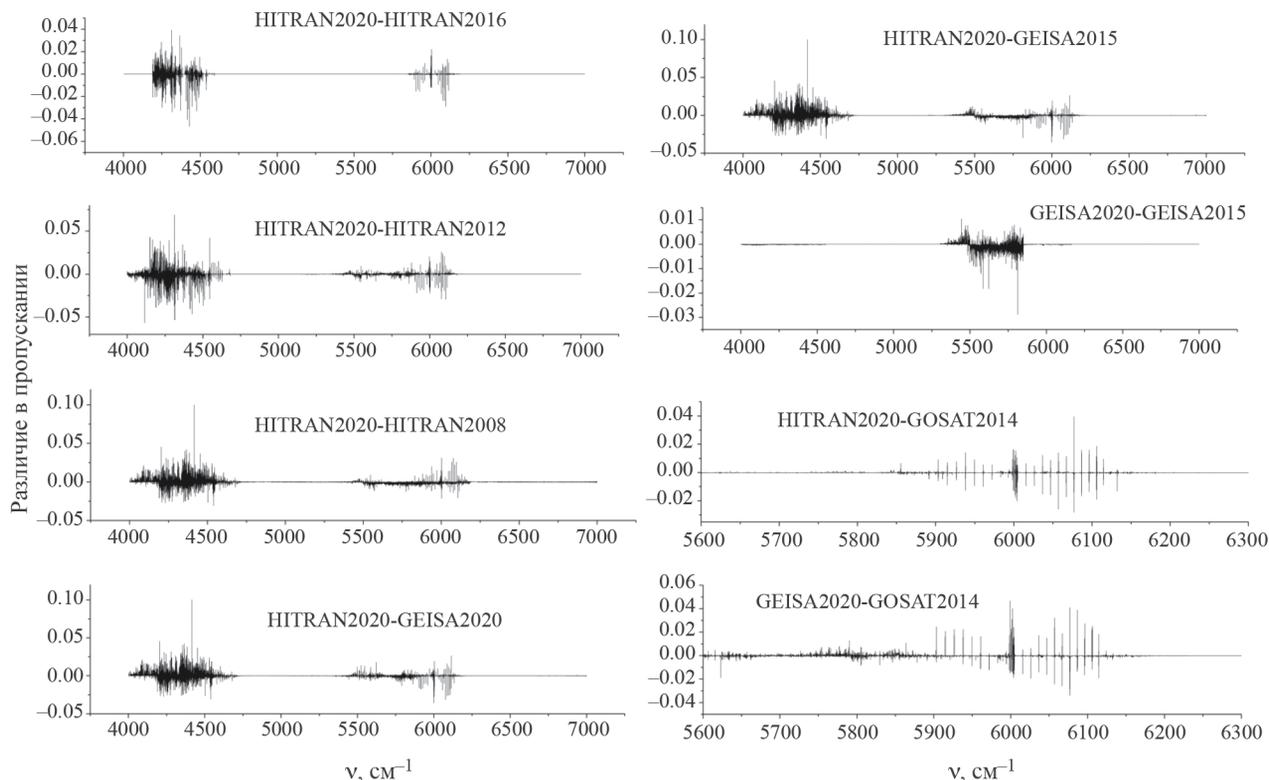


Рис. 1. Различие в атмосферном пропускании, вычисленном с линиями поглощения CH_4 из различных баз данных на вертикальной трассе через всю атмосферу для лета средних широт; ν – волновое число.

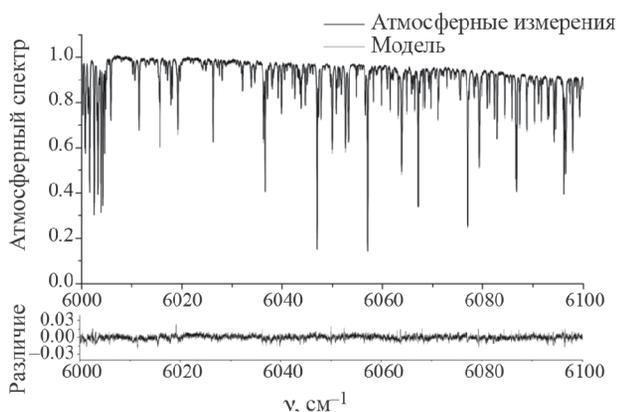


Рис. 2. Сравнение атмосферного солнечного спектра, измеренного на наземном фурье-спектрометре в Коуровке 16.06.2015 при зенитном угле Солнца $SZA = 33.7^\circ$, с модельным спектром, вычисленным с линиями поглощения CH_4 из HITRAN2008.

СРАВНЕНИЕ МОДЕЛЬНЫХ СПЕКТРОВ С ИЗМЕРЕННЫМИ АТМОСФЕРНЫМИ СОЛНЕЧНЫМИ СПЕКТРАМИ

Чтобы оценить качество информации по линиям поглощения метана в современных спек-

троскопических БД в ближнем ИК диапазоне мы провели сравнение модельных спектров с атмосферными спектрами, измеренными наземным ИК-фурье-спектрометром на Уральской атмосферной станции в Коуровке [23]. Коуровская астрономическая обсерватория расположена в лесной зоне рядом с Екатеринбургом (57.038°N , 59.545°E , высота 300 м над уровнем моря). При измерениях солнечных спектров отношение сигнала к шуму было около 600 и спектральное разрешение составляло 0.02 cm^{-1} , что при сравнении измерений с модельными расчетами позволяет выявить неточные параметры линий поглощения CH_4 в спектроскопических БД.

Спектры моделировались методом line-by-line с использованием контура Фойгта с учетом основных поглощающих газов и внеатмосферного солнечного спектра. Высотные профили давления, температуры и концентрации атмосферных газов были взяты из реанализа NCEP/NCAR [24, 25] для местоположения Коуровки, а также из моделей AFGL [22]. Проект NCEP/NCAR собирает данные с метеорологических станций и спутниковых наблюдений с 1948 г. по настоящее время с глобальным покрытием и временным разрешением 4 раза в сутки. Модельные атмосферные профили при помощи интерполяции до высот 2 км были

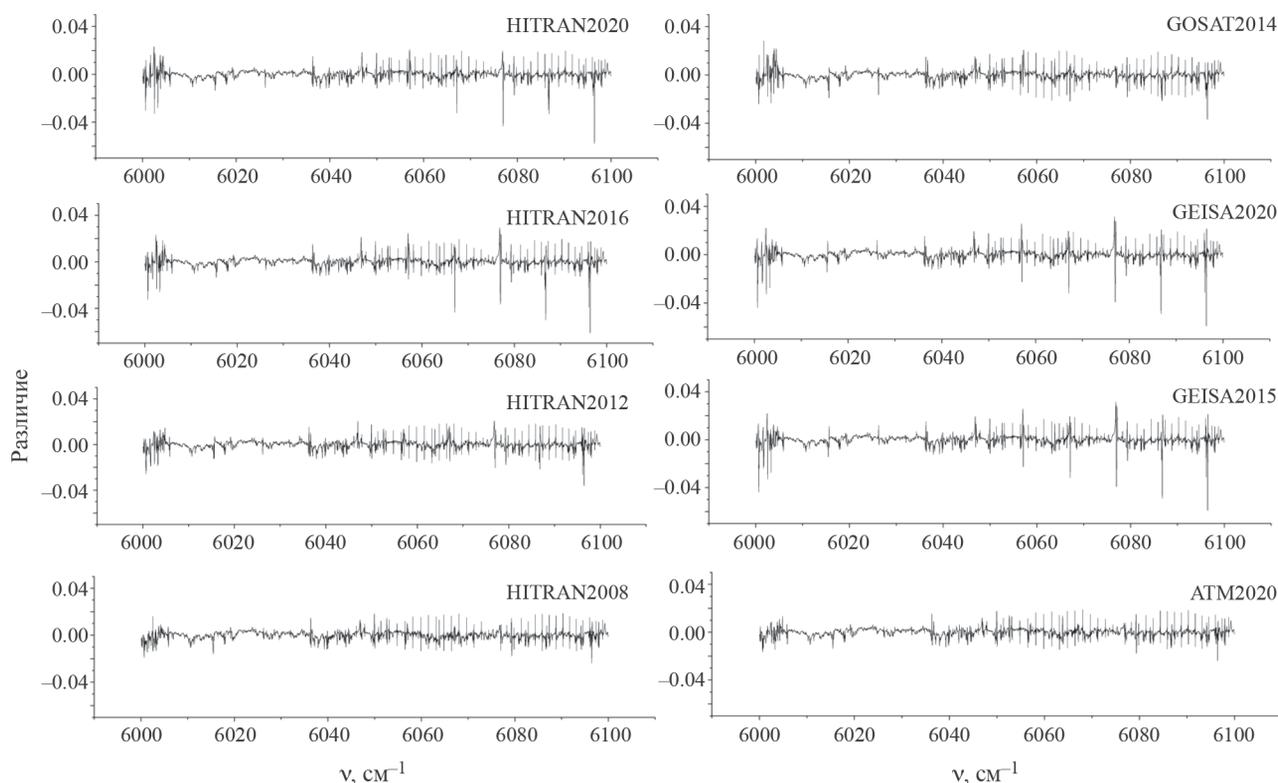


Рис. 3. Усредненное по 1346 спектрам различие измеренных атмосферных солнечных спектров от спектров, вычисленных с параметрами линий поглощения CH_4 из различных спектроскопических БД.

дополнены локальными измерениями температуры, давления и влажности у поверхности, сделанными в момент регистрации спектров в Коуровке. Выше 2 км применялись профили NCEP/NCAR и AFGL. Содержание CH_4 и мешающих газов определялось и корректировалось в прямой задаче с использованием пакета программ SFIT [26, 27]. На рис. 2 приведен пример измеренного атмосферного спектра и сравнение с модельным в полосе поглощения CH_4 в области тетрадекады.

Эффективным способом оценки качества спектроскопической информации по линиям поглощения является сравнение большого набора модельных и измеренных с высоким спектральным разрешением атмосферных спектров. Это позволяет выявить систематические погрешности в параметрах линий, таких как интенсивность, положение центра линий, коэффициенты уширения давлением. Кроме того, усреднение разницы между измеренными спектрами и модельными по широкому набору спектров уменьшает влияние случайных погрешностей на результаты сравнения. Например, такой метод для валидации параметров линий поглощения применяется французскими исследователями, которые занимаются развитием и поддержкой спектроскопической БД GEISA. Для этого было создано специальное программное

обеспечение SPARTE [28]. Мы также применили этот метод для оценки параметров линий поглощения CH_4 в различных БД. Рассматривались солнечные спектры с марта по сентябрь 2015 г., измеренные в Коуровке, что дает возможность анализа параметров линий CH_4 при больших вариациях давления и температуры. Для сравнения было отобрано 1346 спектров с высоким отношением сигнала к шуму. Для каждой спектроскопической БД было рассчитано усредненное по 1346 спектрам различие измеренных спектров от модельных. При моделировании менялась только спектроскопическая информация о линиях CH_4 согласно различным версиям спектроскопических баз данных HITRAN, ATM и GEISA, а все остальные входные параметры оставались без изменений. Как видно из результатов, представленных на рис. 3, наилучшее согласие между измерениями и модельными спектрами наблюдается при использовании БД HITRAN2008 и ATM.

Некорректные параметры линий поглощения приводят к характерной форме разницы между измеренным и вычисленным спектрами, и по этой форме можно определить, какие параметры вносят наибольший вклад в погрешность. На рис. 4 приведен пример некорректных значений полуширины линий CH_4 в коэффициентах уширения воздухом

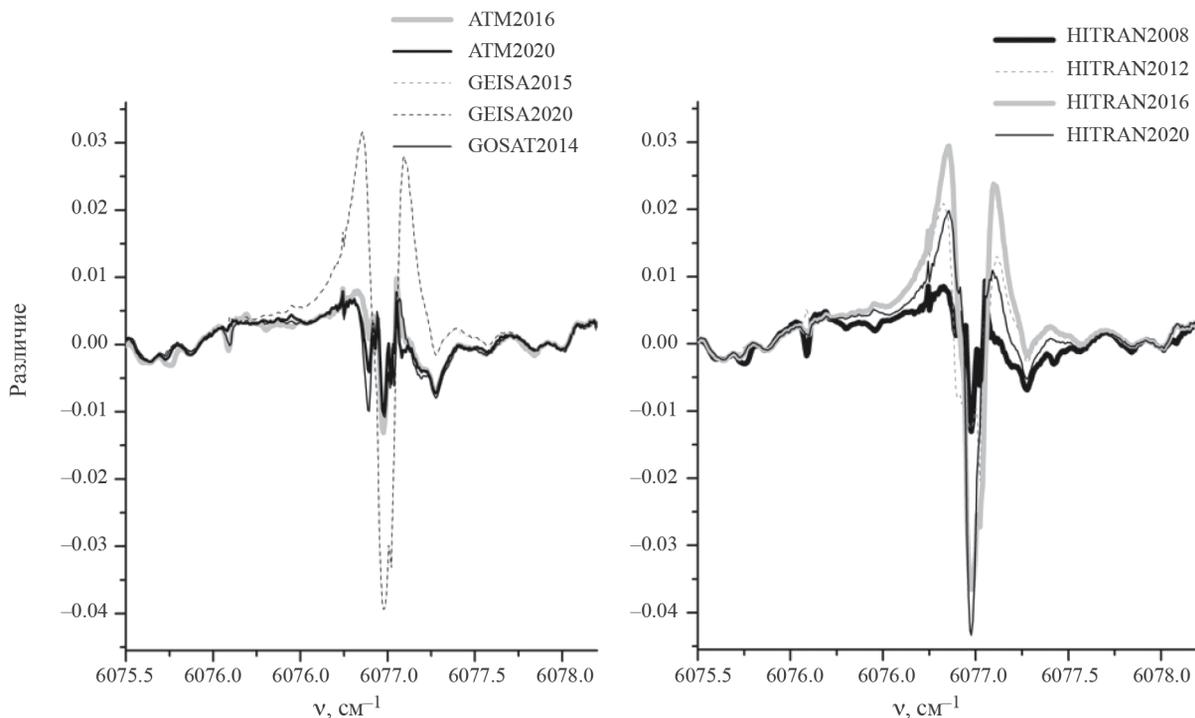


Рис. 4. Различие между измеренным солнечным спектром и модельными спектрами за счет некорректных значений коэффициентов уширения линий поглощения CH_4 в спектроскопических БД.

в GEISA2020, 2015 и HITRAN2012, 2016. Как видно из табл. 1, для линии основного изотополога метана с центром 6076.95 см^{-1} коэффициенты полуширины в случае уширения воздухом γ_{air} в выше перечисленных БД значительно отличаются от величин в других БД.

На рис. 5 показаны проблемы с интенсивностью линий CH_4 в HITRAN2012 и GEISA2020, GEISA2015, что приводит к сильному отличию от атмосферных измерений. Кроме того, в этих БД две соседние линии метана приводятся как одна линия, но с большой интенсивностью (табл. 1).

РЕЗУЛЬТАТЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ CH_4 В АТМОСФЕРЕ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РАЗЛИЧНЫХ СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИХ БД

Из спектров солнечного излучения, измеренных на наземном фурье-спектрометре в Коуровке, определено содержание метана в столбе атмосферы с использованием различных спектроскопических БД по линиям поглощения CH_4 . В определении содержания метана участвовало 1346 выше указанных отобранных спектров с марта по сентябрь 2015 г. Обратная задача решалась при помощи пакета программ SFIT [26, 27] и метода оптимальных оценок [29]. А priori профили температуры, давления и концентрации атмосферных газов были взяты из

реанализа NCEP/NCAR и скорректированы на основе локальных измеренных данных (температуры, давления и влажности) у поверхности в момент регистрации спектров в Коуровке.

Для определения содержания CH_4 в атмосфере использовался спектральный диапазон $6000\text{--}6100 \text{ см}^{-1}$. В этом диапазоне основными мешающими атмосферными газами являются H_2O и CO_2 . Содержание этих газов одновременно определялось в других интервалах ближнего ИК-диапазона и корректировалось в прямой задаче.

На рис. 6а приведены результаты для среднемесячного содержания CH_4 в столбе атмосферы, полученные из измерений солнечного излучения наземным фурье-спектрометром в Коуровке с использованием различных БД по линиям поглощения CH_4 . Параметры линий поглощения других газов были взяты из HITRAN2020. Также на рис. 6а представлены спутниковые измерения метана ИК спектрометром AIRS [30], усредненные за месяц по данным Giovanni [31]. Спутниковые данные AIRS были получены ежедневно в дневное время с пространственным разрешением $1^\circ \times 1^\circ$. Наземные измерения солнечных спектров в Коуровке производились в безоблачные дни, поэтому усреднение содержания CH_4 за месяц производилось по меньшему количеству дней, что может приводить к отличию от среднемесячных данных AIRS.

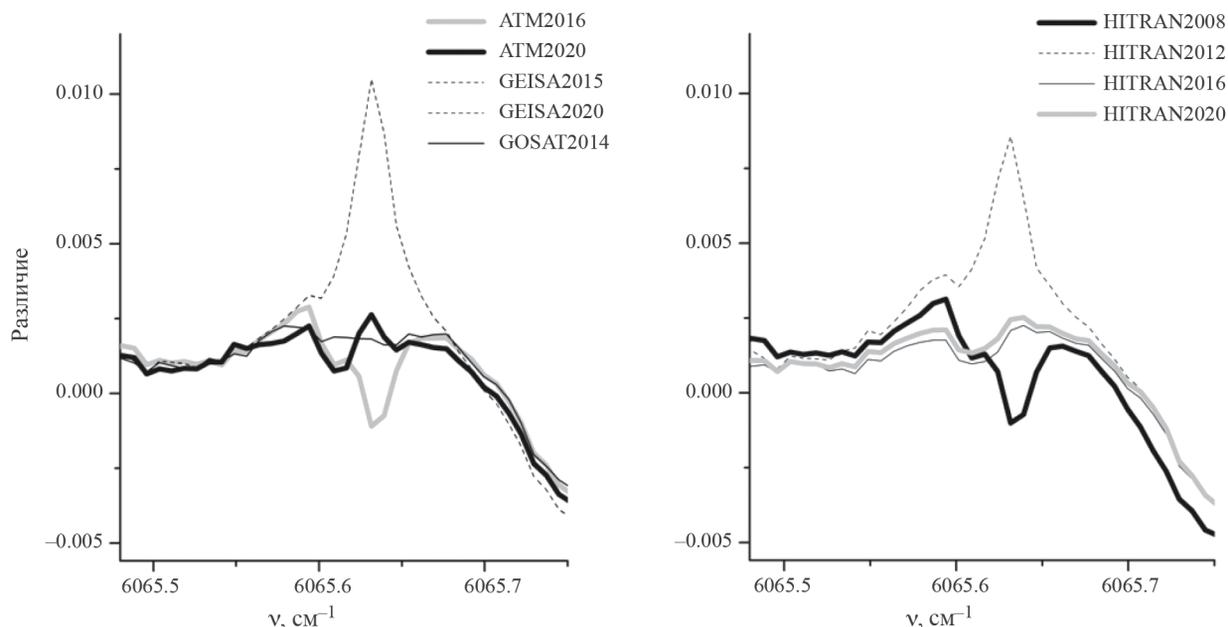


Рис. 5. Различие между измеренным солнечным спектром и модельными спектрами за счет некорректных значений интенсивности линий поглощения CH_4 в спектроскопических БД.

Таблица 1. Значения параметров линий поглощения CH_4 в различных спектроскопических БД: интенсивность S , положение центра линии ν , коэффициенты уширения воздухом γ_{air} и самоуширения γ_{self} , показатель температурной зависимости полуширины n , сдвиг центра линии, вызванный давлением δ

БД линий CH_4	ν , cm^{-1}	S , $\text{cm}^{-1}/(\text{молек. cm}^{-2})$	γ_{air} , $\text{cm}^{-1}/\text{атм}$	γ_{self} , $\text{cm}^{-1}/\text{атм}$	n	δ , $\text{cm}^{-1}/\text{атм}$
HITRAN2020	6076.953280	1.286E-21	0.0575	0.077	0.70	-0.012200
HITRAN2016	6076.953280	1.286E-21	0.0610	0.077	0.70	-0.012200
HITRAN2012	6076.953100	0.123E-20	0.0652	0.076	0.70	-0.002500
HITRAN2008	6076.954000	0.123E-20	0.0571	0.083	0.85	-0.001815
GOSAT2014	6076.953125	1.286E-21	0.0546	0.071	0.85	0.005300
GEISA2020	6076.953100	1.234E-21	0.0610	0.077	0.70	-0.012154
GEISA2015	6076.953100	1.234E-21	0.0610	0.077	0.70	-0.012154
ATM2020	6076.954000	1.226E-21	0.0571	0.079	0.85	-0.001000
HITRAN2020	6065.64752	2.127E-23	0.0643	0.081	0.68	-0.012100
	6065.65300	1.334E-23	0.0640	0.076	0.85	-0.012100
HITRAN2016	6065.64752	2.127E-23	0.0650	0.081	0.68	-0.012100
	6065.65300	1.334E-23	0.0631	0.076	0.85	-0.012100
HITRAN2012	6065.64790	0.422E-22	0.0657	0.079	0.73	-0.012000
HITRAN2008	6065.64010	0.259E-22	0.0670	0.083	0.85	-0.010382
	6065.65240	0.241E-22	0.0656	0.085	0.85	-0.010546
GOSAT2014	6065.64746	2.127E-23	0.0644	0.080	0.85	-0.010900
	6065.65283	1.334E-23	0.0631	0.076	0.85	-0.010900
GEISA2020	6065.64790	4.216E-23	0.0600	0.070	0.85	-0.012131
GEISA2015	6065.64790	4.216E-23	0.0600	0.070	0.85	-0.012131
ATM2020	6065.64700	2.127E-23	0.0650	0.081	0.68	-0.012100
	6065.65250	1.300E-23	0.0631	0.076	0.85	-0.012100

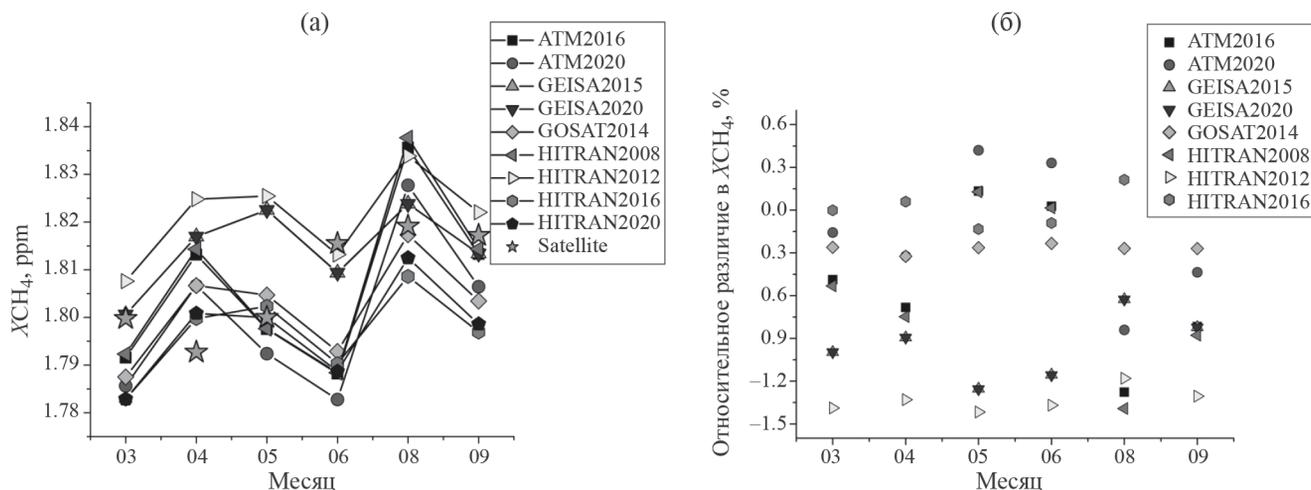


Рис. 6. Среднемесячное содержание CH₄ (а) в столбе атмосферы, определенное из измеренных спектров солнечного излучения в Коуровке при использовании линий поглощения CH₄ из различных спектроскопических БД и спутниковые измерения AIRS (звездочки на графике); относительное различие в содержании CH₄, определенном с HITRAN2020 и другими спектроскопическими БД (б).

Таблица 2. Среднеквадратичное отклонение рассчитанного спектра от измеренного RMS и критерий однородности χ^2 , усредненные по 1346 спектрам

БД линий CH ₄	RMS, %		χ^2	
	БД линий мешающих газов		БД линий мешающих газов	
	ATM2020	HITRAN2020	ATM2020	HITRAN2020
ATM2016	0.502	0.508	1.853	1.902
ATM2020	0.499	0.505	1.829	1.880
GEISA2015	0.563	0.568	2.328	2.369
GEISA2020	0.563	0.568	2.329	2.370
GOSAT2014	0.538	0.541	2.128	2.154
HITRAN2008	0.506	0.513	1.887	1.942
HITRAN2012	0.526	0.531	2.034	2.077
HITRAN2016	0.559	0.564	2.292	2.337
HITRAN2020	0.539	0.545	2.133	2.181

На рис. 6б приведено относительное отличие результатов определения содержания CH₄, полученных с использованием линий поглощения CH₄ из HITRAN2020, от результатов с другими БД. Различия в среднемесячном содержании метана за счет использования разных спектроскопических БД по линиям поглощения CH₄ достигают 1.5%, а в отдельных измерениях могут достигать 4% и более.

Мы сделали оценку спектроскопических БД по основным критериям качества решения обратной задачи: среднеквадратичное отклонение рассчитанного спектра от измеренного RMS и критерий однородности χ^2 . Минимальные значения этих критериев будут характеризовать «лучшую»

спектроскопическую БД для данного спектрального интервала, использованного при определении содержания CH₄.

Было рассчитано усредненное по 1346 спектрам значение RMS (отклонение рассчитанных спектров от измеренных) и критерий однородности χ^2 для каждой БД по линиям поглощения метана (табл. 2). Использование новой версии HITRAN2020 приводит к лучшему согласию измеренных спектров и модельных и к уменьшению величин RMS и χ^2 по сравнению с предыдущей версией HITRAN2016. Значения RMS были 0.54 для HITRAN2020 и 0.56, для HITRAN2016. Тем не менее наименьшее RMS (~ 0.5) наблюдалось для результатов, полученных

с линиями поглощения CH_4 из ATM2020, ATM2016 и старой версии HITRAN2008.

Было также интересно узнать, как будет влиять информация по линиям поглощения мешающих газов на решение обратной задачи определения содержания метана. В табл. 2 приведено сравнение результатов по критериям RMS и χ^2 при использовании линий поглощения мешающих газов из HITRAN2020 и ATM2020. В целом, RMS был немного ниже для ATM2020.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Было выявлено, что имеются большие различия в атмосферном пропускании (более 0.1) между результатами моделирования с линиями поглощения CH_4 из различных спектроскопических баз данных, в частности, даже между двумя новыми версиями HITRAN2020 и GEISA2020.

Сравнение модельных расчетов с измеренными атмосферными спектрами показало, что в диапазоне 6000–6100 см^{-1} использование параметров линий CH_4 из новой версии HITRAN2020 по сравнению с предыдущей HITRAN2016 приводит к лучшему согласию с атмосферными измерениями, при этом усредненное по 1346 спектрам отклонение измеренных спектров от модельных RMS = 0.54 и 0.56, соответственно. Однако по критериям RMS и χ^2 наилучшее решение обратной задачи определения содержания CH_4 в атмосфере дает использование линий CH_4 из HITRAN2008 и ATM (RMS = 0.5).

Относительное различие в восстановленном значении среднемесячного атмосферного содержания CH_4 из измеренных солнечных спектров с использованием линий поглощения CH_4 из разных баз данных достигает 1.5%, а для отдельных измерений может превышать 4%.

Для дальнейшего повышения точности определения содержания метана дистанционными методами в ближнем ИК-диапазоне требуется уточнение параметров линий поглощения в спектроскопических БД.

Исследования Чесноковой Т. Ю., Ченцова А. В. выполнены при финансовой поддержке в рамках государственного задания ИОА СО РАН. Работы Грибанова К. Г., Задворных И. В., Захарова В. И. поддержаны Министерством высшего образования и науки РФ (проект № FEUZ-2024-0011).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Masson-Delmotte V., Zhai P., Pirani A. et al.* IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. doi:10.1017/9781009157896
2. *Forster P., Ramaswamy V., Artaxo P. et al.* 2007: Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Chapter 2. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
3. *Prather M.J., Holmes C.D., Hsu J.* // Geophys. Res. Lett. 2012. V. 39. P. L09803. doi:10.1029/2012GL051440
4. *Holl G., Walker K.A., Conway S. et al.* // Atmos Meas Tech. 2016. V. 9. P. 1961–1980. https://doi.org/10.5194/amt-9-1961-2016
5. *Василенко И.А., Садовников С.А., Романовский О.А.* // Оптика атмосферы и океана. 2020. Т. 33. № 04. С. 298–301. DOI: 10.15372/AOO20200408
6. *Chesnokova T.Yu., Chentsov A.V., Rokotyay N.V. et al.* // J. Mol. Spectrosc. 2016. V. 327. P. 171–179. DOI: 10.1016/j.jms.2016.07.001
7. *Chesnokova T.Yu., Makarova M.V., Chentsov A.V. et al.* // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2020. V. 254. 107187.
8. *Rothman L.S., Gordon, I.E., Barbe A. et al.* // Ibid. 2009. V. 110. P. 533–572.
9. *Rothman L.S., Gordon I.E., Babikov Y. et al.* // Ibid. 2013. V. 130. P. 4–50.
10. *Gordon I.E., Rothman L.S., Hill C. et al.* // Ibid. 2017. V. 203. P. 3–69.
11. *Gordon I.E., Rothman, L.S., Hargreaves, R.J. et al.* // Ibid. 2022. V. 277(10794). P. 1.
12. *Jacquinet-Husson N., Armante R., Scott N.A. et al.* // J. Mol. Spectrosc. 2016. V. 327. P. 31.
13. *Delahaye T., Armante R., Scott N.A. et al.* // J. Mol. Spectrosc. 2021. V. 380. P. 111510. https://doi.org/10.1016/j.jms.2021.111510
14. *Toon G.C.* ATM compilations from Geoffrey Toon (JPL). http://mark4sun.jpl.nasa.gov/toon/linelist/linelist.htm
15. *Toon G.C., Blavier J.F., Sung K. et al.* // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf. 2016. V. 182. P. 324. https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2016.05.021
16. *Nikitin A.V., Lyulin O.M., Mikhailenko S.N. et al.* // Ibid. 2015. V. 154. P. 63. https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2014.12.003
17. *Birk M., Wagner G., Loos J. et al.* ESA SEOM–IAS – spectroscopic parameters database 2.3 μm region // Technical Report. Scientific Exploitation of Operational Missions – Improved Atmospheric Spectroscopy Databases; 2017. https://doi.org/105281/zenodo1009126
18. *Nikitin A., Rodina A., Thomas X. et al.* // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2020. V. 253. P. 107061. https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2020.107061

19. *Predoi-Cross A., Brawley-Tremblay M., Brown L.R. et al.* // J. Mol. Spectrosc. 2006. V. 236. № 2. P. 201. <https://doi.org/10.1016/j.jms.2006.01.013>
20. *Devi V., Benner D.C., Sung K. et al.* // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf. 2016. V. 177. P. 152. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2015.12.009>
21. *Mitsel A.A., Ptashnik I.V., Firsov K.M. et al.* // Atmospheric and Oceanic Optics. 1995. V. 8. № 10. P. 847.
22. *Anderson G., Clough S., Kneizys F. et al.* AFGL Atmospheric Constituent Profiles (0–120 km). Air Force Geophysics Laboratory. AFGL-TR-86-0110. Environmental Research Paper. Hanscom AFB: MA 01736. 1986. № 954. 25 p.
23. *Gribanov K., Jouzel J., Bostikov V. et al.* // Atmos. Chem. Phys. 2014. V. 14. P. 5943. <https://doi.org/10.5194/acp-14-5943-2014>
24. *Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R. et al.* The NCEP/NCAR40-year reanalysis project // B. Am. Meteorol. Soc. 1996. V. 77. P. 437. <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/reanalysis/>
25. *Palm M.* Theoretical background SFIT4 / Sfit4 Error Analysis Workshop. 2013.
26. *Palm M.* Theoretical background SFIT4 / Sfit4 Error Analysis Workshop. 2013.
27. *Rinsland C.P., Jones N.B., Connor B.J. et al.* // J. Geophysical Research. 1998. V. 103. P. 28197. <https://doi.org/10.1029/98JD02515>
28. *Armante R., Scott N., Crevoisier C. et al.* // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf. 2016. V. 327. P. 180.
29. *Rodgers C.D.* Inverse Methods for Atmospheric Sounding: Theory and Practice / World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2000.
30. <https://airs.jpl.nasa.gov/>
31. <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/>