

УДК 535.34

Параметры линий поглощения CH_4 , уширенных давлением атмосферного воздуха, в области 2300 нм

Т.М. Петрова[✉], А.М. Солодов, А.А. Солодов,
В.М. Дейчули, Т.Ю. Чеснокова*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зueva, 1*

Поступила в редакцию 06.02.2024;
после доработки 10.04.2024;
принята к печати 04.06.2024

Метан относится к важным парниковым газам, концентрация которых увеличивается в последние десятилетия, что приводит к росту температуры поверхности Земли. Для мониторинга содержания метана в атмосфере необходимы точные знания спектра поглощения молекулы CH_4 . В настоящей работе в спектральной области 4345–4360 cm^{-1} представлены параметры линий поглощения метана, уширенных давлением атмосферного воздуха. Данные получены из спектров, зарегистрированных на Фурье-спектрометре Bruker IFS 125HR при комнатной температуре со спектральным разрешением 0,005–0,01 cm^{-1} для пяти значений давления буферного газа. Проведено моделирование атмосферного пропускания с использованием наших результатов и параметров линий, представленных в спектроскопических базах данных HITRAN и GEISA. Сравнение с измеренными атмосферными солнечными спектрами показало, что определенные в настоящей работе параметры линий поглощения CH_4 дают лучший результат по среднеквадратичному отклонению. Полученные данные могут быть использованы для мониторинга содержания метана в атмосфере Земли.

Ключевые слова: метан, линии поглощения, атмосферное пропускание, спектроскопические базы данных; methane, absorption lines, atmospheric transmission, spectroscopic databases.

Введение

Метан наряду с углекислым газом и водяным паром является важным парниковым газом в атмосфере Земли [1]. Он обнаружен в атмосферах таких планет Солнечной системы, как Сатурн [2] и Юпитер [3]. В последние десятилетия наблюдается значительный рост концентрации метана в атмосфере Земли [1]. Информация о параметрах линий поглощения метана, включая интенсивности и положения центров линий поглощения, а также коэффициенты уширения, требуется во многих спектроскопических приложениях, связанных с дистанционным зондированием атмосферы Земли и других планет, а также для расчета радиационного баланса, необходимого для моделирования климатических изменений. Важность исследований спектров поглощения метана обусловлена необходимостью повышения точности моделирования радиационного переноса в атмосфере.

Экспериментальным исследованиям спектров поглощения метана посвящено большое количество работ, обзор которых можно найти в [4, 5]. Новая версия спектроскопической базы данных HITRAN2020 [4] содержит в основном такую же информацию по линиям поглощения CH_4 в диапазоне 4315–4600 cm^{-1} , что и предыдущая версия HITRAN2016, но с небольшими изменениями по коэффициентам уширения линий. В базе данных HITRAN2020 значения положений центров и интенсивностей взяты из работы [6], коэффициенты самоуширения и сдвига линий поглощения, индуцированных давлением атмосферного воздуха, — из [7], коэффициенты уширения — из [8]. В статье [4] отмечено, что моделирование спектров пропускания с данными из HITRAN2020 привело к уменьшению различия между экспериментально измеренными спектрами по сравнению с вычислениями с использованием HITRAN2016. Однако остаются расхождения, которые могут привести к погрешности моделирования радиационного переноса при дистанционном зондировании газового состава атмосферы. В последней версии GEISA [5] параметры линий поглощения метана в исследуемой области получены на основе теоретических [9] и экспериментальных данных [8].

* Татьяна Михайловна Петрова (tanja@iao.ru); Александр Михайлович Солодов (solodov@iao.ru); Александр Александрович Солодов (asolodov@iao.ru); Владимир Михайлович Дейчули (dvm91@yandex.ru); Татьяна Юрьевна Чеснокова (ches@iao.ru).

Полоса поглощения CH_4 в области около 2,3 мкм (4347 см^{-1}) используется для оценки содержания метана в атмосфере дистанционными методами, например в измерениях спутникового радиометра MORITT [10]. Неопределенности в параметрах линий поглощения CH_4 в этой спектральной области могут приводить к погрешности определения общего содержания метана. Так, различие в параметрах линий поглощения CH_4 в спектроскопических базах данных и теоретическом банке линий STDS дает расхождения до 7% в результатах определения общего содержания метана в столбе атмосферы из спектров солнечного излучения, измеренных на наземном Фурье-спектрометре в диапазоне $4350\text{--}4500 \text{ см}^{-1}$ [11].

Цель настоящей работы – получение новых значений параметров линий поглощения метана, уширенных давлением атмосферного воздуха, в области 2300 нм, которые могут быть использованы для мониторинга его содержания в атмосфере Земли. В нашей работе экспериментально определены параметры линий поглощения CH_4 в спектральной области $4345\text{--}4360 \text{ см}^{-1}$ и осуществлен расчет пропускания атмосферы с полученными параметрами. Проведено сравнение спектров пропускания, вычисленных с нашими параметрами и параметрами линий CH_4 из последних версий баз данных HITRAN2020 и GEISA2020, а также с измеренными атмосферными солнечными спектрами.

1. Эксперимент

Измерения спектров поглощения молекулы CH_4 , уширенных давлением атмосферного воздуха, были выполнены с помощью Фурье-спектрометра Bruker IFS 125HR (Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН). Более подробно прибор описан в работе [12]. Излучателем в спектрометре служил вольфрамовый источник света, излучение регистрировалось InSb-детектором, охлаждаемым жидким азотом. Использована многоходовая газовая кювета с базой 80 см, длина оптического пути – 320 см. Давление паров метана измерялось с помощью датчика MKS Baratron с паспортной погрешностью 0,25%, давление смесей « CH_4 – атмосферный воздух» – с помощью датчика давления DVR5 с погрешностью 0,001 атм. Давление буферного газа менялось от 0,097 до 0,492 атм. Все измерения проводились при температуре ~296 К и спектральном разрешении $0,005\text{--}0,01 \text{ см}^{-1}$. Разрешение выбиралось таким образом, чтобы оно было меньше, чем ширина линий поглощения метана для каждого давления буферного газа. Поскольку атмосферный воздух достаточно хорошо уширяет линии поглощения метана, то при давлении воздуха 0,492 атм можно использовать спектральное разрешение $0,01 \text{ см}^{-1}$. Диаметр апертуры интерферометра был установлен в соответствии с разрешением спектрометра и составлял 1,15 мм. Аподизация выполнена с помощью функции boxcar. Отношение сигнала

к шуму для поглощения, равного единице, составляло 2000. Все экспериментальные условия приведены в табл. 1.

Таблица 1

Условия регистрации спектров поглощения CH_4 , уширенных давлением атмосферного воздуха

Спектральное разрешение, см^{-1}	Давление CH_4 , атм	Давление воздуха, атм	Длина пути, см	Температура, К
0,005	0,0017	0,097	320	296,1
0,007	0,0020	0,197	320	296,3
0,008	0,0021	0,296	320	296,4
0,010	0,0023	0,392	320	296,1
0,010	0,0024	0,492	320	296,2

2. Определение параметров спектральных линий

Для первичной обработки спектров (получения спектров поглощения метана) использовался пакет программ OPUS 6.5 (<https://www.bruker.com/products/infrared-near-infrared-and-ramanspectroscopy/opus-spectroscopy-software.html>). Параметры линий поглощения определялись с помощью двух моделей формы контура: традиционного контура Фойгта и квадратичного профиля Фойгта, учитывающего зависимость уширения и сдвига от скоростей сталкивающихся молекул (qSDV). Для определения параметров линий применялась процедура одновременной обработки спектров, зарегистрированных при разных экспериментальных условиях, с помощью нелинейного метода наименьших квадратов. Для обработки спектр делился на участки шириной $0,5\text{--}1,0 \text{ см}^{-1}$, выбор которой зависел от плотности линий поглощения в нем. Параметры линий поглощения вычислялись с помощью qSDV-профиля по достаточно простому алгоритму [13, 14]. Доплеровская полуширина рассчитывалась для каждой линии. В качестве начального приближения использовались параметры, приведенные в базе данных HITRAN2020. Поскольку давление метана менялось в небольших пределах, то самоуширение не варьировалось и приравнивалось к значениям из HITRAN2020.

Пример аппроксимации для одной из исследованных линий поглощения молекулы CH_4 представлен на рис. 1. Нижняя панель показывает разность между экспериментальным и рассчитанным спектрами: она более чем на два порядка меньше, чем коэффициенты поглощения.

В спектральной области $4345\text{--}4360 \text{ см}^{-1}$ были определены параметры наиболее сильных линий поглощения метана: положение центра (ν), интенсивность (S), коэффициенты уширения давлением воздуха (γ_{air}), коэффициент сдвига (δ) и параметр, характеризующий зависимость уширения от скорости сталкивающихся молекул (γ^2). В ряде случаев параметр γ^2 плохо определялся, его значение было

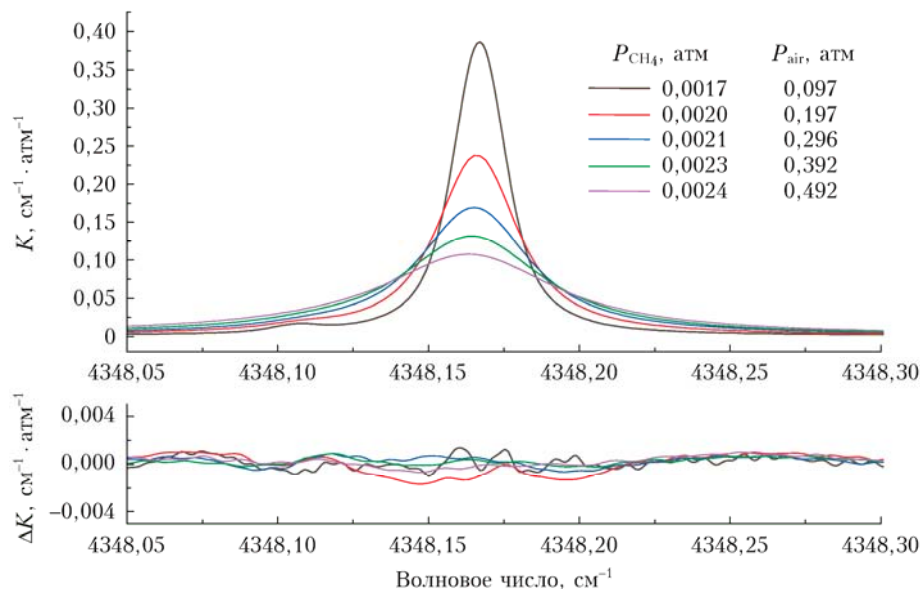


Рис. 1. Спектры поглощения CH_4 в области $4348\text{--}4348,3\text{ см}^{-1}$, уширенные давлением атмосферного воздуха (см. цв. рисунки на сайте <http://iao.ru/ru/content/vol.37-2024/iss.08>)

недостовверным, и тогда он приравнивался к нулю. В табл. 2 приведен пример полученных параметров (более полная информация представлена в приложении). Для того чтобы с высокой точностью вычислить параметры линий поглощения, необходимо учитывать близкорасположенные линии меньшей интенсивности. Поскольку мы рассматривали линии с $S = 1 \cdot 10^{-21}\text{--}10^{-22}\text{ см}^2/\text{молек.}$, то учитывались слабые линии с $S > 1 \cdot 10^{-24}\text{ см}^2/\text{молек.}$, параметры которых не варьировались и были взяты из [4]. При расчетах было обнаружено, что центры линий поглощения метана, полученные нами и представленные в HITRAN2020, не различаются в пределах погрешности измерений.

Детальный анализ погрешностей определения параметров линий поглощения, зарегистрированных

методом Фурье-спектроскопии, проведен во многих работах, в том числе и наших [15, 16]. Эти погрешности зависят от погрешностей измерения давления, температуры, оптической длины и ошибок, возникающих при подгонке контура спектральной линии. Поскольку спектр поглощения метана достаточно плотный, линии расположены близко друг к другу и в ряде случаев под одним контуром может находиться несколько линий, то ошибка, возникающая при аппроксимации линии, может быть достаточно большой и ее вклад в общую погрешность максимальным.

На рис. 2 и 3 представлены полученные интенсивности и коэффициенты уширения наиболее сильных линий поглощения метана в исследуемой спектральной области в сравнении с данными из [4].

Таблица 2
Параметры линий поглощения метана в области $4353,8\text{--}4354,4\text{ см}^{-1}$

$\nu_{\text{HITRAN}}, \text{ см}^{-1}$	$S, \text{ см}^2/\text{молек.}$	$\gamma_{\text{self}}, \text{ см}^{-1} \cdot \text{атм}^{-1}$	$\gamma_{\text{air}}, \text{ см}^{-1} \cdot \text{атм}^{-1}$	$\gamma^2, \text{ см}^{-1} \cdot \text{атм}^{-1}$	$\delta, \text{ см}^{-1} \cdot \text{атм}^{-1}$
4353,89463	1,473E-24	0,065	0,047	0	–0,0087
4353,90577	1,435E-24	0,065	0,047	0	–0,0087
4353,92401	1,759E-24	0,063	0,047	0	–0,0087
4353,993920	5,653E-24	0,0642	0,07	0	–0,0087
4353,99913	3,709E-22(59)	0,071	0,0568(10)	0	–0,0077(6)
4354,02605	1,290E-22(19)	0,076	0,0544(15)	0	0,0091(7)
4354,043966	3,530E-23(51)	0,08	0,0916(12)	0	0,0024(5)
4354,063571	9,666E-23	0,074	0,0643	0	–0,0087
4354,064050	9,900E-23(50)	0,087	0,0643(5)	0	–0,0003(4)
4354,215735	1,752E-22(34)	0,075	0,0596(10)	0	–0,0043(5)
4354,219616	2,694E-22(35)	0,076	0,0666(16)	0	–0,0091(6)
4354,327827	1,387E-22(15)	0,076	0,0587(13)	0	–0,0045(6)
4354,331425	7,929E-24	0,063	0,047	0	–0,0087
4354,345422	6,930E-24	0,065	0,048	0	–0,0087

Примечание. Параметры, для которых не приведены погрешности измерений, взяты из базы данных HITRAN2020.

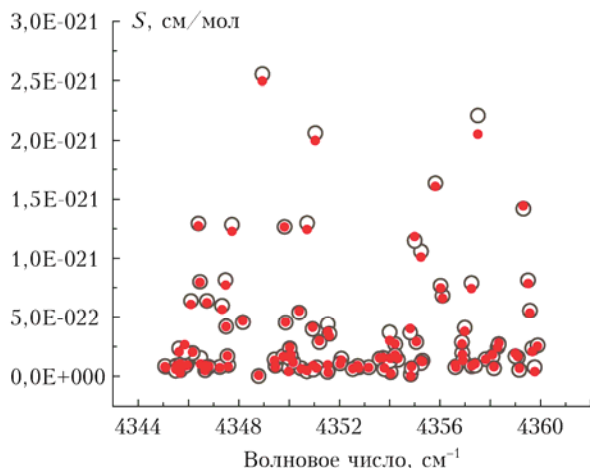


Рис. 2. Интенсивности линий поглощения метана, полученные в настоящей работе (○) и представленные в HITRAN2020 (●)

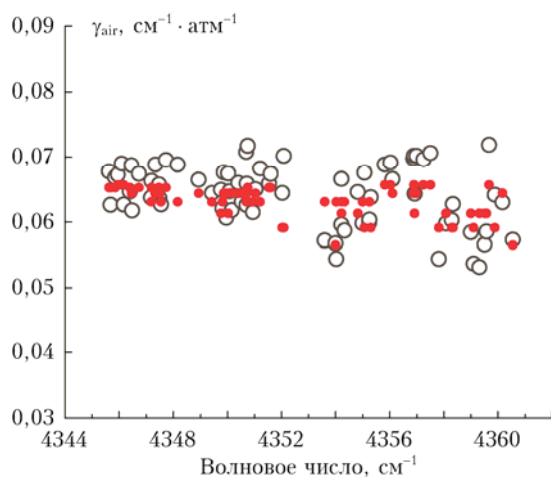


Рис. 3. Коэффициенты уширения линий поглощения метана, полученные в настоящей работе (○) и представленных в HITRAN2020 (●)

Видно, что интенсивности в среднем отличаются на 3%, а коэффициенты уширения на 2%:
 $\langle S_{\text{наст. работа}} / S_{\text{HITRAN}} \rangle = 1,03 \pm 0,05$ и $\langle \gamma_{\text{наст. работа}} / \gamma_{\text{HITRAN}} \rangle = 1,02 \pm 0,03$.

3. Моделирование пропускания атмосферы

Для валидации параметров линий поглощения CH_4 было проведено моделирование атмосферных спектров поглощения солнечного излучения и их сравнение с солнечными спектрами, зарегистрированными с помощью наземного Фурье-спектрометра в Коуровской астрономической обсерватории [17]. Моделирование осуществлялось с использованием полученных нами параметров линий поглощения CH_4 и взятых из HITRAN2020 и GEISA2020. В расчетах менялись только параметры линий CH_4 , а параметры линий других поглощающих газов оставались неизменными и брались из HITRAN2020. Слабые линии водяного пара находятся в рассмат-

риваемом спектральном диапазоне и могут влиять на определение концентрации метана в атмосфере. Высотные профили температуры, давления и концентрации поглощающих газов были взяты из реанализа NCEP/NCAR [18, 19] и дополнены локальными данными о температуре, влажности и давлении во время измерений в Коуровке. Одновременно определялось общее содержание CH_4 и H_2O в столбе атмосферы при помощи программы SFIT4 [20], следовательно, исходные профили концентраций этих газов корректировались в расчетах в прямой задаче при моделировании атмосферных спектров. Спектры вычислялись с контуром Фойгта с разрешением $0,02 \text{ cm}^{-1}$.

На рис. 4 приведены измеренный атмосферный солнечный спектр и результаты сравнения модельных спектров с атмосферными измерениями. В диапазоне $4345\text{--}4360 \text{ cm}^{-1}$ моделирование с нашими новыми значениями параметров линий поглощения CH_4 показывает хорошее согласие с атмосферными измерениями, а для некоторых отдельных линий CH_4 отличие измеренного солнечного спектра

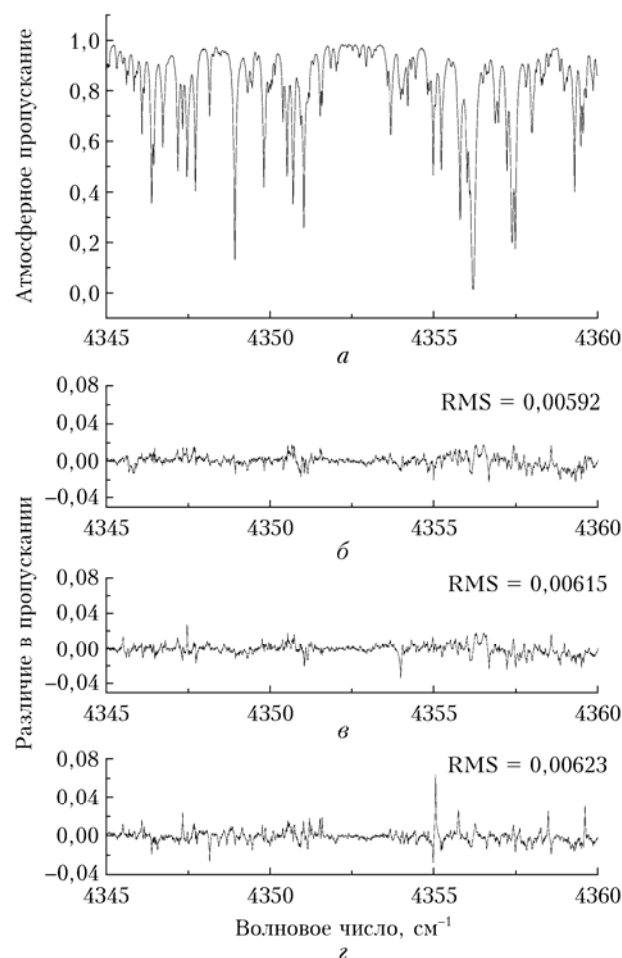


Рис. 4. Атмосферный солнечный спектр, измеренный на наземном Фурье-спектрометре в Коуровке 29.05.2015 г. (а), и различия между измеренным спектром и спектрами, вычисленными с параметрами линий поглощения CH_4 (IAO CH_4), полученными в данной работе (б) и взятыми из HITRAN2020 (в) и GEISA2020 (г)

от результатов моделирования с нашими параметрами меньше, чем от результатов моделирования с параметрами из HITRAN2020 и GEISA2020: наименьшее значение $RMS = 0,00592$ получено для наших параметров линий поглощения CH_4 ; для HITRAN2020 и GEISA2020 $RMS = 0,00615$ и $0,00623$ соответственно. Наши параметры линий CH_4 позволили улучшить согласие между модельными спектрами и атмосферными измерениями. Оставшееся небольшое различие можно частично объяснить недостаточно точным учетом атмосферного поглощения водяным паром, линии поглощения которого присутствуют в диапазоне $4345–4360\text{ см}^{-1}$.

Моделирование атмосферных спектров и сравнение их с атмосферным солнечным спектром было сделано и для других дней наблюдений. Получены аналогичные результаты.

Заключение

Зарегистрированы спектры поглощения метана в области 2300 нм на Фурье-спектрометре Bruker IFS 125HR и определены параметры уширенных давлением атмосферного воздуха линий поглощения CH_4 с помощью контура Фойгта и модифицированного профиля Фойгта, учитывающего зависимость уширения от скоростей сталкивающихся молекул.

Проведено моделирование атмосферного пропускания солнечного излучения с использованием найденных нами параметров линий поглощения CH_4 и данных из HITRAN2020 и GEISA2020. Сравнение модельных спектров с измеренными атмосферными солнечными спектрами показало хорошее согласие с результатами моделирования с нашими данными: среднеквадратичное отклонение измеренных спектров от модельных было наименьшим по сравнению с результатами моделирования с параметрами из вышеперечисленных баз данных.

Финансирование. Исследования выполнены при финансовой поддержке РНФ (грант № 22-77-00062).

Список литературы

1. 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 / V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, B. Zhou (eds.). Cambridge: Cambridge University Press, 2021. DOI: 10.1017/9781009157896.
2. The Encyclopedia of the Solar System, Third Edition / T. Spohn, D. Breuer, T.V. Johnson (eds.). Amsterdam: Elsevier, 2014. DOI: 10.1016/C2010-0-67309-3.
3. Sánchez-López A., López-Puertas M., García-Comas M., Funke B., Fouchet T., Snellen I.A.G. The CH_4 abundance in Jupiter's upper atmosphere // *Astron. Astrophys.* 2022. V. 662. A91. DOI: 10.1051/0004-6361/202141933.
4. Gordon I.E., Rothman L.S., Hargreaves R.J., Hasemi R., Karlovets E.V., Skinner F.M., Conway E.K.,

- Hill C., Kochanov R.V., Tan Y., Wcislo P., Finenko A.A., Nelson K., Bernath P.F., Birk M., Boudon V., Campargue A., Chance K.V., Coustenis A., Drouin B.J., Flaud J.-M., Gamache R.R., Hodges J.T., Jacquemart D., Mlawer E.J., Nikitin A.V., Perevalov V.I., Rotger M., Tennyson J., Toon G.C., Tran H., Tyuterev V.G., Adkins E.M., Baker A., Barbe A., Canè E., Császár A.G., Dudaryonok A., Egorov O., Fleisher A.J., Fleurbaey H., Foltynowicz A., Furtenbacher T., Harrison J.J., Hartmann J.-M., Horneman V.-M., Huang X., Karman T., Karns J., Kassi S., Kleiner I., Kofman V., Kwabia-Tchana F.M., Laoutenteva N.N., Lee T.J., Long D.A., Lukashetskaya A.A., Lyulin O.M., Makhnev V.Yu., Matt W., Massie S.T., Melosso M., Mikhailenko S.N., Mondelain D., Müller H.S.P., Naumenko O.V., Perrin A., Polyansky P.L., Raddaoui E., Raston P.L., Reed Z.D., Rey M., Richard C., Tóbiás R., Sadiek I., Schwenke D.W., Starikova E., Sung K., Tamassia F., Tashkun S.A., Auwera J. Vander, Vasilenko I.A., Vidasin A.A., Villanueva G.L., Vispoel B., Wagner G., Yachmenev A., Yurchenko S.N. The HITRAN2020 molecular spectroscopic database. // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* 2022. V. 277. P. 107949. DOI: 10.1016/j.jqsrt.2021.107949.
5. Delahaye T., Armante R., Scott N.A., Jacquinet-Huson N., Chédin A., Crépeau L., Crevoisier C., Douet V., Perrin A., Barbe A., Boudon V., Campargue A., Couderc L.H., Ebert V., Flaud J.-M., Gamache R.R., Jacquemart D., Jolly A., Kwabia-Tchana F., Kyuberis A., Li G., Lyulin O.M., Manceron L., Mikhailenko S., Moazzen-Ahmadi N., Müller H.S.P., Naumenko O.V., Nikitin A., Perevalov V.I., Richard C., Starikova E., Tashkun S.A., Tyuterev V.I.G., Vander Auwera J., Vispoel B., Yachmenev A., Yurchenko S. The 2020 edition of the GEISA spectroscopic database // *J. Mol. Spectrosc.* 2021. V. 380. P. 111510. DOI: 10.1016/j.jms.2021.111510.
 6. Daumont L., Nikitin A.V., Thomas X., Regalia L., Von der Heyden P., Tyuterev V.I.G., Rey M., Boudon V., Wenger C., Loete M., Brown L.R. New assignments in the $2\text{ }\mu\text{m}$ transparency window of the $^{12}CH_4$ octad band system // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* 2013. V. 116. P. 101–109. DOI: 10.1016/j.jqsrt.2012.08.025.
 7. Brown L.R., Chris Benner D., Champion J.-P., Malathy Devi V., Fejard I., Gamache R.R., Gabard T., Hilico C., Lavorel B., Loete M., Mellau G.Ch., Nikitin A., Pine A.S., Predoi-Cross A., Rinsland C.P., Robert O., Sams R.L., Smith M.A.H., Tashkun S.A., Tyuterev V.I.G. Methane line parameters in HITRAN // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* 2003. V. 82. P. 219–238. DOI: 10.1016/S0022-4073(03)00155-9.
 8. Predoi-Cross A., Brawley-Tremblay M., Brown L.R., Malathy Devi V., Chris Benner D. Multispectrum analysis of $^{12}CH_4$ from 4100 to 4635 cm^{-1} : II Air-broadening coefficients (widths and shift) // *J. Mol. Spectrosc.* 2006. V. 236. P. 201–215. DOI: 10.1016/j.jms.2006.01.013.
 9. Albert S., Bauerecker A., Boudon V., Brown L.R., Champion J.P., Loete M., Nikitin A., Quack M. Global frequency and intensity analysis of $^{12}CH_4$ in the $0–4800\text{ cm}^{-1}$ region // *Chem. Phys.* 2009. V. 356. P. 131–146. DOI: 10.1016/j.chemphys.2008.10.019.
 10. Pan L., Edwards D.P., Gille J.C., Smith M.W., Drummond J.R. Satellite remote sensing of tropospheric CO and CH_4 : Forward model studies of the MOPITT instrument // *Appl. Opt.* 1995. V. 34, N 30. P. 6976–6988. DOI: 10.1364/AO.34.006976.
 11. Chesnokova T.Yu., Boudon V., Gabard T., Gribanov K.G., Firsov K.M., Zakharov V.I. Near-infrared

- radiative transfer modeling with different CH₄ spectroscopic databases to retrieve atmospheric methane total amount // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*. 2011. V. 112. P. 2676–2682. DOI: 10.1016/j.jqsrt.2011.08.005.
12. Deichuli V.M., Petrova T.M., Solodov A.M., Solodov A.A., Starikov V.I. Measurements of air-broadening parameters of water vapour transitions in the 5090–7490 cm⁻¹ spectral region // *Mol. Phys.* 2023. V. 121. P. 5–15. DOI: 10.1080/00268976.2023.2216133.
 13. Ngo N.H., Lisak D., Tran H., Hartmann J.-M. An isolated line-shape model to go beyond the Voigt profile in spectroscopic databases and radiative transfer codes // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*. 2013. V. 129. P. 89–100. DOI: 10.1016/j.jqsrt.2013.05.034.
 14. Tran H., Ngo N.H., Hartmann J.-M. Efficient computation of some speed-dependent isolated line profiles // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*. 2013. V. 129. P. 199–203. DOI: 10.1016/j.jqsrt.2013.06.015.
 15. Loos J., Birk M., Wagner G. Measurement of positions, intensities and self-broadening lineshape parameters of H₂O lines in the spectral ranges 1850–2280 cm⁻¹ and 2390–4000 cm⁻¹ // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*. 2017. V. 203. P. 119–132. DOI: 10.1016/j.jqsrt.2017.02.013.
 16. Deichuli V.M., Petrova T.M., Solodov A.M., Solodov A.A., Fedorova A.A. Water vapor absorption line parameters in the 6760–7430 cm⁻¹ region for application to CO₂-rich planetary atmosphere // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*. 2022. V. 293. P. 108386. DOI: 10.1016/j.jqsrt.2023.108850.
 17. Gribanov K., Jouzel J., Bastrikov V., Bonne J.-L., Breon F.-M., Butzin M., Cattani O., Masson-Delmotte V., Rokotyan N., Werner M., Zakharov V. Developing a western Siberia reference site for tropospheric water vapour isotopologue observations obtained by different techniques (*in situ* and remote sensing) // *Atmos. Chem. Phys.* 2014. V. 14. P. 5943–5957. DOI: 10.5194/acp-14-5943-2014.
 18. The NCEP/NCAR Reanalysis Project. Boulder: Physical Sciences Laboratory, 2024. URL: <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/reanalysis/> (last access: 05.02.2024).
 19. Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., Collins W., Deaven D., Gandin L., Iredel M., Saha S., White G., Woollen J., Zhu Y., Leetma A., Reynolds B., Chelliah M., Ebisuzaki W., Higgins W., Janowiak J., Mo K.C., Ropelewski C., Wang J., Jenne R., Joseph D. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project // *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 1996. V. 77. P. 437–472. DOI: 10.1175/1520-0477.
 20. Hase F., Hannigan J.W., Coffey M.T., Goldman A., Höpfner M., Jones N.B., Rinsland C.P., Wood S.W. Intercomparison of retrieval codes used for the analysis of high-resolution, ground-based FTIR measurements // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*. 2004. V. 87. P. 25–52. DOI: 10.1016/j.jqsrt.2003.12.008.

T.M. Petrova, A.M. Solodov, A.A. Solodov, V.M. Deichuli, T.Yu. Chesnokova. Parameters of CH₄ absorption lines broadened by atmospheric air pressure in the 2300 nm region.

Methane is one of key greenhouse gases, whose concentration has been increasing in recent decades. This leads to an increase in the temperature of the Earth's surface. To monitor the methane content in the atmosphere the accurate knowledge of the absorption spectrum of CH₄ molecule is required. In this work, the parameters of methane absorption lines broadened by atmospheric air pressure are presented in the spectral region 4345–4360 cm⁻¹. Data were obtained from spectra recorded at a Bruker IFS 125HR Fourier spectrometer with a spectral resolution of 0.005–0.01 cm⁻¹ at room temperature and five values of buffer gas pressure. Atmospheric transmission was simulated using the obtained results and the line parameters from HITRAN and GEISA spectroscopic databases. The comparison with measured atmospheric solar spectra shows that the use of the CH₄ absorption line parameters obtained in this work gives the best result in terms of root-mean-square deviation.