

## Новая спектроскопическая база HITRAN-2016 в полинейных моделях, применяемых в дистанционном зондировании Земли методами инфракрасной спектроскопии

Б. А. Фомин, Г. Э. Колокутин

*Центральная аэрологическая обсерватория, Долгопрудный 141700, Россия  
E-mail: b.fomin@mail.ru*

Новая спектроскопическая база HITRAN-2016 является результатом обновления базы HITRAN-2012. В ней представлены уточнённые параметры для расчёта фойгтовских контуров спектральных линий в полинейных (line-by-line) моделях атмосферной радиации. Дополнительно для молекул  $H_2O$ ,  $N_2O$ ,  $CO$ ,  $O_2$ ,  $HF$ ,  $HCl$  и  $H_2$  представлены данные для расчёта контуров линий по теории Хартманна–Трана. В статье рассматриваются изменения в полинейных расчётах спектров ИК-радиации при замене базы HITRAN-2012 на базу HITRAN-2016, а также контура Фойгта на контур Хартманна–Трана. Результаты работы могут быть использованы для принятия решений о целесообразности такой замены в полинейных моделях дистанционного зондирования атмосфер Земли и планет методами инфракрасной спектроскопии.

**Ключевые слова:** уходящая радиация, инфракрасные спектры, line-by-line расчёты, спектроскопические базы данных, контуры линий

Одобрена к печати: 30.01.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-1-17-24

### Введение

Новая спектроскопическая база HITRAN-2016 (Gordon et al., 2017) свободно распространяется через интернет ([www.hitran.org](http://www.hitran.org)). Фактически это обновлённая версия базы HITRAN-2012 (Rothman et al., 2013), которая в настоящее время широко используется при решении «прямых» задач атмосферной оптики с помощью полинейных (line-by-line) моделей. Подобное обновление базы HITRAN проводится примерно каждые четыре года (начиная с 70-х гг. XX в.) с целью увеличения точности этих моделей путём уточнения параметров спектральных линий (интенсивностей, положений, полуширин и т. п.). Для оценки желаемого увеличения точности параллельно исследуются изменения в полинейных расчётах спектров атмосферной радиации при замене версий базы.

Такое исследование изменений в полинейных расчётах спектров яркостной температуры уходящего теплового излучения проводилось в работе (Колокутин, Фомин, 2014) для HITRAN-2008 и HITRAN-2012. В этом исследовании, в частности, отмечалось, что «для повышения точности обработки результатов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) уточнение моделей контуров линий, интерференции линий и т. п. в настоящее время представляется более актуальным, чем переход на новые спектральные базы» при использовании только фойгтовских контуров линий. Здесь важно отметить, что в базе HITRAN-2016 появились данные для расчёта контура линий по модели Хартманна–Трана (Ngo et al., 2013) (для молекул  $H_2O$ ,  $N_2O$ ,  $CO$ ,  $O_2$ ,  $HF$ ,  $HCl$  и  $H_2$ ). Для его задания требуется до семи параметров, а не три, как для фойгтовского (не считая интенсивности линии). Этот контур в центральной части представляется более точным, чем фойгтовский, но значительно сложнее. Поэтому его использование в моделях line-by-line представляется перспективным, но вызывает определённые трудности. Вычислительные эксперименты с этим контуром будут также рассмотрены в настоящей работе наряду с «тривиальным» уточнением параметров фойгтовских контуров.

Следует подчеркнуть, что увеличение точности моделей line-by-line особенно актуально в случае их использования в дистанционном зондировании атмосфер Земли (ДЗЗ) и планет

методами инфракрасной спектromетрии (Колокутин, Фомин, 2014). Однако замена в моделях line-by-line версий базы требует определённых трудозатрат. Причём переход на новую базу и в особенности на контур линии Хартманна – Трана более трудоёмок, чем ранее. Эти трудозатраты, очевидно, будут целесообразны лишь в конкретных случаях при значимом изменении расчётных величин. Поэтому исследование таких изменений в расчётных спектрах является целью данной работы, в том числе в помощь принятия решений о целесообразности замены базы HITRAN-2012 на базу HITRAN-2016, а также контура Фойгта на контур Хартманна – Трана при решении «прямых» задач дистанционного зондирования.

### Базы HITRAN-2016 и HITRAN-2012 в полинейных моделях атмосферной радиации

База HITRAN-2016 детально описана в работе её создателей (Gordon et al., 2017). Таблица 1 показывает отличия этой версии от двух предыдущих версий HITRAN в количестве представленных спектральных линий и границах их спектральных областей для семи наиболее важных атмосферных газов.

Таблица 1. Газы, количество линий для каждого газа и границы их спектральных областей в базах HITRAN-2008, HITRAN-2012 и HITRAN-2016

Молекула	База	Интервал, см <sup>-1</sup>	Сумма линий по всем изотопам
H <sub>2</sub> O	HITRAN-2008	0–25233	69201
	HITRAN-2012	0–25711	224515
	HITRAN-2016	0–25711	313787
CO <sub>2</sub>	HITRAN-2008	0–12785	314919
	HITRAN-2012	0–12785	471847
	HITRAN-2016	0–14076	559874
O <sub>3</sub>	HITRAN-2008	0–5787	409686
	HITRAN-2012	0–6997	422116
	HITRAN-2016	0–6997	449570
N <sub>2</sub> O	HITRAN-2008	0–7797	47843
	HITRAN-2012	0–7797	47843
	HITRAN-2016	0–7797	160287
CO	HITRAN-2008	3–8465	4477
	HITRAN-2012	3–8465	4606
	HITRAN-2016	3–14478	5381
CH <sub>4</sub>	HITRAN-2008	0–9200	290091
	HITRAN-2012	0–11502	468013
	HITRAN-2016	0–11502	450332
O <sub>2</sub>	HITRAN-2008	0–15928	6428
	HITRAN-2012	0–15928	13975
	HITRAN-2016	0–57028	14085

Как видно из табл. 1, последние изменения не менее существенны, чем при предыдущих обновлениях базы, и не сводятся к тривиальному добавлению слабых спектральных линий. Так, в таблице показано, что число линий метана, представленных в базе, даже уменьшилось. Полезно отметить, что уменьшилось и число линий основного изотопа водяного пара

(с 142045 до 140751). А увеличение общего числа линий водяного пара в основном произошло за счёт изотопа тяжёлой воды (с 13237 до 56430 линий) (Gordon et al., 2017).

Были уточнены параметры многих, даже довольно сильных, линий. Представление о характерных изменениях параметров даёт *табл. 2*, где рассматривается линия водяного пара с центром  $3628,346480 \text{ см}^{-1}$ . В качестве примера эта линия была выбрана практически случайно. Но аналогичные изменения параметров наблюдаются и для других спектральных линий, представленных в HITRAN-2012, HITRAN-2016 и HITRAN-2016(HT). Здесь HITRAN-2016(HT) представляет собой набор дополнительных файлов с данными для расчёта контуров по модели Хартманна – Трана. В них также приведены параметры лоренцевских полуширин  $\gamma$  и сдвигов  $\delta$ , которые несколько отличаются от величин той же базы, предназначенных для расчёта фойгтовских контуров.

*Таблица 2.* Параметры спектральной линии  $\text{H}_2\text{O}$  с центром  $3628,346480 \text{ см}^{-1}$  в базах HITRAN-2012, HITRAN-2016 и HITRAN-2016(HT): интенсивность  $S$  ( $\text{см}^{-1}/(\text{мол}\cdot\text{см}^{-2})$ ); полуширина  $\gamma$  ( $\text{см}^{-1}\cdot\text{атм}^{-1}$ ); сдвиг  $\delta$  ( $\text{см}^{-1}\cdot\text{атм}^{-1}$ ); температурная зависимость полуширины  $n$

Версия базы	$S^*E-19$	$\gamma$	$\delta$	$n$
HITRAN-2012	1,126	0,0861	-0,00230	0,67
HITRAN-2016	1,136	0,0904	-0,006439	0,77
HITRAN-2016(HT)	–	0,0916	-0,006680	–

Как видно из *табл. 2*, уточнения параметров интенсивности  $S$  ( $\text{см}^{-1}/(\text{мол}\cdot\text{см}^{-2})$ ), полуширины  $\gamma$  ( $\text{см}^{-1}\cdot\text{атм}^{-1}$ ) и сдвига  $\delta$  ( $\text{см}^{-1}\cdot\text{атм}^{-1}$ ) спектральных линий могут быть довольно существенными: примерно на 1 %, 5 % и даже в несколько раз соответственно.

Формула для расчёта контура Хартманна – Трана довольно громоздкая (Ngo et al., 2013) и вследствие этого не приводится в данной работе. В ней используется интеграл вероятности комплексного аргумента и до семи параметров (не считая интенсивности линии). Этот контур значительно сложнее для использования в моделях line-by-line, чем контур Фойгта, но зато универсален. Он приводится к контурам Доплера (гауссиану), Фойгта, Раутиана, «зависящему от скорости контура Фойгта» и «зависящему от скорости контура Раутиана» при отличии от нуля соответственно одного, трёх, четырёх, пяти и семи параметров (Тимофеев, 2016). Важно отметить, что в далёких крыльях линий все эти контуры, кроме доплеровского, совпадают с лоренцевским крылом.

Как изменяется расчётный контур выбранной спектральной линии в результате данных изменений в параметрах выбранной линии и моделях контура, показано на *рис. 1*. Расчёты проводились для давлений  $P = 1013; 281; 13,2$  и  $0,95$  мбар, характерных для высот 0, 10, 30 и 50 км соответственно (для стандартной модели атмосферы «лето в средних широтах»). В целях упрощения анализа результатов расчёта задавалась одна и та же температура  $T = 296 \text{ К}$  (стандартная для HITRAN). Полезно отметить, что доплеровская полуширина линии при этой температуре составляет  $0,00446 \text{ см}^{-1}$ .

Для *рис. 1а* (см. с. 20) в расчётах контура Фойгта и Хартманна – Трана использовались параметры только из HITRAN-2016(HT) (нижняя строка *табл. 2*). Таким образом, наблюдаемая разница определяется только моделью контура. Как видно, она достигает величины около 3 % вблизи центра линии. Похожие отклонения от контура Фойгта наблюдаются и для других газов (Тимофеев, 2016). Следует отметить, что разница исчезает на расстояниях нескольких полуширин, когда крыло линии становится практически лоренцевским.

Для *рис. 1б* в расчётах контура Фойгта использовались параметры из HITRAN-2016 (предпоследняя строка *табл. 2*). Как видно из этого рисунка, разница в контурах вблизи центра линии значительно меньше: порядка 1 %. Таким образом, в параметрах линий из HITRAN-2016 для расчёта контура по модели Фойгта в какой-то степени учитываются и нефойгтовские поправки. Однако теперь в соответствии с отношением лоренцевских полуширин перестают совпадать далёкие крылья линий (в соотношении  $0,0904/0,0916$  или на  $\sim 1,3$  %).

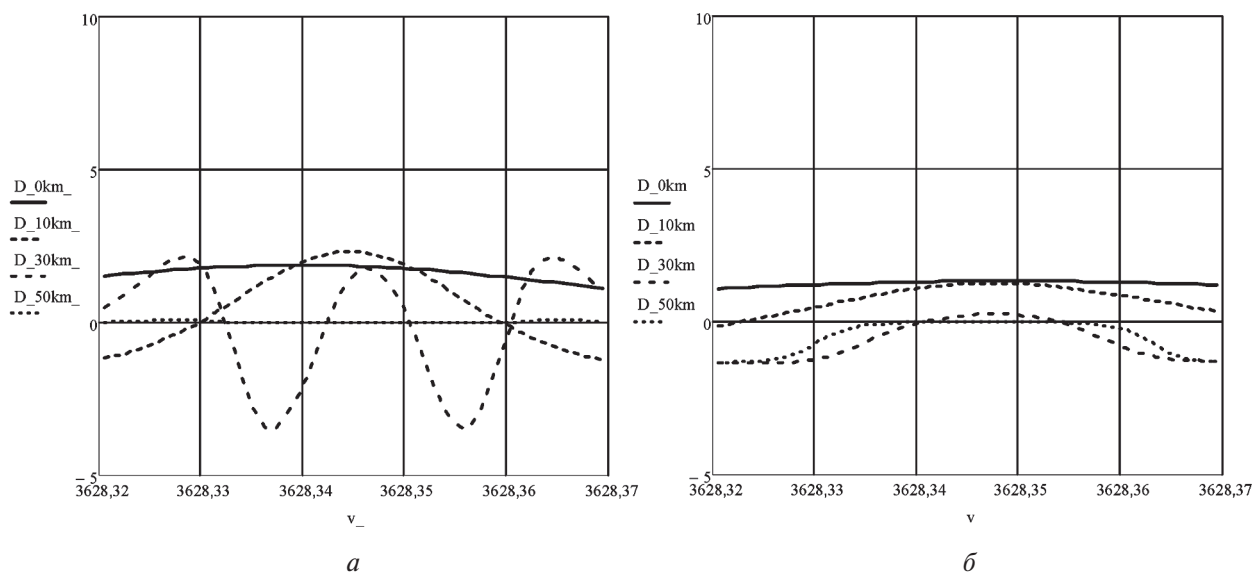


Рис. 1. Относительная разность (%) между контурами Фойгта и Хартманна–Трана для линии  $\text{H}_2\text{O}$  с центром  $3628,34648 \text{ см}^{-1}$ . В расчётах температура  $T = 296 \text{ К}$ , значения давления характерны для высот 0, 10, 30 и 50 км. Расчёты фойгтовских контуров выполнены с параметрами: *a* — из базы HITRAN-2016(HT); *б* — HITRAN-2016

На рис. 2 демонстрируется относительная разница в расчётах только контура Фойгта с параметрами предыдущей версии базы HITRAN-2012 и новой HITRAN-2016. Как видно из этого рисунка, «тривиальная» коррекция спектроскопической базы HITRAN приводит к большим изменениям (до ~10 %) в расчётах коэффициентов поглощения, чем переход на более сложный контур Хартманна – Трана.

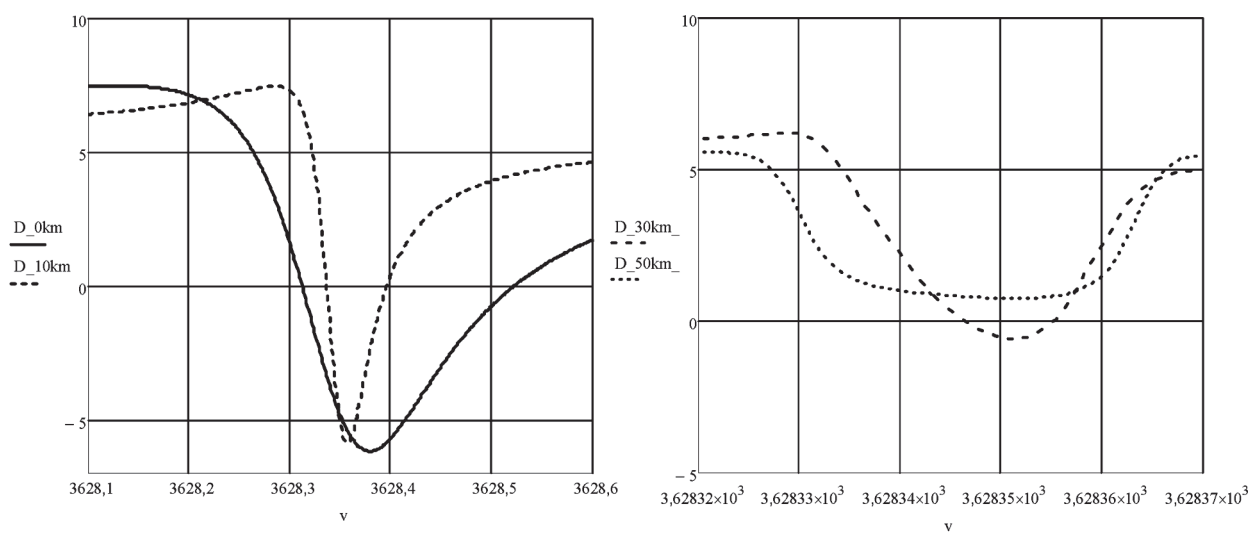
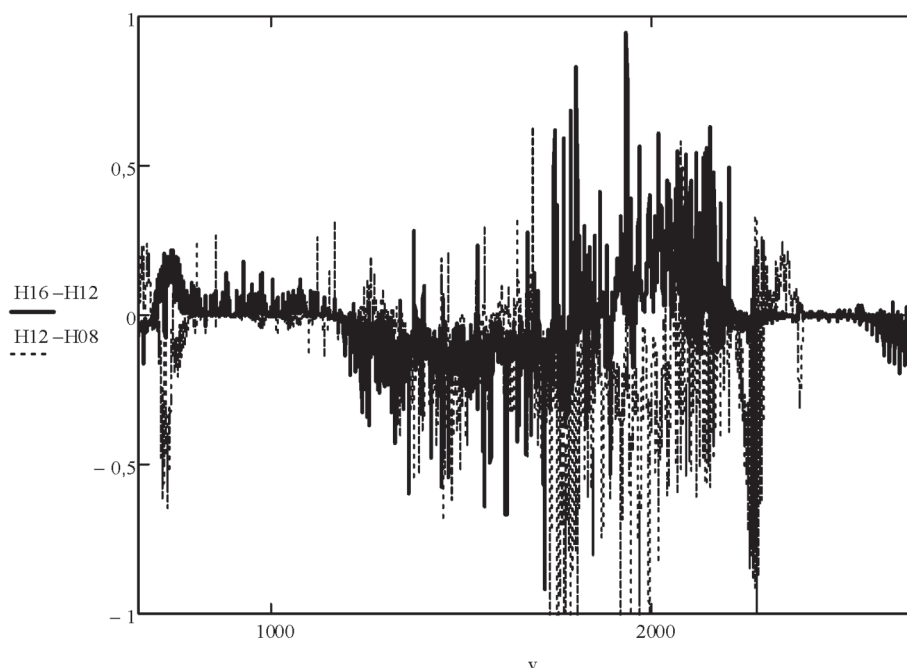


Рис. 2. Относительная разность (%) между контурами Фойгта для выбранной линии  $\text{H}_2\text{O}$ . Условия расчёта — как на рис. 1, но с параметрами из баз HITRAN-2012 и HITRAN-2016

Следует также отметить разницу в интенсивностях  $S$  и в температурной зависимости популяций  $n$  (см. табл. 1). Кроме того, стоит подчеркнуть, что новая база предлагает использовать уточнённые данные для учёта температурной зависимости интенсивности линий, а также уточнённую параметризацию (Gamache et al., 2017) статистических сумм для пересчёта интенсивностей на температуры, отличные от 296 К. Это также обуславливает изменения в line-by-line расчётах спектров коэффициента поглощения на уровне процента.

Приведённые вычисления коэффициентов поглощения позволяют составить представление об изменениях в полинейных расчётах спектров пропускания атмосферных слоёв при замене баз и моделей контура линий, т.е. в расчётах солнечного излучения, ослабления лазерного излучения и т.п. Но связь изменений в коэффициентах поглощения с тепловым излучением крайне нелинейная и требует дополнительного рассмотрения. Особый интерес представляет изучение таких изменений при моделировании спутниковых измерений сенсорами высокого спектрального разрешения типа IASI (MetOp-A, Европейское космическое агентство), ИКФС-2 (РФ) и т.п. Для этого, также как и в нашей предыдущей работе (Колокутин, Фомин, 2014), мы использовали данные тестирования сенсора IASI, полученные в ходе подспутникового эксперимента JAIVEx (The Joint Airborne IASI Validation Experiment, 2007). Конкретно был взят Case 504 (тогда спутник пролетал над океаном, зенитный угол спутника —  $20^\circ$ , температура поверхности — 298 К, а в момент измерения спектра был измерен (в  $\sim 200$  точках по вертикали) профиль газов  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$  и  $\text{N}_2\text{O}$  и т.д.). В расчётах, полученных с помощью оригинальной модели line-by-line (Fomin et al., 2005), учитывалась обычная аппаратная функция фурье-спектрометра для разности хода 1,5 см (разрешение  $\sim 0,5 \text{ см}^{-1}$ ). Следует отметить, что разность в расчётах и измерениях достигает четырёх и более градусов (в единицах яркостной температуры), хотя в основном составляет один-два градуса (Колокутин, Фомин, 2014). Но в данных методических расчётах специально использовался только фойгтовский контур линий с обрывом в  $25 \text{ см}^{-1}$  от центра, без эмпирических поправок в крыльях и учёта эффекта «интерференции» линий. Поэтому согласие между расчётами и измерениями может быть улучшено с применением современных моделей «интерференции линий», моделей континуального поглощения и т.п. Однако это выходит за рамки настоящего исследования, цель которого лишь прояснить влияние улучшений спектроскопических баз на точность line-by-line моделей в практических приложениях.

Для этого случая на *рис. 3* показаны разности в расчётах спектров с базами HITRAN-2008, HITRAN-2012 и HITRAN-2016. Сам спектр см. в работе (Колокутин, Фомин, 2014). Данный рисунок показывает, что переход от предыдущей базы HITRAN-2012 к HITRAN-2016 приводит к несколько меньшим изменениям в line-by-line расчётах спектров яркостной температуры, чем переход от HITRAN-2008 к HITRAN-2012 ( $\sim 0,5 \text{ К}$  против  $\sim 1 \text{ К}$ ). Однако соответствующие различия в расчётах всё ещё остаются заметными.



*Рис. 3.* Разности между расчётными спектрами яркостной температуры уходящего теплового излучения атмосферы, полученными с помощью баз HITRAN-2016, HITRAN-2012 и HITRAN-2008



## Заключение

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

1. Качество спектроскопической информации в базе HITRAN реально повышается от версии к версии, на что указывает улучшение согласия в line-by-line расчётах атмосферной радиации, выполненных с её помощью. Однако различия в расчётах ещё остаются заметными, причём они представляются большими, чем при замене в расчётах контура Фойгта на контур Хартманна–Грана. Таким образом, замена контура представляется менее актуальной, чем замена версии базы, хотя может быть и необходимой при исследованиях атмосферы Земли методом прозрачности (Тимофеев, 2016).
2. Использование базы HITRAN-16 вместо HITRAN-12 при решении «прямых» задач в обработке измерений сенсорами с разрешением  $\sim 0,5 \text{ см}^{-1}$  (ИКФС-2, IASI и т.п.), по-видимому, может увеличить точность расчётов до  $\sim 0,5 \text{ К}$  в спектрах яркостной температуры.
3. Применение HITRAN-16 по-прежнему не снимает «автоматически» проблему точности «прямых» моделей, применяемых в обработке экспериментальных спектров: различия в расчётах при применении различных версий базы в разы меньше наблюдающегося несогласия с экспериментальными данными и поэтому не могут его устранить (Колокутин, Фомин, 2014).

Как отмечалось, для улучшения согласия экспериментальных и расчётных спектров в моделях line-by-line необходимо учесть эффект «интерференции линий» (Тимофеев, 2016). Однако соответствующая информация для расчётов в HITRAN-16 пока отсутствует. Поэтому обсуждение проблем учёта этого эффекта выходит за рамки настоящей статьи. Лишь заметим, что к HITRAN-16 прилагается модель (Lamougeux et al., 2015), позволяющая учитывать данный эффект для линий  $\text{CO}_2$  (хотя и без одновременного учёта «зависящего от скорости» профиля Фойгта).

Работа поддержана РФФИ (проекты № 18-01-00609А и 17-01-00220А).

## Литература

1. Колокутин Г. Э., Фомин Б. А. Новые спектроскопические базы и дистанционное зондирование Земли методами инфракрасной спектроскопии высокого разрешения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 3. С. 278–287.
2. Тимофеев Ю. М. Исследование атмосферы Земли методом прозрачности. Спб.: Наука, 2016. 366 с.
3. Fomin B. A., Correa M. P., Ceballos J. C., Souza R. A., Machado L. A. FLISS: A user-friendly satellite signal simulator using Monte-Carlo and line-by-line techniques for multiple scattering layered atmospheres // Proc. 2005 EUMETSAT Meteorological Satellite Conf. Dubrovnik, Croatia. 2005. P. 490–493.
4. Gamache R. R., Roller C., Lopes E., Gordon I. E., Rothman L. S., Polyansky O. L., Zobov N. F., Kyuberis A. A., Tennyson J., Yurchenko S. N., Császár A. G., Furtenbacher T., Huang X., Schwenke D. W., Lee T. J., Drouin B. J., Tashkun S. A., Perevalov V. I., Kochanov R. V. Total internal partition sums for 166 isotopologues of 51 molecules important in planetary atmospheres: application to HITRAN2016 and beyond // J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. 2017. V. 203. P. 70–87. DOI: 10.1016/j.jqsrt.2017.03.045.
5. Gordon I. E., Rothman L. S., Hill C., Kochanov R. V., Tan Y., Bernath P. F., Birk M., Boudon V., Campargue A., Chance K. V., Drouin B. J., Flaud J. M., Gamache R. R., Hodges J. T., Jacquemart D., Perevalov V. I., Perrin A., Shine K. P., Smith M.-A. H., Tennyson J., Toon G. C., Tran H., Tyuterev V. G., Barbe A., Császár A. G., Devi V. M., Furtenbacher T., Harrison J. J., Hartmann J. M., Jolly A., Johnson T. J., Karman T., Kleiner I., Kyuberis A. A., Loos J., Lyulin O. M., Massie S. T., Mikhailenko S. N., Moazzen-Ahmadi N., Müller H. S. P., Naumenko O. V., Nikitin A. V., Polyansky O. L., Rey M., Rotger M., Sharpe S. W., Sung K., Starikova E., Tashkun S. A., Vander Auwera J., Wagner G., Wilzewski J., Wcisło P., Yu S., Zak E. J. The HITRAN 2016 molecular spectroscopic database // J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. 2017. V. 203. P. 3–69. DOI: 10.1016/j.jqsrt.2017.06.038.

6. Lamouroux J., Rugalia L., Thomas X., Vander Auwera J., Gamache R. R., Hartmann J. M. CO<sub>2</sub> line-mixing database and software update and its tests in the 2.1  $\mu\text{m}$  and 4.3  $\mu\text{m}$  regions // *J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. 2015. V. 151. P. 88–96. DOI: 10.1016/j.jqsrt.2014.09.017.
7. 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. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. 2013. V. 129. P. 89–100. DOI:10.1016/j.jqsrt.2013.05.034.
8. Rothman L. S., Gordon I. E., Babikov Y., Barbe A., Chris Benner D., Bernath P. F., Birk M., Bizocchi L., Boudon V., Brown L. R., Campargue A., Chance K., Cohen E. A., Coudert L. H., Devi V. M., Drouin B. J., Fayt A., Flaud J. M., Gamache R. R., Harrison J. J., Hartmann J. M., Hill C., Hodges J. T., Jacquemart D., Jolly A., Lamouroux J., Le Roy R. J., Li G., Long D. A., Lyulin O. M., Mackie C. J., Massie S. T., Mikhailenko S., Müller H. S. P., Naumenko O. V., Nikitin A. V., Orphal J., Perevalov V., Perrin A., Polovtseva E. R., Richard C., Smith M. A. H., Starikova E., Sung K., Tashkun S., Tennyson J., Toon G. C., Tyuterev V. G., Wagner G. The HITRAN2012 molecular spectroscopic database // *J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. 2013. V. 130. P. 4–50. DOI: 10.1016/j.jqsrt.2013.07.002.

## New HITRAN-2016 spectroscopic database for line-by-line models used in remote sensing of the Earth by infrared spectrometry

B. A. Fomin, G. E. Kolokutin

*Central Aerological Observatory, Dolgoprudny 141700, Russia*  
E-mail: b.fomin@mail.ru

New HITRAN-2016 spectroscopic database is the result of updating HITRAN-2012 database. It contains improved parameters for calculating Voigt contours of the spectral lines in line-by-line radiative transfer models. In addition, for H<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub>O, CO, O<sub>2</sub>, HF, HCl, and H<sub>2</sub> molecules, data are presented for calculating line contours according to Hartmann–Tran theory. The article discusses the changes in the line-by-line calculations of infrared radiation spectra that occur when HITRAN-2012 is replaced by HITRAN-2016 and Voigt contour by Hartmann–Tran contour. The results of the work can be used to make decisions on the expediency of such a replacement in line-by-line models of remote sensing of the atmospheres of the Earth and planets by infrared spectrometry.

**Keywords:** outgoing radiation, infrared spectra, line-by-line calculations, spectroscopic databases, line contours

Accepted: 30.01.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-1-17-24

### References

1. Kolokutin G. E., Fomin B. A., Novye spektroskopicheskie bazy i distantsionnoe zondirovanie Zemli metodami infrakrasnoi spektrometrii vysokogo razresheniya (New versions of spectroscopic databases and remote sensing of the Earth using high-resolution IR spectroscopy), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, Vol. 11, No. 3, pp. 278–287.
2. Timofeev Yu. M., *Issledovanie atmosfery Zemli metodom prozrachnosti* (Study of the Earth's atmosphere by transparency), Saint Petersburg: Nauka, 2016, 366 p.
3. Fomin B. A., Correa M. P., Ceballos J. C., Souza R. A., Machado L. A., FLISS: A user-friendly satellite signal simulator using Monte-Carlo and line-by-line techniques for multiple scattering layered atmospheres, *Proc. 2005 EUMETSAT Meteorological Satellite Conf.*, Dubrovnik, Croatia, 2005, pp. 490–493.
4. Gamache R. R., Roller C., Lopes E., Gordon I. E., Rothman L. S., Polyansky O. L., Zobov N. F., Kyuberis A. A., Tennyson J., Yurchenko S. N., Császár A. G., Furtenbacher T., Huang X., Schwenke D. W., Lee T. J., Drouin B. J., Tashkun S. A., Perevalov V. I., Kochanov R. V., Total internal partition sums for

- 166 isotopologues of 51 molecules important in planetary atmospheres: application to HITRAN2016 and beyond, *J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2017, Vol. 203, pp. 70–87, DOI: 10.1016/j.jqsrt.2017.03.045.
5. Gordon I. E., Rothman L. S., Hill C., Kochanov R. V., Tan Y., Bernath P. F., Birk M., Boudon V., Campargue A., Chance K. V., Drouin B. J., Flaud J. M., Gamache R. R., Hodges J. T., Jacquemart D., Perevalov V. I., Perrin A., Shine K. P., Smith M.-A. H., Tennyson J., Toon G. C., Tran H., Tyuterev V. G., Barbe A., Császár A. G., Devi V. M., Furtenbacher T., Harrison J. J., Hartmann J. M., Jolly A., Johnson T. J., Karman T., Kleiner I., Kyuberis A. A., Loos J., Lyulin O. M., Massie S. T., Mikhailenko S. N., Moazzen-Ahmadi N., Müller H. S. P., Naumenko O. V., Nikitin A. V., Polyansky O. L., Rey M., Rotger M., Sharpe S. W., Sung K., Starikova E., Tashkun S. A., Vander Auwera J., Wagner G., Wilzewski J., Wcisło P., Yu S., Zak E. J., The HITRAN 2016 molecular spectroscopic database, *J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2017, Vol. 203, pp. 3–69, DOI: 10.1016/j.jqsrt.2017.06.038.
  6. Lamouroux J., Rugalia L., Thomas X., Vander Auwera J., Gamache R. R., Hartmann J. M., CO<sub>2</sub> line-mixing database and software update and its tests in the 2.1 μm and 4.3 μm regions, *J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2015, Vol. 151, pp. 88–96, DOI: 10.1016/j.jqsrt.2014.09.017.
  7. 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. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2013, Vol. 129, pp. 89–100, DOI: 10.1016/j.jqsrt.2013.05.034.
  8. Rothman L. S., Gordon I. E., Babikov Y., Barbe A., Chris Benner D., Bernath P. F., Birk M., Bizzocchi L., Boudon V., Brown L. R., Campargue A., Chance K., Cohen E. A., Coudert L. H., Devi V. M., Drouin B. J., Fayt A., Flaud J. M., Gamache R. R., Harrison J. J., Hartmann J. M., Hill C., Hodges J. T., Jacquemart D., Jolly A., Lamouroux J., Le Roy R. J., Li G., Long D. A., Lyulin O. M., Mackie C. J., Massie S. T., Mikhailenko S., Müller H. S. P., Naumenko O. V., Nikitin A. V., Orphal J., Perevalov V., Perrin A., Polovtseva E. R., Richard C., Smith M. A. H., Starikova E., Sung K., Tashkun S., Tennyson J., Toon G. C., Tyuterev V. G., Wagner G., The HITRAN2012 molecular spectroscopic database, *J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2013, Vol. 130, pp. 4–50, DOI: 10.1016/j.jqsrt.2013.07.002.