Восстановление общего содержания угарного газа в тропосфере по данным наблюдений AIRS/AMSU в Дальневосточном центре ФГБУ «НИЦ «Планета»

А.А. Филей¹, В.Д. Ян¹, В.С. Ракитин², А.И. Скороход²

¹Дальневосточный центр НИЦ «Планета», Хабаровск, 680000, Россия E-mail: vmer@dvrcpod.ru ²Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, 119017, Россия E-mail: skorokhod@ifaran.ru

В работе представлен результат восстановления общего содержания (OC) угарного газа (CO) в тропосфере модифицированным методом двойных разностей по данным наблюдений AIRS/AMSU. Исследования проведены по тестовой выборке данных AIRS/AMSU для территории Дальневосточного региона за пожароопасный период 2014–2016 гг. В работе представлена доработанная методика восстановления общего содержания угарного газа, отмечены ее основные преимущества и практическая пригодность. Полученные результаты хорошо согласуются с данными по угарному газу, предоставляемыми NASA, и с результатами наземных спектроскопических измерений, выполненных в Центральной Сибири на базе Средне-Енисейского стационара красно-ярского Института леса им. В.Н. Сукачева. В общем случае, при сравнение восстановленных значений СО для безоблачных пикселей с данными NASA математическое ожидание отклонения составило 7,8%, а среднеквадратическое отклонение – 10%. Математическое отклонение – 4,7%. Освоение данной методики открывает пути для новых теоретических исследований применительно к отечественным приборам инфракрасной спектроскопии. В частности, намечена разработка аналогичных методик определения общего содержания различных газовых составляющих по данным отечественных Фурье-спектрометров серии ИКФС.

Ключевые слова: инфракрасный спектр, атмосферная оптика, угарный газ

Одобрена к печати: 14.02.2017 DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-2-250-259

Введение

Космический мониторинг содержания атмосферных газов является важным направлением в области дистанционного зондирования Земли и одной из основных задач молекулярной спектроскопии (Тимофеев, Васильев, 2003; Филей, 2012). Определение ОС в тропосферном слое атмосферы одного из таких газов – окиси углерода (СО) или угарного газа – является предметом исследования настоящей работы.

Восстановление ОС газовых составляющих атмосферы по замеренному атмосферному спектру относится к обратным задачам атмосферной оптики. Основная часть алгоритмов решения таких задач основана на сведении к оптимизационной задаче (Поляков, 2006). Однако, учитывая, что один виток данных гиперспектрального инфракрасного спектрометра составляет несколько тысяч пикселей, становится ясно, что расчеты могут потребовать привлечения значительных вычислительных ресурсов.

В 2012 году Thonat и соавторы предложили оригинальный эффективный способ восстановления ОС угарного газа в тропосфере по данным приборов AIRS/IASI на основе метода двойных разностей и привели результаты его применения для тропических широт. В работе (Thonat et al., 2012) показано, что полученные результаты согласуются с оценками эмиссии угарного газа из базы данных GFEDv3 (Global Fire Emission Database), а также наблюдается приемлемая корреляция с данными самолетных измерений на высоте 9–12 км, проведенных в рамках научной программы CARIBIC. По мнению Thonat и соавторов (2012), основная идея метода является перспективной с точки зрения адаптации под различные спутниковые приборы инфракрасной спектроскопии, а также применимости к восстановлению общего содержания других атмосферных газов. Кроме того, очевидным достоинством метода является то, что, за исключением этапа моделирования восходящего излучения, он не требует затратных расчетов и позволяет оперативно обрабатывать поступающие данные без привлечения значительных вычислительных ресурсов. В связи с этим целью данной статьи являлось исследование предложенного метода и апробация на данных Дальневосточного региона.

В рамках проведенных исследований вышеупомянутый метод, предложенный Thonat и соавторами, был существенно доработан: были задействованы продукты уровня L2, восстановленные непосредственно по данным зондирующего комплекса AIRS/AMSU, а также изменен подход к вычислению OC угарного газа. В ходе валидации получаемых оценок было установлено, что оценки OC угарного газа, полученные в ходе применения модифицированного метода, и независимые данные NASA согласуются между собой. Временные затраты на обработку одного витка AIRS несущественны и составляют порядка 3–4 минут с использованием вычислительных мощностей Центра. Также показано, что полученные результаты согласуются с данными наземных спектроскопических измерений солнечного излучения, выполненных на тестовом полигоне «Зотино». Этот полигон системы валидационных подспутниковых наблюдений Роскосмоса был организован на базе Средне-Енисейского стационара красноярского Института леса им. В.Н. Сукачева в Центральной Сибири, примерно в 35 км от одноименного поселка Зотино. Хорошее согласие наземных измерений со спутниковыми оценками общего содержания угарного газа подтвердило эффективность и практическую пригодность модифицированного метода.

Методика проведения исследования

Исследование состояло из следующих основных этапов:

1. Сначала была отобрана тестовая выборка данных AIRS по территории Дальневосточного региона за пожароопасный период в 2014–2016 гг.

2. Далее метод был применен на тестовой выборке с использованием калиброванных данных гиперспектрометра AIRS, прошедших процедуру коррекции облачности с помощью прибора AMSU. Для каждого витка AIRS были вычислены математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение рассчитанных значений от эталонных. За эталонные данные были приняты общие содержание угарного газа, вычисленные NASA.

3. На заключительном этапе было произведено сопоставление общего содержания CO, вычисленных данным методом, с результатами наземных наблюдений на полигоне Зотино. С этой целью были подобраны дневные витки AIRS (наземные измерения проводились только в дневное время) за нужный период, покрывающие территорию Зотино.

Описание базового метода

Основная идея метода двойных разностей состоит в использовании таких пар каналов измеряющего прибора, которые удовлетворяют определенным условиям в диапазоне поглощения угарным газом:

1) в каждой паре один канал чувствителен к наличию угарного газа, другой – напротив, не чувствителен (малочувствителен) к нему;

2) оба канала примерно одинаково чувствительны к изменению прочих параметров состояния атмосферы и подстилающей поверхности (ПП).

Таким образом, разность каналов каждой пары должна зависеть практически только от изменения общего содержания CO, тогда как влияние прочих параметров сведено к минимуму.

Для описания состояния атмосферы ее условно разбивают на слои с помощью изобарических уровней (*puc. 1*). Такие параметры как вертикальные профили распределения водяного пара и других газовых составляющих являются усредненными общего содержания в атмосферном слое, в то время как значения вертикального профиля температуры задаются на соответствующих изобарических уровнях.



Рис. 1. Разбиение атмосферы на слои по изобарическим уровням

Для моделирования спектра восходящего излучения используется быстрая радиационная модель (БРМ). Кроме того, предполагается, что используемая БРМ может вычислять якобианы моделированного излучения по различным параметрам состояния атмосферы. На первом этапе нужно определить пары каналов, по данным которых будет определяться OC угарного газа. Чувствительность k-го канала S_k к изменению OC угарного газа оценивается с помощью частных производных:

$$S_k = \sum_{i=1}^n \frac{\partial T_k}{\partial q_i} \Delta q_i,\tag{1}$$

где n – число изобарических уровней; q_i – ОС угарного газа в i-ом атмосферном слое; Δq_i – приращение СО в i-ом слое; $\frac{\partial T_k}{\partial q_i}$ – производная яркостной температуры в k-ом канале, которая вычисляется с помощью БРМ. В рамках данной работы подбор каналов производился в диапазоне частот 2181,5÷2200,0 см⁻¹, в котором угарный газ эффективно поглощает излучение. Было отобрано т=3 пары каналов, отвечающих указанным условиям.

На втором этапе с помощью БРМ моделируется измеряемый прибором спектр по следующим параметрам подстилающей поверхности и состояниям атмосферы:

- температура ПП;
- коэффициент излучения ПП;
- вертикальный профиль температуры;
- вертикальный профиль влажности;
- начальное приближение вертикального профиля распределения СО;
- вертикальный профиль распределения O₃;
- вертикальный профиль распределения N₂O.

Смоделировав спектр восходящего излучения, можем вычислить разность яркостных температур для каждой пары каналов, которая является сигналом наличия СО:

$$\Delta T_{j} = (T_{j_{1}}^{mod} - T_{j_{1}}^{instr}) - (T_{j_{2}}^{mod} - T_{j_{2}}^{instr}),$$
⁽²⁾

где j – номер пары каналов, $T_{j_1}^{mod}$, $T_{j_2}^{mod}$ – значения смоделированного спектра в терминах яркостной температуры; $T_{j_1}^{instr}$, $T_{j_2}^{instr}$ – значения замеренного спектра в терминах яркостной температуры.

Далее нужно перейти от величин ΔT_j непосредственно к общему содержанию. Разность между начальным приближением и расчетным значением СО вычисляется по формуле (Thonat et al., 2012):

$$\Delta Q = \frac{\sum_{j=1}^{m} \Delta S_j \Delta T_j}{\sum_{j=1}^{m} \Delta S_j^2},$$
(3)

где $\Delta S_j = S_{j_1} - S_{j_2}$ – разность чувствительностей каналов j-ой пары к изменению CO. Тогда расчетное OC угарного газа будет:

$$Q = Q_0 + \Delta Q \,, \tag{4}$$

где Q_0 – начальное приближение OC угарного газа, выбор которого основан на среднемесячных профилях базы данных MOZART для северного полушария.

Модификация метода

При реализации метода двойных разностей в Центре были внесены некоторые модификации. В оригинальной работе (Thonat et al., 2012) приведено описание метода двойных разностей и результаты его применения с использованием лишь калиброванных данных ИК спектрометра. Параметры состояния атмосферы, необходимые для моделирования спектра восходящего излучения, брались из прогностических данных ECMWF (Европейский центр среднесрочных прогнозов погоды). Эти данные имеют временное разрешение 6 часов и пространственное разрешение 0,75°×0,75° и, таким образом, могут существенно отличаться от действительных параметров атмосферы. При этом начальное приближение ОС угарного газа и коэффициент излучения ПП считаются постоянными.

Первое изменение касается используемых данных. Для уменьшения влияния ошибок задания атмосферных параметров было решено задействовать в вычислениях информационные продукты второго уровня, содержащие все необходимые параметры состояния атмосферы. Для выделения из «сырого» потока данных AIRS используется программный комплекс RT-STPS. Данные уровня 1b формируются с помощью программного обеспечения AIRS/HSB/AMSU. Для получения продуктов второго уровня используется программный комплекс CSPP (Community Satellite Processing Package). Выбор начального приближения профиля ОС угарного газа зависит от времени года и, как упоминалось выше, основан на среднемесячных профилях базы данных MOZART. Коэффициенты излучения ПП берутся из ежемесячно обновляемой электронной базы данных коэффициентов излучения подстилающей поверхности Земли в инфракрасной области спектра (ftp.ssec.wisc. edu/pub/g_emis) (Borbas, Ruston, 2010).

Следующее изменение касается, собственно, вычислений. В базовом методе применяются усредненные коэффициенты ΔS_j , которые были вычислены для атмосферных профилей из базы данных TIGR (Thonat et al., 2012) для тропических широт. Таким образом, значения ΔS_j являются постоянными для всех сезонов. При этом использовался постоянный профиль CO, и не учитывались его существенные сезонные колебания для северного полушария (Brasseur et al., 1998). Такой подход не может быть непосредственно перенесен на территорию Дальневосточного региона, так как для его широт характерны значительные сезонные перепады температур, что приводит к значительному разбросу значений ΔS_j .

В связи с этим базовый алгоритм вычислений был несколько видоизменен. Для каждого пикселя из информационных продуктов второго уровня извлекаются вертикальные профили температуры, распределения водяного пара и озона, температура подстилающей поверхности (Olsen, 2013). Перечисленные параметры, а также начальное приближение профиля распределения СО подаются на вход БРМ для вычисления величин $\frac{\partial T_k}{\partial q_i}$. Далее по формуле (1) вычисляются значения ΔS_j . Таким образом, вместо задания одного набора коэффициентов ΔS_j для всех витков выполняется их вычисление для каждого пикселя.

Анализ результатов

Как упоминалось выше, в качестве эталона было принято ОС угарного газа в атмосферном столбе, восстановленное NASA по данным AIRS. Как показано в исследовании, проведенном с целью валидации используемого NASA алгоритма (McMillan et al., 2011), отклонения общего содержания, вычисленные по данным AIRS в атмосферном столбе 300–900 гПа, от наземных измерений, проведенных в рамках программы INTEX, составляют в среднем 6–10%, среднеквадратическое отклонение составляет 8–12%.

Из формул (2)–(3) следует, что ОС угарного газа вычисляется непосредственно по значениям ΔT_j в каждой паре каналов. Поэтому при анализе результатов применения метода на тестовой выборке данных AIRS была исследована зависимость между величинами ΔT_j и эталонного содержания СО (данные NASA). В результате было выявлено, что при содержании СО в исследуемом пикселе более определенного порога ($\approx 2,75 \cdot 10^{18}$ молек/см²) происходит «пресыщение», которое проявляется в ухудшении чувствительности метода: коэффициент пропорциональности между СО и величинами ΔT_j заметно меньше в случае повышенного содержания угарного газа (*puc. 2*). Данное явление было учтено в практической реализации метода в Центре.

Определение величины порога «пресыщения» происходило следующим образом. Для каждого витка тестовой выборки путем подбора осуществлялся поиск оптимального порога «пресыщения» таким образом, чтобы коэффициенты корреляции R_1 , R_2 между СО и величинами ΔT_j в каждой паре каналов были максимальны (*puc. 2*). Далее было вычислено среднее значение по всем виткам тестовой выборки. На *puc. 2* приведен пример графика корреляции между величиной ΔT в одной из пар каналов и СО, вышеупомянутый порог обозначен вертикальной штриховой линией.



Рис. 2. Пример линейной корреляции между величиной ∆Т в одной из пар каналов и ОС угарного газа, которые используются в вычислениях: а) AIRS 25.07.2014 № 33, б) AIRS 26.07.2014 № 34

Также в ходе исследования было замечено, что даже частичное закрытие пикселя облаками снижает качество восстановленных атмосферных параметров и вносит дополнительную погрешность. Поэтому были отдельно рассмотрены безоблачные пиксели (доля покрытия пикселя облачностью менее 5%) и пиксели, содержащие облачные образования (*рис. 3*). На *рис. 3* штриховые линии обозначают 10%-ый порог отклонения рассчитанных значений угарного газа от эталонных.

Результаты показали, что для абсолютного большинства безоблачных пикселей (более 98%) отклонения вычисленных значений от эталонных не превосходят 10%. Присутствие облачных образований проявляется в увеличении относительной ошибки вычисленных значений содержания СО. Также обращает на себя внимание значительный разброс (среднеквадратическое отклонение) полученных результатов.



Рис. 3. Пример корреляции вычисленных и эталонных значений СО для безоблачных пикселей: a) AIRS 31.07.2014 № 36, б) AIRS 01.08.2014 № 43

Следующим шагом было сопоставление рассчитанных и эталонных значений СО. Метод применен на тестовой выборке данных AIRS за осенне-весенний период высокой пожарной активности в 2014–2016 гг. При сравнении в качестве эталонных данных были приняты ОС угарного газа, вычисленные NASA.

В качестве примера в *табл. 1* приведено сопоставление результатов для пикового периода пожарной активности с 27.07.2014 г. по 03.08.2014 г. в Республике Саха (Якутия). В общем случае средние значения для безоблачных пикселей составили: μ = 7,8%, σ = 10,0%; для пикселей, содержащих облачность: μ = 10,4%, σ = 11,5%.

		Безоблачные пиксели, %	Пиксели, содержа- щие облачность, %
2014.07.28 03:05	μ	5,92	8,53
	σ	5,96	8,20
2014.07.28 04:41	μ	6,64	7,75
	σ	4,34	7,38
2014.07.30 02:53	μ	8,49	10,97
	σ	6,61	8,85
2014.07.30 04:29	μ	6,31	7,87
	σ	4,41	7,04
2014.07.31 03:35	μ	8,70	11,14
	σ	6,41	9,51

Таблица 1. Сравнение результатов применения прогностических данных и данных второго уровня; μ – математическое ожидание относительной ошибки между вычисленными и эталонными значениями CO, σ – среднеквадратическое отклонение

		Безоблачные пиксели, %	Пиксели, содержа- щие облачность, %
2014.08.01 02:41	μ	9,30	12,38
	σ	7,52	10,34
2014.08.02 03:23	μ	7,20	8,89
	σ	5,10	8,82
2014.08.02 04:59	μ	9,54	10,60
	σ	5,86	9,01
среднее	μ _{cp}	7,76	9,77
	σ _{cp}	5,78	8,64

Таблица 1. Продолжение

Сравнение с результатами наземных измерений

Для сопоставления полученных результатов по ОС угарного газа в толще атмосферы с наземными измерениями использовались данные, полученные на полигоне «Зотино» в июне–июле 2014 г. при помощи ИК спектрометрического комплекса. Спектрометрический комплекс был разработан в Институте физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН на основе дифракционного спектрометра, оснащенного следящей за солнцем системой (Dianov-Klokov et al., 1989). Разрешение спектрометра в области 2152–2160 см⁻¹, где расположена основная полоса поглощения СО, составляет 0,2 см⁻¹. Погрешность единичного измерения общего содержания СО комплексом не превышает 10% (Ракитин и др., 2011).

Значения, полученные на полигоне «Зотино», сравнивались с наиболее близкими по времени значениями ОС угарного газа, рассчитанными по спутниковым данным. На *рис. 4* приведен временной график изменения СО на полигоне «Зотино». На основании сопоставления сделан вывод, что в случае фоновых значений СО данные спутниковых и наземных измерений могут несколько отличаться, причем наблюдается систематическое занижение значений СО, рассчитанных по спутниковым данным. В случае же повышенного содержания СО данные наземных и спутниковых измерений хорошо согласуются, как видно на примере случая, зафиксированного 26.06.2014 г. (*рис. 4*), соответствующего пожарной активности в районе полигона «Зотино». Математическое ожидание отклонения спутниковых измерений от наземных составляет 0,15·10¹⁸ молек/см² (8,9 %), а среднеквадратическое отклонение – 0,09·10¹⁸ молек/см² (4,7 %).

Заключение

В результате проделанной работы была исследована и доработана методика восстановления ОС угарного газа. Была подтверждена практическая пригодность методики. Полученные результаты хорошо коррелируют с данными по угарному газу, предоставляемыми NASA, и согласуются с результатами наземных наблюдений, полученных на полигоне «Зотино».

Освоение данной методики открывает пути для новых теоретических исследований применительно к отечественным приборам инфракрасной спектроскопии. В частности, намечена разработка аналогичных методик определения общего содержания различных газовых составляющих по данным отечественных Фурье-спектрометров серии ИКФС.



Рис. 4. Сопоставление результатов наземных измерений полигона «Зотино» и рассчитанных по данным AIRS по общему содержанию угарного газа

Литература

- Поляков А.В. Определение газового состава атмосферы и характеристик аэрозоля затменным методом: 1. дис. докт. физ.-мат. наук. СПб., 2006. 372 с.
- 2. Ракитин В.С., Фокеева Е.В., Гречко Е.И., Джола А.В., Кузнецов Р.Д. Вариации содержания окиси углерода в атмосфере Московского мегаполиса // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2011. Т. 47. № 1. С. 64–72. *Тимофеев Ю.М., Васильев А.В.* Теоретические основы атмосферной оптики. СПб.: Наука, 2003. 474 с.
- 3 Филей А.А. Мониторинг содержания газов в атмосфере на основе данных ДЗЗ в ДЦ ФГБУ «НИЦ «Пла-4.
- нета» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. № 6. С. 71-80. 5.
- Borbas E.E., Ruston B.C. The RTTOV UWiremis IR land surface emissivity module. EUMETSAT. 2010. 24 c. Dianov-Klokov V.I., Yurganov L.N., Grechko E.I., Dzhola A.V. Spectroscopic measurements of atmospheric car-6. bon monoxide and methane. 1: Latitudinal distribution // J. Atmos. Chem. 1989. Vol. 8. No. 2. P. 139-151
- *McMillan W.W., Evans K., Barnet C., Diskin G.* Validating the AIRS version 5 CO retrieval with DACOM in situ measurements during INTEX-A and -B // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2011. Vol. 49. 7. No. 7. P. 2802–2813
- Olsen E.T. AIRS/AMSU/HSB Version 6 Level 2 Product Levels, Layers and Trapezoids. Jet Propulsion Labora-8. tory California Institute of Technology Pasadena, CA. 2013. P. 3–12. Thonat T., Crevoisier C., Scott N., Chedin A., Schuck T., Crepeau L. Retrieval of tropospheric CO column from
- 9. hyperspectral infrared sounders – application to four years of Aqua/AIRS and MetOp-A/IASI // Atmos. Meas. Tech. 2012. No. 5. P. 2413–2429.

Retrieval of tropospheric carbon monoxide column from AIRS/AMSU observations in the Far-Eastern Center of State Research Center for Space Hydrometeorology "Planeta"

A.A. Filei¹, V.D. Yan¹, V.S. Rakitin², A.I. Skorokhod²

¹Far-Eastern Center of State Research Center for Space Hydrometeorology "Planeta" Khabarovsk 680000, Russia *E-mail: vmer@dvrcpod.ru* ²A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Moscow 119017, Russia *E-mail: skorokhod@ifaran.ru*

The paper presents the result of a retrieval of tropospheric carbon monoxide (CO) from infrared hyperspectral observations of AIRS/AMSU on board AQUA. The retrieval method is based on a modified double differential approach derived from AIRS/AMSU observations of the Far Easten territory of Russia in the fire-dangerous period. The main advantages and practical suitability of the modified double differential approach are discussed. Comparisons with NASA carbon monoxide data and ground-based measurements are well correlated. Mathematical expectation of deviation is 7.8% and standard deviation is 10% for NASA carbon monoxide data. Mathematical expectation of deviation is 8.9% and standard deviation is 4.7% for ground-based measurements. The ground-based measurements were made in Central Siberia by Forest Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. The modified double differential approach opens the way for new theoretical research using national satellite instruments of infrared spectroscopy. In future, we plan to use this retrieval method for other atmospheric gases observed by infrared Fourier spectrometers on Meteor-M satellites board.

Keywords: infrared spectrum, atmospheric optics, carbon monoxide

Accepted: 14.02.2017 DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-2-250-259

References

- 1. Polyakov A.V., Opredelenie gazovogo sostava atmosfery i kharakteristik aerozolya zatmennym metodom: dis. dokt. fiz.-mat. nauk (Determination of atmospheric gas composition and characteristics of aerosol by eclipse method: Dr. phys.-math. sci. thesis), SPb, 2006, 372 p.
- Rakitin V.S., Fokeeva E.V., Grechko E.I., Dzhola A.V., Kuznetsov R.D., Variatsii soderzhaniya okisi ugleroda v atmosfere Moskovskogo megapolisa (Variations of the total content of carbon monoxide over Moscow megapo-2. lis), *Izv. RAN. Fizika atmosfery i okeana*, 2011, Vol. 47, No. 1, pp. 64–72. Timofeev Yu.M., Vasil'ev A.V., *Teoreticheskie osnovy atmosfernoi optiki* (Theoretical Foundations of atmospher-
- 3. ic optics), St. Petersburg: Nauka, 2003, 474 p.
- 4 Filei A.A., Monitoring soderzhaniya gazov v atmosfere na osnove dannykh DZZ v DTs FGBU "NITs "Planeta" (Monitoring of gases in the atmosphere based on remote sensing data in the Far-Eastern Center of State Research Center for Space Hydrometeorology "Planeta"), Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa, 2012, Vol. 6, pp. 71-80.
- Borbas E.E., Ruston B.C., *The RTTOV UWiremis IR land surface emissivity module*, EUMETSAT, 2010, 24 p. Dianov-Klokov V.I., Yurganov L.N., Grechko E.I., Dzhola A.V., Spectroscopic measurements of atmospheric 5.
- 6. carbon monoxide and methane. 1: Latitudinal distribution, J. Atmos. Chem., 1989, Vol. 8, No. 2, pp. 139-151.
- McMillan W.W., Evans K., Barnet C., Diskin G., Validating the AIRS version 5 CO retrieval with DACOM in situ measurements during INTEX-A and -B, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 7.
- Vol. 49, No. 7, pp. 2802–2813. Olsen E.T., *AIRS/AMSU/HSB Version 6 Level 2 Product Levels, Layers and Trapezoids*, Jet Propulsion Laborato-8. ry California Institute of Technology Pasadena, CA, 2013, pp. 3-12.
- 9 Thonat T., Crevoisier C., Scott N., Chedin A., Schuck T., Crepeau L., Retrieval of tropospheric CO column from hyperspectral infrared sounders – application to four years of Aqua/AIRS and MetOp-A/IASI, *Atmos. Meas. Tech*, 2012, Vol. 5, pp. 2413–2429.