Сравнение спутниковых и радиозондовых наблюдений тропосферной влажности

А.В. Хохлова, А.О. Агуренко

Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации - Мировой центр данных Обнинск, 249031, Россия Emails: anna x@meteo.ru; alina@meteo.ru

Выполнено сравнение наблюдений количества осажденной воды в слое 1000–300 гПа по радиозондовым и спутниковым наблюдениям за 2013 г. Использованы данные 42 аэрологических станций, расположенных в регионе от 20° до 70° с.ш. и от 80° з.д. до 75° в.д., и спутниковые данные, получаемые по Глобальной системе телесвязи (ГСТ) в виде сводок САТЕМ со спутников серии NOAA. Обработка и накопление как аэрологических, так и спутниковых данных производится в ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД». В статье приведены результаты сравнения срочных и среднемесячных данных. Показано хорошее совпадение среднемесячных значений количества осажденной воды в умеренных широтах, при этом в летний период спутниковые наблюдения дают несколько большее влагосодержание, чем радиозондовые. Коэффициенты корреляции между среднемесячными спутниковыми и радиозондовыми данными составляют практически везде не менее 0,95, за исключением субтропического региона. В субтропических и тропических широтах радиозондовые измерения в сравнении со спутниковыми показывают более низкое содержание влаги, в особенности в летний сезон, что совпадает с выводами в имеющихся исследованиях о систематическом «сухом смещении» радиозондовых данных. Однако анализ климатических условий, по крайней мере, для отдельных станций, склоняет к мысли о необходимости дальнейших исследований по сопоставлению данных с привлечением дополнительных источников информации.

Ключевые слова: тропосфера, осажденная вода, спутниковые измерения, радиозондовые измерения, сравнение

Введение

Содержание водяного пара в атмосфере является важной характеристикой, определяющей водный режим, осадки, перенос влаги в атмосфере. Для решения различного рода задач, в том числе для исследований по климатологии влажности, необходимо иметь наблюдения широкого пространственного и временного охвата. Глобальные измерения влажности выполняются с разных платформ: это радиозондовые измерения и спутниковые измерения, которые ведутся с разных спутников различными измерительными системами. Климатические исследования влажности выполняются по данным наблюдений, данным реанализа и модельным (Dai, 2006; Simmons et al., 2010; Hartmann et al., 2013). Достаточно полный обзор результатов исследований приведен в Пятом Оценочном докладе по изменению климата (Hartmann et al., 2013), где отмечено, что в целом имеет место увеличение влажности, хорошо коррелирующее с изменениями температуры, с которой влажность связана уравнением Клайперона-Клаузиуса.

Аэрологические измерения проводятся, как правило, дважды в сутки, они имеют достаточное хорошее вертикальное разрешение, но пространственно они относятся к одной точке. Спутниковые измерения влажности имеют широкий пространственный охват, но небольшое вертикальное разрешение. Наличие измерений из разных источников поднимает вопрос об их сравнимости. Этот вопрос неоднократно исследовался (John and Buehler, 2005; Moradi, Buehler and John, 2010; Basha, Ratnam and Krishna Murthy, 2013; Schröder et al., 2014; Могаdi et al, 2013). Согласно выводам из проведенных исследований, радиозондовые измерения в целом дают систематическое смещение в сторону уменьшения влажности («сухое смещение»), которое сильнее выражено в дневное время суток. Как правило сравниваются специально рассчитанные величины, называемые «верхнетропосферная влажность» (*UTH*, Upper Troposphere Humidity) (John and Buehler, 2005; Moradi, Buehler and John, 2010; Basha, Ratnam and Krishna Murthy, 2013; Moradi et al., 2013) или «влажность в свободной тропосфере» (*FTH*, Free Troposhere Humidity) (Schröder et al., 2014). Для определения этих величин через радиозондовый профиль рассчитывается аналог яркостной температуры Tb, которая затем преобразуется в величину, отражающую среднюю относительную влажность в тропосфере по формуле:

$$\ln(UTH) = a + b \cdot Tb_{a}$$

где *Tb* – излучение, выраженное через яркостную температуру, *a* и *b* – линейные коэффициенты, зависящие от угла обзора.

Таким же образом преобразуется яркостная температура, полученная из спутниковых измерений.

В работе (Moradi, Buehler and John, 2010) обсуждается метод расчета яркостной температуры по радиозондовым данным. Показано, что радиозондовые данные с территории бывшего СССР на 30% влажнее, чем спутниковые данные, на остальных территориях радиозондовые данные на 6% суше, чем спутниковые данные. В связи с этим отмечается, что распределение смещения имеет «геополитический» характер, что связывается с различиями радиозондовых приборов и систем в разных странах.

В работе (Dai, 2006) спутниковые наблюдения сравниваются с данными 40 аэрологических станций в Европе за 2011–2003 гг. Сравнение подтвердило наличие систематического смещения радиозондовых данных в сторону уменьшения влажности («сухое смещение»), при этом величина этого смещения меняется от станции к станции и от года к году и зависит также от времени суток. В дневное время это смещение больше. Подчеркивается, что использование радиозондовых данных для валидации спутниковых измерений необходимо хотя бы потому, что других источников для этого не имеется.

В работе (Basha, Ratnam and Krishna Murthy, 2013) проведено сравнение вариаций тропосферной влажности по аэрологическим и спутниковым данным для 3 тропических станций юго-восточной Азии. Анализируются среднемесячные значения с 2002 по 2011 гг., при этом спутниковые ряды получены отдельно для разных приборов (Atmospheric Infrared Sounder (AIRS), Advanced Microwave Sounding Unit-B (AMSU B) и Microwave Limb Sounder (MLS). Показано хорошее совпадение вариаций за исключением одной станции (Сингапур).

В статье (Schröder et al., 2014) представлен новый продукт – относительная влажность в свободной тропосфере *FTH* с геостационарных спутников (MeteoSat), за период 1983–2009 с пространственным разрешением $0,625^{\circ} \times 0,625^{\circ}$ и временным разрешением 3 часа. Сравниваются значения *FTH*, полученные с MeteoSat с рассчитанными из

аэрологических профилей из массива радиозондовых данных Analyzed RadioSoundings Archive (ARSA). В среднем относительное «сухое смещение» радиозондовых данных составляет –3,2%.

В статье (Moradi et al., 2013) обсуждается качество радиозондовых профилей водяного пара за период 2000–2009 гг. с использованием верхнее-тропосферной влажности (*UTH*), восстановленной из микроволновых спутниковых данных. Показано, что в ночное время радиозондовые данные имеют «сухое смещение» от -5% до -15% над Европой, Австралией и Новой Зеландией и систематическое «влажное смещение» более 30% над Китаем и странами бывшего СССР. Ночное смещение радиозондовых данных над США и Канадой составляет от -10% до 20%. Большая часть станций дает дневное «сухое смещение», за исключением нескольких станций США и бывшего СССР. Отмечается разнородность радиозондовых датчиков влажности в разных регионах.

Целью настоящей работы является сравнение радиозондовых и спутниковых наблюдений тропосферной влажности, архивируемых в Госфонде ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД». Атмосферная влажность может быть охарактеризована не только рассмотренной выше среднетропосферной относительной влажностью, но также и другими показателями. В настоящей работе использована такая величина, как количество осажденной воды, получаемое из аэрологических и спутниковых наблюдений. Осажденная вода является достаточно общей характеристикой тропосферной влажности и входит в состав сводок спутниковых данных САТЕМ (точнее, в сводки входит содержание водяного пара в слое 1000–300 гПа). Сводки САТЕМ формируются на основе спутникового температурно-влажностного зондирования атмосферы, распространяются по сети ГСТ и, наряду с радиозондовыми измерениями, входят в состав данных, усваиваемых численными прогностическими моделями. Сопоставление продукции, получаемой из разных источников и используемой для климатических или прогностических задач, является актуальной задачей. В настоящей работе мы ограничились временным интервалом в один год (2013 г.) и регионом от 20° до 70° с.ш. и от 80° з.д. до 75° в.д.

Данные

Аэрологические данные

Радиозондовые данные, поступающие из сети ГСТ, обрабатываются и накапливаются в массиве «Аэростас» в разделе Госфонда ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД» (Казначеева и др., 1980; Руденкова, 2010). Массив включает в себя данные более чем по 800 аэрологическим станциям и охватывает период с 1978 г. для российских станций и с 1984 г. для зарубежных станций по текущее время. Содержанием массива являются аэрологические наблюдения на стандартных изобарических поверхностях и особых точках. Для анализа были выбраны 42 станции, расположенные в разных географических зонах. Из первоначально выбранных 50 станций часть была отбракована по разным причинам, в том числе из-за пропусков в спутниковых или аэрологических данных. Часть станций с одноразовым зондированием также была отброшена, так как расчеты осажденной воды только по дневным или только по ночным зондированиям могут различаться на величину до 10–15%, особенно в летние месяцы и в тропических широтах. Список использованных станций с географическими координатами и количеством зондирований за 2013 г. приведен в *табл. 1*.

Индекс	Широта	Долгота	Количество зондирований
01001	70,93	-8,67	1060
02185	65.55	22.13	361
03005	60,13	-1,18	732
03743	51,20	-1,80	610
04018	63,97	-22,60	696
04220	68,70	-52,85	721
04270	61,18	-45,42	727
04360	65,60	-37,63	668
08160	41,67	-1,02	650
10548	50,57	10,38	730
11120	47,27	11,35	346
11952	49,03	20,32	730
13275	44,78	20,53	721
16245	41,65	12,43	723
17130	39,95	32,88	739
22113	68,98	33,12	730
23205	67,65	53,02	639
23921	60,68	60,43	713
23933	60,97	69,07	720
27199	58,60	49,63	730
27612	55,75	37,57	664
34009	51,65	36,18	726
35229	50,17	57,09	714
35394	49,48	73,09	723
38341	42,51	71,23	726
40417	26,44	49,81	565
41024	21,70	39,18	685
41217	24,43	54,65	713
41256	23,58	58,28	332
60018	28,32	-16,38	868
60571	31,62	-2,23	677
62306	31,33	27,22	461
71081	68,78	-81,25	719
71600	43,93	-60,02	727
71603	43,87	-66,10	727
71816	53,30	-60,37	690
71836	51,27	-80,65	728
71907	58,47	-78,08	718
72206	30,50	-81,70	725
72208	32,90	-80,03	727
72317	36,08	-79,95	732
72318	37,21	-80,41	732

Таблица 1. Географические координаты аэрологических станций и количество зондирований в 2013 г.

Количество осажденной воды Q рассчитывалось по формуле:

$$Q=\frac{1}{g}\cdot\int_{P_0}^{P_1}qdp,$$

где q – удельная влажность, рассчитываемая через дефицит точки росы D, температуру воздуха T и давление p, g – ускорение свободного падения, P_0 и P_1 – давление на верхней и нижней границе слоя (300 и 1000 гПа).

Спутниковые данные

Спутниковые данные вертикального зондирования атмосферы поступают по сети ГСТ в формате сводок САТЕМ (Наставление, 2011), обрабатываются и накапливаются в массиве «Спутниковые данные о давлении, температуре и влажности на высотах» раздела Госфонда ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД» (Хохлова и др., 2014). Обработка включает в себя раскодировку и формирование структурированных файлов. К настоящему моменту в массиве накоплены данные с 2009 г. по текущее время. Содержанием массива являются глобальные сведения о толщине слоев и содержании влаги в слоях между стандартными изобарическими поверхностями. Пространственное разрешение составляет 1°×1°. В основном это данные со спутников NOAA-12, NOAA-15, NOAA-17 и NOAA-18. Представление об охвате спутниковыми наблюдениями можно получить из рис. 1, где показано суммарное количество спутниковых измерений влажности за 2 месяца 2013 года в квадратах 5° широты на 10° долготы для Северного полушария. Здесь же кружками нанесены точки расположения аэрологических станций. Спутниковые наблюдения охватывают как сушу, так и океан, при этом их количество существенно превышает количество радиозондовых измерений, поэтому при условии адекватности спутниковых наблюдений их использование для анализа климатических характеристик может быть незаменимо, т.к. позволяет осветить регионы, где отсутствуют другие источники информации. Вместе с тем, имеются регионы с крайне скудным освещением.



Рис. 1. Количество спутниковых данных по влажности в квадратах 5° широты на 10° долготы за январь 2013 г. (а) и за июль 2013 г. (б). Черными кружками показано расположение аэрологических станций

Сравнение выполнено для количества осажденной воды в слое 1000–300 гПа для следующих величин: срочные данные по 4 центральным месяцам сезонов 2013 г. и среднемесячные данные за 2013 год. Спутниковые данные отбирались таким образом, чтобы аэрологическая станция находилась внутри соответствующего квадрата 1°×1°. Для полученных таким образом спутниковых и радиозондовых данных был построен временной ход количества осажденной воды за 2013 г., по которому определялись среднемесячные значения.

Результаты

Срочные данные

На *рис.* 2 показан временной ход количества осажденной воды по срочным измерениям за 2 месяца (январь и июль) для нескольких станций. Поскольку аэрологические и спутниковые измерения проводятся в разное время суток, то для синхронизации



Рис. 2. Временной ход срочных значений количества осажденной воды за 2 месяца 2013 г. Сплошная линия – радиозондовые измерения, кружки – спутниковые. Сверху вниз: а – станция 01001, б – станция 27612, в – станция 17130

измерений по оси абсцисс отложен сквозной час внутри месяца. Из рисунков можно получить общее представление о соответствии аэрологических и спутниковых данных. Количество спутниковых наблюдений сильно различается в разных регионах. Получить какие-либо количественные оценки различий в срочных наблюдениях затруднительно, вместе с тем можно видеть, что на части станций имеется хорошее совпадение, в то время как на части станций аэрологические наблюдения сильно занижены по сравнению со спутниковыми (например, станция 17130, Анкара). Аналогичная картина наблюдается еще на нескольких тропических и субтропических станциях, расположенных в Алжире, Египте и Саудовской Аравии.

Среднемесячные данные

На *рис. 3* приведен временной ход среднемесячных значений количества осажденной воды за 2013 год по нескольким станциям. Здесь видно, что совпадение в общем качественно хорошее, за исключением того же тропического региона, например, станции 17130 (Анкара). Даже на тех станциях, где разности незначительны, в летние месяцы аэрологические данные, как правило, дают значения несколько ниже спутниковых, что согласуется с выводами, полученными из литературных источников.



Рис. 3. Временной ход среднемесячных значений количества осажденной воды за 2013 г. Сплошная линия – радиозондовые измерения, пунктир – спутниковые. Станции: а – 01001, б - 27612, в – 17130, г – 60571

Анализ разностей между спутниковыми и аэрологическими измерениями по среднемесячным значениям

На *рис.* 4 дано географическое распределение коэффициентов корреляции между среднемесячными спутниковыми и радиозондовыми данными. Коэффициенты корреляции составляют практически везде не менее 0,95, за исключением субтропического региона.



Рис. 4. Коэффициенты корреляции между среднемесячными значениями количества осажденной воды по радиозондовым и спутниковым данным

На следующем рисунке (*puc. 5*) даны географические распределения абсолютных разностей спутниковых и радиозондовых данных за январь и июль 2013 г. Здесь также видно, что максимальные разности имеют место в основном летом в тропических и субтропических широтах.



Рис. 5. Географическое распределение абсолютных разностей количества осажденной воды между спутниковыми и радиозондовыми данными, а - январь, б – июль

Согласно выводам, сделанным в ряде исследований, такое систематическое расхождение в тропическом регионе может быть обусловлено «сухим смещением» радиозондовых данных, а также национальными особенностями применяемой аппаратуры (Египет, Саудовская Аравия, Алжир). В то же время нельзя утверждать, что спутниковые данные всегда адекватно отражают содержание влаги в атмосфере. Примером может служить станция 60571 (Бешар, Алжир). Станция расположена на высоте около 800 м над уровнем моря в 200 км от берега моря в зоне аридного климата, осадков там практически не бывает, поэтому значения влажности, даваемые радиозондовыми измерениями, представляются более адекватными, чем спутниковые, однако для проверки этого необходимы специальные исследования с привлечением дополнительных источников информации.

Заключение

Совместный анализ среднемесячных радиозондовых и спутниковых данных по содержанию влаги в тропосфере показал в целом хорошее совпадение в умеренных широтах исследуемого региона, при этом в летний период спутниковые наблюдения дают несколько большее влагосодержание, чем радиозондовые. Аэрологические станции, расположенные в тропической и субтропической зоне, показывают существенно заниженные по сравнению со спутниковыми измерениями значения влагосодержания. В летнее время эта разность существенно возрастает. В целом это согласуется с имеющимися в литературных источниках выводами о систематическом «сухом смещении» радиозондовых наблюдений. Однако нельзя с уверенностью сказать, что это специфика радиозондовых измерений. Анализ географического положения и климатических условий ряда станций наводят на мысль о большей адекватности аэрологических измерений. Для решения этого вопроса требуется отдельное исследование с привлечением дополнительных источников информации.

Литература

- 2. Наставление по кодам. Международные коды. Том I.1 (Дополнение II к Техническому регламенту ВМО). Часть А. Буквенно-цифровые коды. ВМО-№ 306. Женева: ВМО, 2011. 520 с.
- Руденкова Т.В. Формат архивации текущих аэрологических данных, поступающих по каналам связи для ПЭВМ // Труды ВНИИГМИ-МЦД. Обнинск. 2010. Вып. 174. С. 41–63.
 Хохлова А. В., Руденкова Т. В., Агуренко А. О., Георгиева Л. А., Тимофеев А. А. Спутниковые данные
- вертикального зондирования атмосферы из сети ГСТ: технология обработки и архивация // Труды ВНИИГМИ-МЦД. 2014. Вып.178. С. 61–82.
- Basha G., Ratnam M. V., Krishna Murthy B. V. Upper tropospheric water vapour variability over tropical latitudes observed using radiosonde and satellite measurements // J. Earth Syst. Sci. 2013. Vol. 122. No. 6. P. 1583–1591.
 Dai A. Recent Climatology, Variability, and Trends in Global Surface Humidity // J. of Climate. 2006. Vol. 19.
- P. 3589-3606.
- Hartmann D.L., Klein Tank A.M.G., Rusticucci M., Alexander L.V., Brönnimann S., Charabi Y., Dentener F.J., Dlugokencky E.J., Easterling D.R., Kaplan A., Soden B.J., Thorne P.W., Wild M. and Zhai P.M. Observations: Atmosphere and Surface. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group

^{1.} Казначеева В. Д., Коротков А. П., Нагорная Т. С., Руденкова Т. В. Организация информационной базы данных аэрологических наблюдений (ГМБД «АЭРОЛОГИЯ») // Труды ВНИИГМИ-МЦД. Обнинск. 1980. Вып. 81. С. 3-42.

I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change: Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 2013. 254 p.

- John V. Ö., Buehler S. Ä. Comparison of microwave satellite humidity data and radiosonde profiles: A survey of 8. European stations // Atmospheric Chemistry and Physics. 2005. Vol. 5 (7). P. 1843–1853. Moradi I., Buehler S.A., John V.O. Comparing upper troposphere humidity from microwave satellite instruments
- 9. and IGRA radiosonde data. // Proceedings of 11th Specialist Meeting on Microwave Radiometry and Remote Sensing of the Environment MicroRad 2010. March 2010, Washington, DC, USA. P. 146–151.
- 10. Moradi I., Buehler S.A., John V.O., Reale A., Ferraro R.R. Evaluating Instrumental Inhomogeneities in Global Radiosonde Upper Tropospheric Humidity Data Using Microwave Satellite Data // Geoscience and Remote Sensing. 2013. Vol. 51. P. 3615–3624.
- 11. Simmons A. J., K. Willett M., Jones P. D., Thorne P. W., Dee D. P. Low-frequency variations in surface atmospheric humidity, temperature, and precipitation: Inferences from reanalyses and monthly gridded observational data sets // J. Geophys. Res. 2010. Vol. 115. D01110.
- Schröder M., Roca R., Picon L., Kniffka A., and Brogniez H. Climatology of free-tropospheric humidity: extension 12. into the SEVIRI era, evaluation and exemplary analysis // Atmos. Chem. Phys. 2014. Vol. 14. P. 111291-1148.

Comparison of satellite and radiosonde observations of troposphere humidity

A.V. Khokhlova, A.O. Agurenko

Russian Scientific Research Institute of Hydrometeorological Information – World Data Center Obninsk 249031, Russia *E-mail: anna x@meteo.ru; alina@meteo.ru*

Radiosonde and satellite observations of precipitated water amount in the 1000-300-hPa layer are compared. The observations were made in 2013. Data from 42 upper-air stations located at 20°-70°N and 80°W-75°E and Global Telecommunication System (GTS) satellite data obtained from NOAA satellites as CATEM reports are used. Upperair and satellite data processing and accumulation are performed by FSBI "RIHMI-WDC". The paper presents comparison results of hourly and mean monthly data. Monthly means of precipitated water amount at moderate latitudes are shown to be in good agreement, with summer satellite observations giving a slightly larger water content than radiosonde observations. Correlation coefficients of mean monthly satellite and radiosonde data are no less than 0,95 nearly everywhere, except for the subtropical region. At subtropical and tropical latitudes, radiosonde measurements, as compared to satellite observations, show a lower water content, particularly in summer, which is also confirmed by conclusions made in the research on a regular "dry bias" of radiosonde data. However, the analysis of climatic conditions, at least for individual stations, makes one believe that it is necessary to conduct further investigations on data comparison with additional information sources involved.

Keywords: troposhere, precipitated water, satellite measurements, radiosonde measurements, comparison

References

- Kaznacheeva V. D., Korotkov A. P., Nagornaya T. S., Rudenkova T. V., Organizatsiya informatsionnoi bazy dannykh aerologicheskikh nablyudenii, GMBD "AEROLOGIYa" (Organization of inform data base on aerological observations, GMDB AEROLOGYA), *Trudy VNIIGMI-MTsD*, Obninsk: 1980, Issue 81, pp. 3–42. *VMO No. 306*, Zheneva: VMO, 2011, p. 520. 1.
- 2.
- Rudenkova T.V., Format arkhivatsii tekushchikh aerologicheskikh dannykh, postupayushchikh po kanalam svyazi dlya PEVM (Format for archiving of current aerological data incoming by communication channels for PC), *Trudy VNIIGMI-MTsD*, Obninsk: 2010, Issue 174, pp. 41–63. Khokhlova A. V., Rudenkova T. V., Agurenko A. O., Georgieva L. A., Timofeev A. A., Sputnikovye dannye ver-3
- 4. tikal'nogo zondirovaniya atmosfery iz seti GST: tekhnologiya obrabotki i arkhivatsiya (Satellite data of vertical sounding of the atmosphere from GST: technology of processing and archiving), Trudy VNIIGMI-MTsD, Obninsk: 2014, Issue 178, pp. 61–82. Basha G., Ratnam M. V., Krishna Murthy B. V., Upper tropospheric water vapour variability over tropical latitudes
- 5. observed using radiosonde and satellite measurements, J. Earth Syst. Sci., 2013, Vol. 122, No. 6, pp. 1583–1591.
- Dai A., Recent Climatology, Variability, and Trends in Global Surface Humidity, J. of Climate, 2006, Vol. 19, 6. pp. 3589-3606.
- Hartmann D.L., Klein Tank A.M.G., Rusticucci M., Alexander L.V., Brönnimann S., Charabi Y., Dentener F.J., Dlugokencky E.J., Easterling D.R., Kaplan A., Soden B.J., Thorne P.W., Wild M., Zhai P.M., Observations: 7.

Atmosphere and Surface, Climate Change 2013, The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, *Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York*, NY, USA, 2013, p. 254.

- John V. O., Buehler S. A., Comparison of microwave satellite humidity data and radiosonde profiles: A survey of European stations, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2005, Vol. 5 (7), pp. 1843–1853.
- 9. Moradi I., Buehler S.A., John V.O., Comparing upper troposphere humidity from microwave satellite instruments and IGRA radiosonde data, *Proceedings of 11th Specialist Meeting on Microwave Radiometry and Remote Sensing of the Environment MicroRad 2010*, March 2010, Washington, DC, USA, pp. 146–151.
- Moradi I., Buehler S.A., John V.O., Reale A., Ferraro R.R., Evaluating Instrumental Inhomogeneities in Global Radiosonde Upper Tropospheric Humidity Data Using Microwave Satellite Data, *Geoscience and Remote Sensing*, 2013, Vol. 51, pp. 3615–3624.
 Simmons A. J., K. Willett M., Jones P. D., Thorne P. W., Dee D. P., Low-frequency variations in surface atmo-
- 11. Simmons A. J., K. Willett M., Jones P. D., Thorne P. W., Dee D. P., Low-frequency variations in surface atmospheric humidity, temperature, and precipitation: Inferences from reanalyses and monthly gridded observational data sets, *J. Geophys. Res.*, 2010, Vol. 115, D01110.
- 12. Schröder M., Roca R., Picon L., Kniffka A., Brogniez H., Climatology of free-tropospheric humidity: extension into the SEVIRI era, evaluation and exemplary analysis, *Atmos. Chem. Phys.*, 2014, Vol. 14, pp. 11129–11148.