

Оперативный мониторинг осадков по данным радиометра SEVIRI с геостационарных метеоспутников серии Meteosat

Е. В. Волкова, Е. В. Садовникова

ФГБУ «НИЦ «Планета»
123242, Москва, Большой Предтеченский пер., д.7.
E-mail: quantocosa@bk.ru

В 1980 г. стартовала программа глобальных климатических исследований (the World Climate Research Program, WCRP). Главная её цель – исследование возможностей прогноза изменений климата и оценка влияния человеческой деятельности на климат [4]. Одной из составных частей WCRP является проект измерения осадков в глобальном масштабе (the Global Precipitation Measurement, GPM), т.к. осадки являются важной составной частью глобального водно-энергетического баланса и оказывают заметное влияние на климат Земли, который, в свою очередь, влияет на этот баланс.

Наземная осадкомерная сеть распределена по территории Земного шара неравномерно: плотная в густонаселённых районах и практически отсутствует над морями и океанами, в горных и пустынных регионах, а также в тропических и таёжных лесах. Осадкомерная сеть считается «хорошей», если на территории размером $1 \times 1^\circ$ присутствует 20 осадкомерных станций, т.е. 1 станция на $\sim 500 \text{ км}^2$. Всего в мире сейчас действует около 6500-7000 таких станций. Их наблюдения переносятся на сетку $2,5^\circ$ с целью построения глобальных карт осадков. Это непростая задача, т.к. расхождения в оценках месячных и годовых сумм осадков для соседних метеостанций могут достигать 100-200 %, а относительно фоновых значений – $\pm 50\%$ и более [4].

С целью обеспечения полного покрытия поверхности Земли наблюдениями за осадками в рамках WCRP существует проект глобальной климатологии осадков (the Global Precipitation Climatology Project, GPCP). Цель проекта – обеспечить сбор данных об осадках по спутниковым наблюдениям для оценок их региональных, сезонных и годовых вариаций [4]. Спутниковые наблюдения за осадками позволяют получать оценки с существенно более высоким разрешением, чем наземная осадкомерная сеть, практически для всего Земного шара.

Существует много методик оценок интенсивности осадков (I) по разным видам спутниковой информации [5]. Большинство из них определяют среднюю I для некоторого периода времени (например, час), а затем суммирует её с целью получения сумм осадков за более длинные периоды времени. Требования, предъявляемые Всемирной Метеорологической Организацией (ВМО) и пользователями к информации об осадках, сильно варьируют в зависимости от дальнейших целей её использования [5].

В ФГБУ «НИЦ «Планета» создана автоматизированная технология оперативного субглобального мониторинга суточных, месячных и годовых сумм осадков ($\Sigma I_{\text{сут}}$, $\Sigma I_{\text{мес}}$, $\Sigma I_{\text{год}}$) по данным радиометра SEVIRI КА серии Meteosat (точки стояния 0 и $41,5^\circ$ в.д.) в составе АПК «SEVIRIncepFULLuni» [2]. Выходные продукты получаются в виде растровых карт и числовых матриц для полного круга обзора спутникового прибора с исходным разрешением. Для расчёта $\Sigma I_{\text{сут}}$ используется информация о максимальной в пределах пиксела мгновенной интенсивности осадков, полученной АПК

«SEVIRIncepFULLuni». По серии из 8 спутниковых наблюдений в течение суток (стандартные синоптические сроки) рассчитывается средняя за сутки интенсивность осадков и затем умножается на коэффициент-константу (см. рис. 1). Значения $\Sigma I_{\text{мес}}$ и $\Sigma I_{\text{год}}$ получаются простым суммированием соответственно значений $\Sigma I_{\text{сут}}$ и $\Sigma I_{\text{мес}}$ (см. рис. 2 и 3).

Проведена авторская валидация оценок $\Sigma I_{\text{сут}}$, $\Sigma I_{\text{мес}}$ и $\Sigma I_{\text{год}}$ за 2021 г. результатами наземных измерений $\Sigma I_{\text{сут}}$, климатическими оценками $\Sigma I_{\text{год}}$ (с учётом годовых аномалий осадков по данным ВМО [6] и Росгидромета [3]) и аналогичными оценками сумм осадков другой спутниковой методики (выходные продукты АПК «SEVIRIexeterFULL») [1] для полного круга обзора обоих приборов SEVIRI и отдельно для Европейской территории России и сопредельных стран (регион «ЕТР», территория 49-54° с.ш. и 31-43° в.д.) (с исходным разрешением) и Центрально-Чернозёмного региона («ЦЧР», на регулярной сетке 1' по широте и 1,5' по долготе, территория 47,16-63,0° с.ш. и 20,0-51,25° в.д.). Полученные оценки точности позволяют говорить о высоком качестве выходных продуктов АПК «SEVIRIncepFULLuni» по суммам осадков. Точность методики сопоставима с аналогичными продуктами, получаемыми по данным наземных наблюдений и другим спутниковым методикам. По сравнению с технологией [1] карты получаются более детальными и подробными, с более высоким пространственным разрешением и в оперативном режиме (сразу после окончания суток (BCB)) (см. рис. 3).

Субглобальные спутниковые значения $\Sigma I_{\text{год}}$ для соответствующих зональных поясов находятся в хорошем согласии с глобальными климатическими оценками $\Sigma I_{\text{год}}$ (с учётом несовпадающих размеров сравниваемых территорий): местоположение основных минимумов и максимумов, а также их глубина могут считаться условно совпавшими по данным обоих спутниковых приборов (см. рис. 4). Средние для всего круга обзора SEVIRI/Meteosat-11 среднегодовые значения $\Sigma I_{\text{сут}}=2,44$ мм ниже, чем глобальные климатические (т.к. более влажные территории оказались за пределами зоны видимости прибора), а для SEVIRI/Meteosat-8 $\Sigma I_{\text{сут}}=2,73$ мм – выше, чем для SEVIRI/Meteosat-11 и немного выше глобальных (т.к. в зону видимости прибора попадают районы в азиатском регионе с максимальными для Земного шара значениями $\Sigma I_{\text{год}}$). По данным наземной осадкомерной сети и спутниковым оценкам CMAP и SSM/I среднее глобальное значение $\Sigma I_{\text{сут}}=2,61\pm 0,23$ мм/сут [4]. Таким образом, субглобальные спутниковые оценки $\Sigma I_{\text{сут}}$ по данным обоих приборов SEVIRI/Meteosat вполне укладываются в этот диапазон.

На рис. 2 показан пример мониторинга осадков по спутниковой информации о $\Sigma I_{\text{мес}}$. Видно, что положение минимумов и максимумов $\Sigma I_{\text{мес}}$ имеет хорошо выраженный годовой ход: максимум осадков, связанный с ВЗК, «следует за солнцем»: в декабре и марте он находится преимущественно к югу от экватора, а в июне и сентябре – преимущественно к северу от него. Над сушей в умеренных широтах северного полушария существенно больше осадков выпадает летом, чем зимой.

Для спутниковых оценок $\Sigma I_{\text{год}}$ ошибки (отклонение от наземных измерений на метеостанциях) в подавляющем большинстве случаев не превышают $\pm 25\%$ от измеренной величины, для оценок $\Sigma I_{\text{мес}}$ – от четверти до трети реально выпавших осадков в тёплый период года и $\pm 10-15\%$ от измеренного значения в холодный период (см. табл. 2 и 3 и рис. 6). Диапазон изменчивости значений $\Sigma I_{\text{год}}$ для региона «ЕТР» вполне укладывается как в климатические оценки с учётом аномалий за 2021 г. по данным ВМО [6] и Росгидромета [3] (над большей частью ЕТР осадков выпало на 10-20 % больше климатической нормы), так и в разброс измеренных значений $\Sigma I_{\text{год}}$ на метеостанциях в пределах «ЦЧР». Выше

климатической нормы значения $\Sigma_{\text{год}}$ (более 800 мм) отмечены обоими АПК в районе Москвы (по наземным измерениям 818 мм).

Для спутниковых оценок $\Sigma_{\text{сут}}$ расхождения с наземными наблюдениями существенно больше (см. табл. 1 и рис. 5) – отмечается сглаживание спутниковой информации относительно наземных оценок: уменьшается величина максимумов (особенно в летнее время) и увеличиваются значения минимумов (особенно в холодный период года), а также может отмечаться смещение максимумов выпадения осадков относительно их реального местоположения при больших значениях высоты верхней границы облачности и угла спутникового визирования (viz). Однако в среднем за месяц для лета спутниковые оценки $\Sigma_{\text{сут}}$ получаются переоцененными относительно наземных. Возможной причиной этого следует считать проблемы адекватного сопоставления двух видов (спутниковых и наземных) наблюдений за $\Sigma_{\text{сут}}$. И главная из них – проблема пространственного сдвига спутниковых оценок выпадающих осадков относительно реального их места выпадения при больших viz и высоте верхней границы облачности (ВГО). Это подтверждается визуальным анализом карт интенсивности и сумм осадков с нанесёнными на них результатами аналогичных наземных наблюдений: на картах хорошо видно смещение района выпадения осадков по спутниковым данным относительно района аналогичной интенсивности по наземным измерениям. И чем выше ВГО, тем, как правило, выше интенсивность осадков и больше смещение (для «ЦЧР» и «ЕТР» по данным обоих спутниковых приборов $\text{viz}=5-7,7^\circ$). Поэтому для лета переоценки (а также значения dev и СКО) больше, чем для зимы. Кроме того, в тёплый период года осадки часто более интенсивные, локальные и кратковременные, чем в холодный.

В целом, технология наиболее пригодна для субглобального мониторинга $\Sigma_{\text{мес}}$ и $\Sigma_{\text{год}}$, особенно в районах с редкой осадкомерной сетью. При визуальном анализе полей значений $\Sigma_{\text{сут}}$, $\Sigma_{\text{мес}}$ и $\Sigma_{\text{год}}$ хорошо видна общая тенденция увлажнения территории (преобладающие максимальные и минимальные значения сумм осадков, местоположение экстремумов). Оценки сумм осадков получаются скорее максимальными (для небольших значений Σ) или средними (для больших значений Σ) для площади пиксела, поэтому в его пределах возможны как более высокие, так и низкие значения. Спутниковые оценки сумм осадков (особенно $\Sigma_{\text{сут}}$) совершенно непригодны для автоматического попиксельного сопоставления с данными наземных наблюдений на метеостанциях из-за пространственного сдвига спутниковых измерений относительно реальных, а также из-за разных пространственных масштабов спутниковых (площадных) и наземных (точечных) наблюдений.

Результаты оценок $\Sigma_{\text{мес}}$ и $\Sigma_{\text{год}}$ КПМ по данным SEVIRI/Meteosat представлены на <https://www.planet.iitp.ru> (см. «Климатические данные» для каждого года и каждого КА).

Литература

1. Волкова Е.В. Оценки сумм осадков по данным радиометра SEVIRI с геостационарных метеоспутников серии Meteosat // Материалы 18й Всероссийской открытой конференции с международным участием "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса", 16-20 ноября 2020 г., ИКИ РАН, Москва, 2020. С. 142. doi 10.21046/18DZZconf-2020a. ISBN 978-5-00015-052-8.

2. Волкова Е.В., Кухарский А.В. Автоматизированный программный комплекс оперативного мониторинга параметров облачного покрова, осадков, опасных явлений погоды и подстилающей поверхности в пределах круга обзора радиометра SEVIRI с

геостационарных метеоспутников серии MSG // Материалы 19й Международной конференции "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса". Электронный сборник материалов конференции. ИКИ РАН, Москва, 2021. С. 159. doi 10.21046/19DZZconf-2021a. ISBN 978-5-00015-008-5.

3. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2021 год. Федеральная Служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет). Москва, 2022. 110 с.

4. Gruber A., Levizzani V. Assessments of global precipitation products. A project of the WORLD Climate Research Programme Global Energy and Water Cycle Experiment (GEMEX) Radiation Panel, WCRP-128, May 2008. WMO/TD – No.1430. 50 pp.

5. Kidd C., Levizzani V., Laviola S. Quantitative Precipitation Estimation from Earth Observation Satellites – Rainfall: State of Science // Geophysical Monograph Series 191. 2010. P. 127-158.

6. WMO statement on the state of the global climate in 2021. WMO, 2022. No 1290. 54 pp.

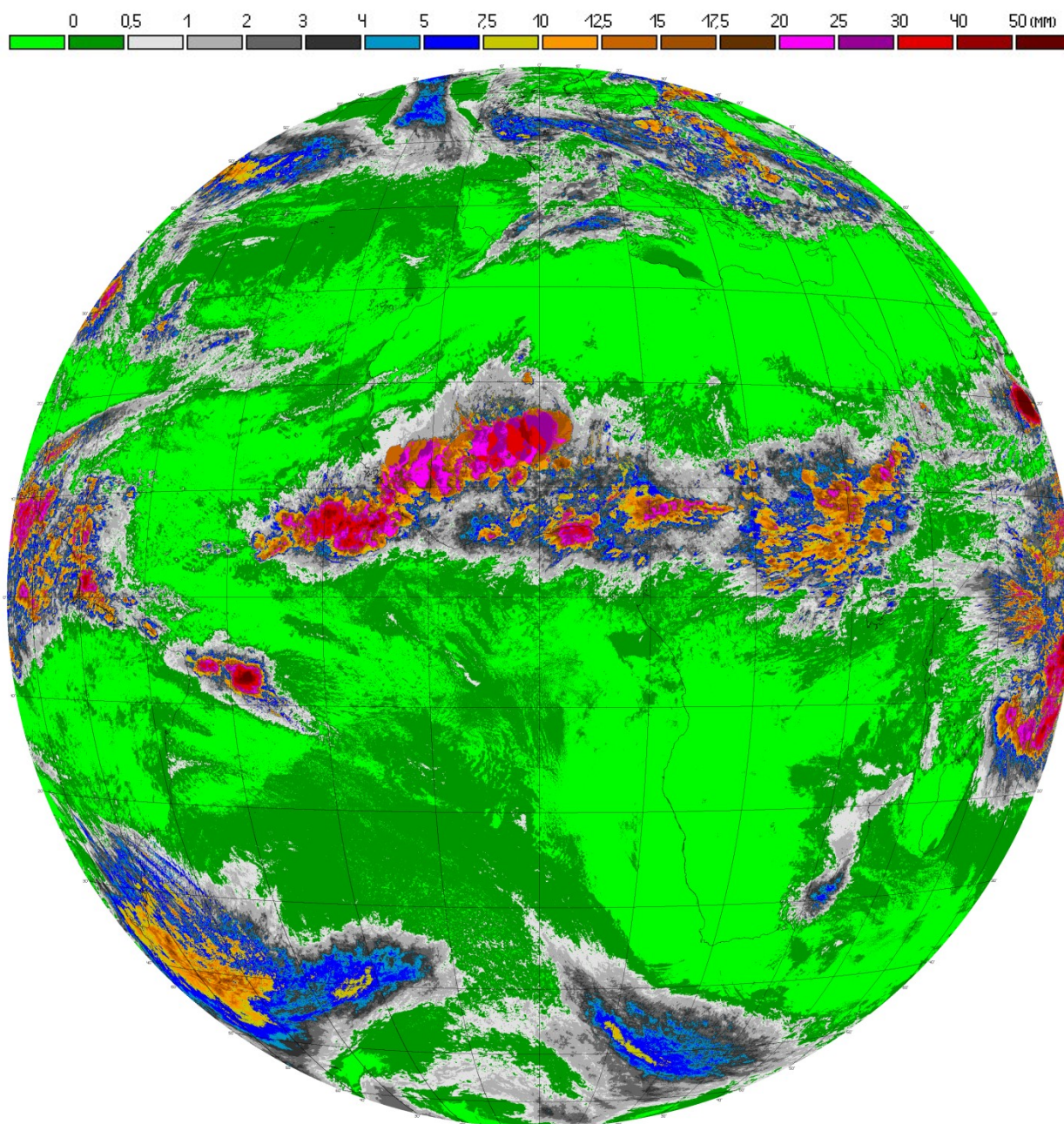


Рис. 1. Суточные суммы осадков (мм) (SEVIRI/Meteosat-11 (0° в.д.), АПК «SEVIRIncepFULLuni», 18 июня 2020 г.)

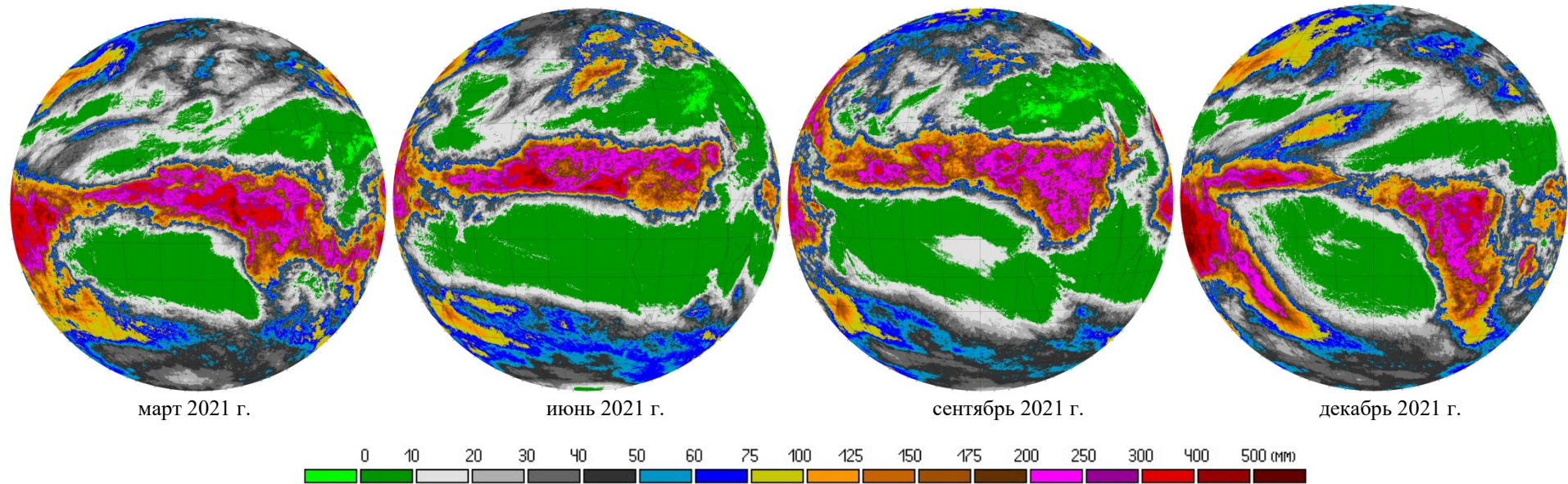


Рис. 2. Месячные суммы осадков (мм) (SEVIRI/Meteosat-11 (0° в.д.), АПК «SEVIRIncepFULLuni»)

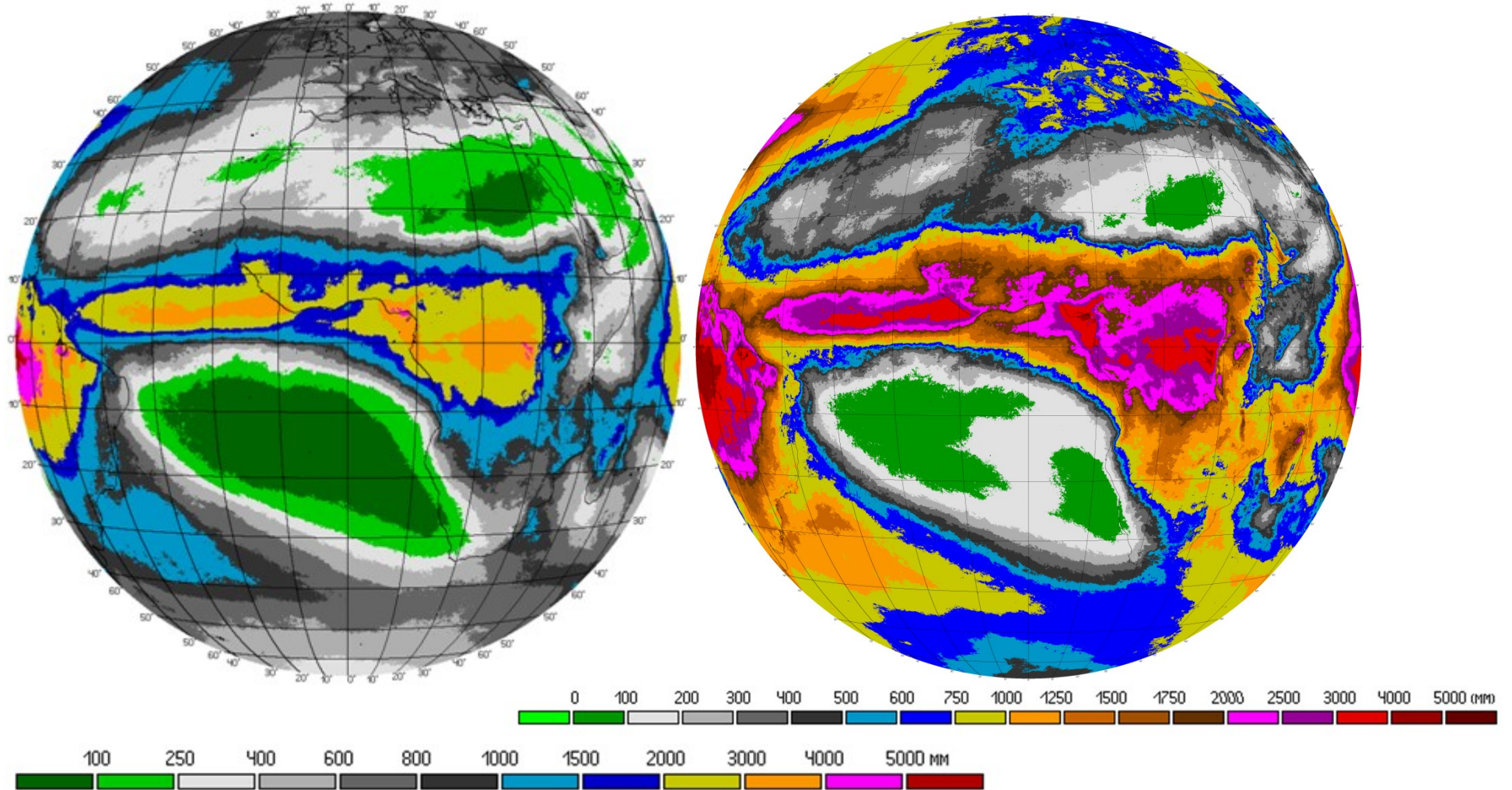


Рис. 3. Годовые (2021 г.) суммы осадков по данным SEVIRI/Meteosat-11 (0° в.д.) - выходные продукты АПК «SEVIRIexeterFULL» (слева) и АПК «SEVIRIncepFULLuni» (справа)

Таблица 2. Сопоставление средних за период времени оценок $\Sigma I_{\text{мес}}$ по спутниковым (SEVIRI/Meteosat (0 и 41,5° в.д.)) и наземным данным (43 метеостанции ЦЧР (Центрально-чернозёмный регион)), 2021 г.

| период времени | средние по метеостанциям ЦЧР | | | | средние по региону | | | | | |
|---|--------------------------------------|--------------------------------------|---------|---------|--------------------|-------|-------|-----|-------|-------|
| | ср. $\Sigma I_{\text{метеос}}$ мм | ср. ΣI_{seviri} мм | dev, мм | СКО, мм | ЦЧР | | | ЕТР | | |
| | | | | | min | сред. | max | min | сред. | max |
| <i>АПК «SEVIRIncepFULLuni» (SEVIRI/Meteosat-11 (0° в.д.))</i> | | | | | | | | | | |
| «лето» | 53,6 | 69,2 | -15,5 | 40,0 | 1,5 | 71,4 | 207,1 | 1,5 | 72,4 | 268,1 |
| «зима» | 46,5 | 53,8 | -7,3 | 21,8 | 16,0 | 53,7 | 123,6 | 8,4 | 55,9 | 230,4 |
| год | 50,6 | 62,8 | -12,3 | 32,4 | 1,5 | 64,0 | 207,1 | 1,5 | 65,5 | 268,1 |
| <i>АПК «SEVIRIncepFULLuni» (SEVIRI/Meteosat-8 (41,5° в.д.))</i> | | | | | | | | | | |
| «лето» | 53,6 | 77,4 | -23,8 | 49,5 | 1,4 | 75,1 | 220,8 | 0,9 | 77,6 | 302,4 |
| «зима» | 46,5 | 55,2 | -8,7 | 26,4 | 15,0 | 54,1 | 179,0 | 4,2 | 55,1 | 199,5 |
| год | 50,6 | 68,1 | -17,5 | 39,8 | 1,4 | 66,4 | 220,8 | 0,9 | 68,2 | 302,4 |
| <i>АПК «SEVIRIexeterFULL» (SEVIRI/Meteosat-11 (0° в.д.))</i> | | | | | | | | | | |
| «лето» | 53,6 | 71,3 | -17,8 | 42,8 | 14,0 | 72,0 | 197,8 | 8,6 | 68,7 | 220,5 |
| «зима» | 46,5 | 40,4 | 6,0 | 14,5 | 13,3 | 42,4 | 81,8 | 2,8 | 35,6 | 91,2 |
| год | 50,6 | 58,5 | -7,9 | 33,3 | 14,0 | 59,7 | 197,8 | 2,8 | 54,9 | 220,5 |
| <i>АПК «SEVIRIexeterFULL» (SEVIRI/Meteosat-8 (41,5° в.д.))</i> | | | | | | | | | | |
| «лето» | 53,6 | 69,3 | -15,8 | 41,0 | 7,5 | 70,1 | 188,3 | 7,2 | 65,3 | 207,6 |
| «зима» | 46,5 | 38,2 | 8,2 | 19,5 | 12,4 | 40,0 | 76,4 | 1,8 | 31,2 | 87,6 |
| год | 50,6 | 56,4 | -5,8 | 32,0 | 7,5 | 57,6 | 188,3 | 1,8 | 51,1 | 207,6 |

Таблица 3. Сопоставление климатических, наземных и спутниковых (SEVIRI/Meteosat (0 и 41,5° в.д.)) оценок $\Sigma I_{\text{год}}$ (мм) за 2021 г. (средние и диапазон изменчивости по региону)

| Методика, прибор | по метеостанциям ЦЧР | | по региону | | | |
|---|----------------------|-----------------|----------------------|----------|-----------------|----------------|
| | наземные наблюдения | SEVIRI/Meteosat | климатические оценки | | SEVIRI/Meteosat | |
| | | | ЦЧР | ЕТР | ЦЧР | ЕТР |
| <i>АПК «SEVIRIncepFULLuni» (SEVIRI/Meteosat-11)</i> | 607 (405-877) | 753 (655-890) | 400-700 | 100-2000 | 768(378-1029) | 783 (187-1456) |
| <i>АПК «SEVIRIncepFULLuni» (SEVIRI/Meteosat-8)</i> | | 818 (672-1049) | | | 749 (311-1163) | 767 (104-1439) |
| <i>АПК «SEVIRIexeterFULL» (SEVIRI/Meteosat-11)</i> | | 702 (610-843) | | | 716 (556-931) | 659 (263-979) |
| <i>АПК «SEVIRIexeterFULL» (SEVIRI/Meteosat-8)</i> | | 677 (595-836) | | | 691 (520-906) | 679 (254-979) |

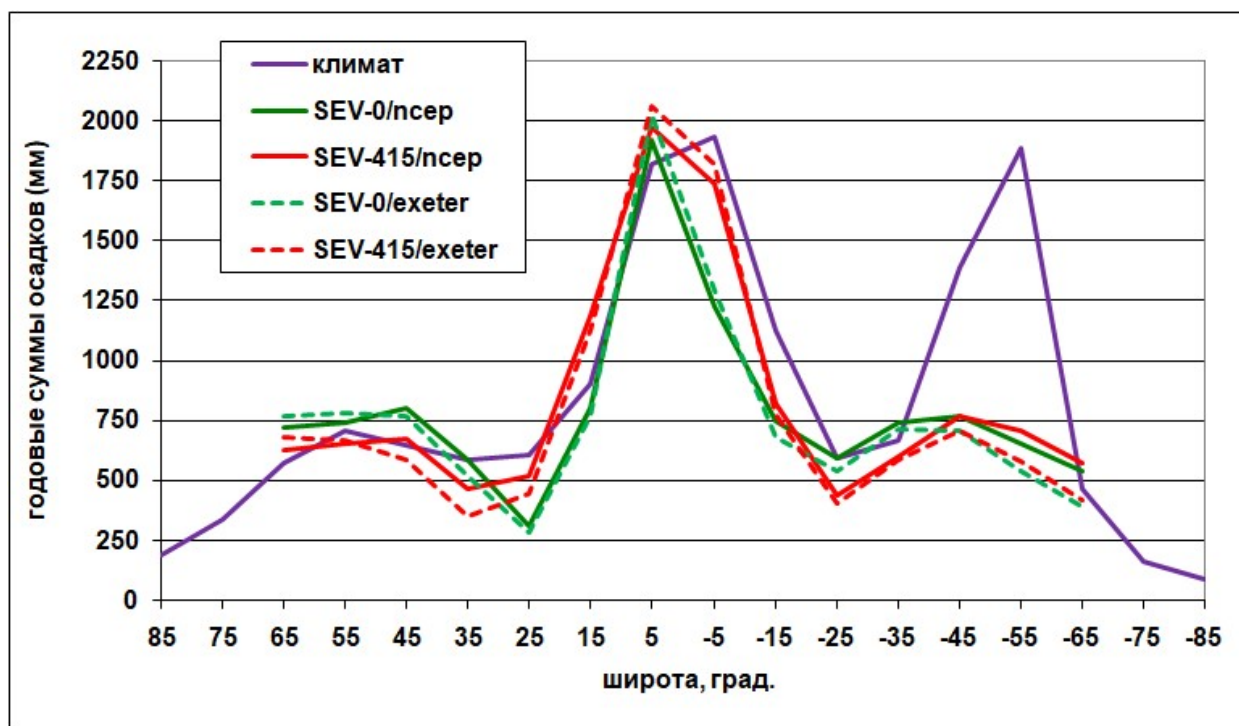


Рис. 4. Зонально-среднённый ход значений $\Sigma I_{год}$: глобальных климатических данных и субглобальных для территории обзора SEVIRI/Meteosat-11 (0° в.д.) и SEVIRI/Meteosat-8 ($41,5^\circ$ в.д.) при использовании данных прогноза NCEP GFS и анализа Exeter

Таблица 1. Средние по региону «ЕТР» за большие периоды времени (2021 г.) статистики отклонения спутниковых (SEVIRI/Meteosat-11 (0° в.д.) и SEVIRI/Meteosat-8 ($41,5^\circ$ в.д.), АПК «SEVIRIncepFULLuni») оценок $\Sigma I_{сут}$ от наземных метеонаблюдений (dev – отклонение спутниковой оценки от наземных, $|dev|$ – абсолютное отклонение, СКО – среднее квадратичное отклонение, PP – количество случаев с допустимой ошибкой (err))

| периоды выборки | dev , мм | $ dev $, мм | СКО, мм | PP, % | | |
|---|-------------|--------------|------------|-----------------|-------------------|-----------------|
| | | | | $err \leq 1$ мм | $err \leq 2,5$ мм | $err \leq 5$ мм |
| <i>SEVIRI/Meteosat-11 (0° в.д.)</i> | | | | | | |
| «лето» | -0,7 | 2,8 | 5,7 | 48,6 | 68,7 | 83,7 |
| «зима» | -0,2 | 2,0 | 3,8 | 49,3 | 73,1 | 90,8 |
| год | -0,5 | 2,5 | 4,9 | 48,9 | 70,5 | 86,7 |
| <i>SEVIRI/Meteosat-8 ($41,5^\circ$ в.д.)</i> | | | | | | |
| «лето» | -0,7 | 2,7 | 5,5 | 49,8 | 69,3 | 84,3 |
| «зима» | -0,1 | 1,8 | 3,4 | 54,3 | 77,4 | 92,5 |
| год | -0,5 | 2,3 | 4,6 | 51,6 | 72,7 | 87,7 |

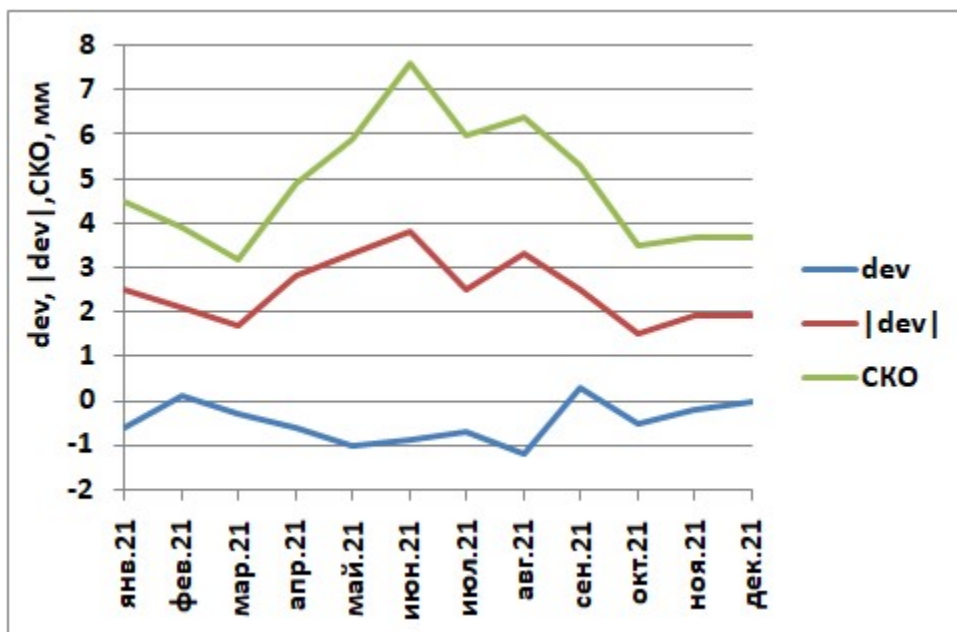


Рис. 5. Годовой ход средних за месяц статистик отклонения спутниковых (SEVIRI/Meteosat-11 (0° в.д.), АПК «SEVIRInserFULLuni») оценок Σ сут от наземных наблюдений за 2021 г. для региона «ETP»

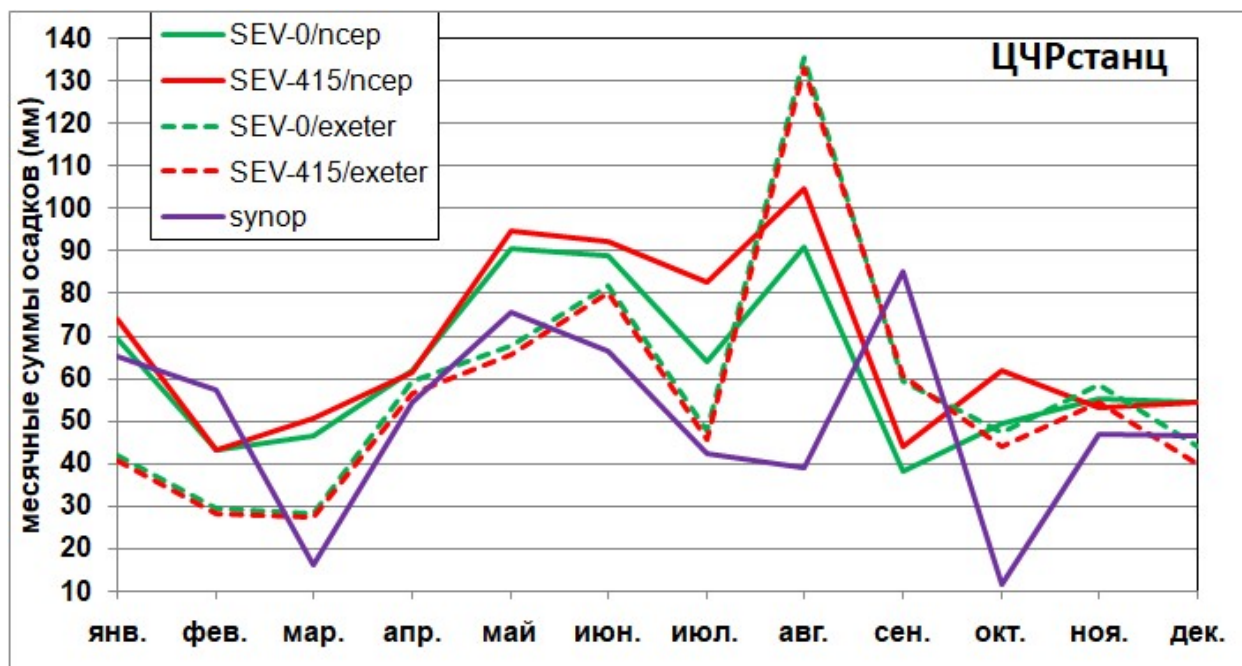


Рис. 6. Годовой ход средних по 43 метеостанциям в пределах региона «ЦЧР» значений $\Sigma I_{\text{мес}}$ по наземным и спутниковым (SEVIRI/Meteosat-11 (0° в.д.) и SEVIRI/Meteosat-8 ($41,5^\circ$ в.д.) при использовании прогноза NCEP GFS и анализа Exeter) данным