



Суммы осадков по данным радиометра SEVIRI с геостационарных метеоспутников серии Meteosat

Е.В. Волкова

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

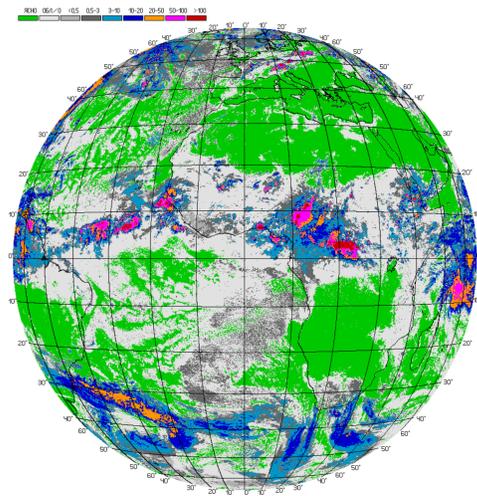


Рис. 1. Максимальная месячная интенсивность осадков (мм/ч) (SEVIRI/Meteosat-11, 11 октября 2019 г., 11:43 ВСУ)

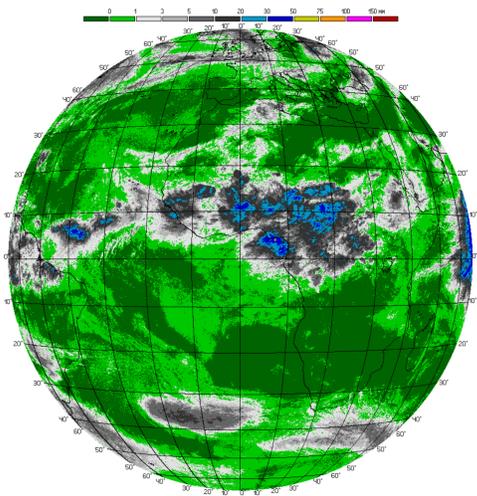


Рис. 2. Суточные суммы осадков (мм) (SEVIRI/Meteosat-11, 18 октября 2019 г.)

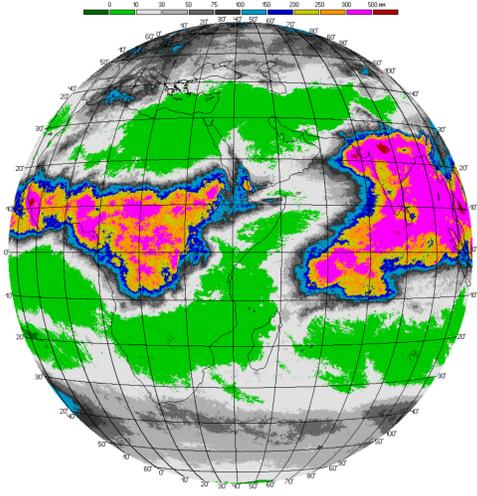


Рис. 3. Месячные суммы осадков (мм) (SEVIRI/Meteosat-8, сентябрь 2019 г.)

Хорошее качество спутниковой информации по осадкам подтверждается и при сопоставлении спутниковых и наземных. Например, для ЦПР ЕТР спутниковые и наземные оценки $\Sigma_{ос}$ в 2015, 2017 и 2018 гг. были близки к климатической норме, а в 2016 и 2019 гг. оказались более влажными в обоих случаях. Средне по региону отклонения спутниковых значений $\Sigma_{ос}$ и $\Sigma_{ос}$ от наземных оценок, выраженные в среднесуточной интенсивности осадков за этот период времени (среднегодовые или среднemesячные $\Sigma_{ос}$, т.е. значения $\Sigma_{ос}$ и $\Sigma_{ос}$, деленные на количество дней за расчетный период), не превосходят $\pm 0,5$ мм/сут (для разных периодов времени обычно не более 10-25% от измеренной величины).

В целом, спутниковые оценки дают более слаженное представление о выпавших осадках, чем наземные наблюдения. Так, для ЦПР ЕТР по наземным данным за последние 10 лет средние по региону $\Sigma_{ос}$ = 420-650 мм (для разных лет) при климатической норме – 500-600 мм, а значения $\Sigma_{ос}$ для соседних метеостанций менялись от 315 до 970 мм (для одного и того же года различия для соседних метеостанций достигали 1,5-2 раз).

Территория обзора радиометра SEVIRI/Meteosat занимает около 1/3 площади Земного шара. Анализ значений $\Sigma_{ос}$ средних для разных широтных поясов (зонально-средние), в т.ч. и для всей территории обзора SEVIRI/Meteosat, и сопоставление с глобальными оценками (см. табл. 1 и рис. 6) показывают, что хотя абсолютные значения $\Sigma_{ос}$ заметно отличаются, так как, например, Тихий океан для большинства широтных поясов более «влажный», чем для территории обзора радиометров SEVIRI/Meteosat, однако тенденция зонального хода, в основном, сохраняется. Действительно, при сопоставлении среднегодовых спутниковых значений $\Sigma_{ос}$ с оценками GPCP (Gruber, Levizzani, 2008) заметны хорошо выраженный максимум в районе экватора (15° с.ш. - 15° ю.ш.), связанный с внутритропической зоной конвергенции (ВЗК), и 2 минимума (20-40° с.ш. и 15-30° ю.ш.) – зоны сухих тропиков, что хорошо согласуется с климатической информацией (Дроздов и др., 1989; Gruber, Levizzani, 2008).

Средние для всего круга обзора среднегодовые значения $\Sigma_{ос}$ по оценкам КИМ немного ниже, чем глобальные климатические (см. табл. 1), т.к. более влажные территории оказались за пределами зоны видимости SEVIRI/Meteosat. Среднегодовые значения $\Sigma_{ос}$ для всего круга обзора SEVIRI/Meteosat-8 немного выше, чем для данных SEVIRI/Meteosat-10, -11 (см. табл. 1) из-за того, что последний захватывает более «сухие» регионы.

По данным наземной осадочной сети и спутниковым оценкам CMAP и SSM/I среднее глобальное значение $\Sigma_{ос}$ составляет 2,61±0,23 мм/сут (Gruber, Levizzani, 2008). Субглобальные оценки $\Sigma_{ос}$ по КИМ вполне укладываются в этот диапазон (см. табл. 1) и за последние 4 года показывают слабый неуклонный рост, особенно заметный в приэкваториальном регионе.

При сравнении оценок средних за квартал значений $\Sigma_{ос}$ по КИМ (см. рис. 7) с аналогичными оценками GPCP (Gruber, Levizzani, 2008) видно, что положение минимумов и максимумов имеет хорошо выраженный годовой ход. Максимум осадков, связанный с ВЗК, «следует за солнцем»: в период с декабря по февраль он находится к югу от экватора, а с июня по июль – к северу от него. Над сушей в умеренных широтах северного полушария существенно больше осадков выпадает летом, чем зимой. Все то же самое касается и значений $\Sigma_{ос}$, а также средних за месяц $\Sigma_{ос}$.

Таким образом, созданный в ЕЦ «Планета» программный комплекс «Climate-Spre» на основе описанной выше методики позволяет получать оценки $\Sigma_{ос}$, $\Sigma_{ос}$ и $\Sigma_{ос}$ автоматически в субоперативном режиме для всей территории обзора радиометра SEVIRI/Meteosat (MSG) по информации о значениях $I_{ос}$, рассчитываемых КИМ, и, в результате, проводить субглобальный климатический мониторинг режима увлажнения территории, особенно для районов с редкой осадочной сетью. Точность оценок сумм осадков сопоставима с аналогичными продуктами, получаемыми по данным наземных метеонаблюдений и другим спутниковым методикам. Однако с увеличением значений угла спутникового визирования отмечается некоторое «ослаживание» спутниковой информации относительно наземных оценок – уменьшаются величина максимумов и увеличиваются значения минимумов сумм осадков в связи с ростом площади пикселя, для которого проводятся оценки.

| Зональные пояса | GPCP | CMAP | SSM/I | Σ | КИМ | | | | | | | |
|---------------------|------|------|-------|----------|-----------------------------------|------|------|--------------------------------|------|------|------|------|
| | | | | | SEVIRI/Meteosat-10, -11 (0° в.д.) | | | SEVIRI/Meteosat-8 (41,5° в.д.) | | | | |
| | | | | | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2017 | 2018 | 2019 |
| 50-90° с.ш. | 1,75 | 1,25 | - | 1,50 | 2,11 | 2,10 | 2,16 | 2,07 | 2,22 | 2,01 | 1,75 | 1,96 |
| 25-50° с.ш. | 2,33 | 2,19 | 2,41 | 2,31 | 1,49 | 1,51 | 1,38 | 1,48 | 1,44 | 1,15 | 1,33 | 1,23 |
| 25° с.ш. - 25° ю.ш. | 3,12 | 3,55 | 3,10 | 3,25 | 2,70 | 2,80 | 2,86 | 2,87 | 3,00 | 3,38 | 3,54 | 3,68 |
| 25-50° ю.ш. | 2,60 | 2,47 | 2,40 | 2,49 | 2,04 | 1,94 | 1,85 | 1,94 | 1,96 | 1,51 | 1,60 | 1,68 |
| 50-90° ю.ш. | 2,07 | 1,11 | - | 1,59 | 1,40 | 1,26 | 1,39 | 1,39 | 1,37 | 1,46 | 1,45 | 1,48 |
| глоб. | 2,61 | 2,61 | - | 2,61 | 2,32 | 2,36 | 2,36 | 2,40 | 2,48 | 2,58 | 2,70 | 2,79 |

Примечание. GPCP – the Global Precipitation Climatology Project (наземные метеонаблюдения), CMAP – the Climate Prediction Center Merged Analysis of Precipitation (спутниковые ИК и пассивные микроволновые наблюдения), SSM/I – the Special Sensor Microwave/Imager (спутниковые СВЧ наблюдения), Σ – суммарно по трем методикам (1988-2003 гг.) (Gruber, Levizzani, 2008).

ФГБУ «НИЦ «Планета»
Россия, 123242, Москва,
Б. Предтеченский пер., 7
Тел: (499) 252-37-17
Факс: (499) 252-66-10
http://planet.itp.ru
E-mail: asmas@planet.itp.ru

Комплексная пороговая методика (КИМ), разработанная автором в ФГБУ ЕЦ «НИЦ «Планета», предназначена для круглосуточного определения параметров облачного покрова и осадков по данным радиометра SEVIRI/Meteosat для всего круга обзора (угол спутникового визирования (viz) не более 7,7°) методом попиксельного дешифрирования и классификации в автоматическом режиме. В качестве предикторов КИМ усваивает измерения альбедо и радиационной температуры в каналах 1-10, а также их разности. Пороговые значения рассчитываются для каждого пикселя спутникового изображения как функции высоты места над уровнем моря ($h_{ос}$), приземной температуры воздуха, номера календарного дня от начала года, высоты солнца, viz и др. (Волкова, Успенский, 2010). Дополнительно используются данные численного анализа Exeter, UK (пространственное разрешение 2,5°, сроки 0 и 12 ч ВСУ) полей температуры воздуха на 9ти стандартных барических уровнях в атмосфере, приземной температуры воздуха и атмосферного давления на уровне моря, а также цифровая карта рельефа (gtor30).

При реализации КИМ соблюдается строгий порядок выполнения пошаговой классификации, т.к. большинство параметров облачного покрова, получаемых на ранних этапах работы КИМ, используется в дальнейшем. Методика определения значений $I_{ос}$ основана на положениях (Matsuev, 1965), что осадки определенной интенсивности выпадают из облаков соответствующих форм (по классификации ВМО) в зависимости от температуры (приземной, на верхней и нижней границах облака (ВГО, НГО)), высоты ВГО и НГО, фазового состояния воды в облачных частях, влажности и водозасапа облака. В КИМ вероятность выпадения и интенсивность осадков оцениваются косвенно по набору спектральных и других характеристик облака (преимущественно для ВГО). Классификация осуществляется в направлении увеличения значений $I_{ос}$, т.е. от отсутствия осадков до максимальных значений $I_{ос}$. Решающее правило состоит из нескольких тестов (одновременно должно выполняться несколько условий). Значения $I_{ос}$ получаются по 8ми градациям I (0, <0,5, 0,5-3, 3-10, 10-20, 20-50, 50-100, >100 мм/ч) с сохранением исходного разрешения спутниковой информации. Пример определения $I_{ос}$ см. на рис. 1.

Вероятность корректного детектирования (POD – Probability of Detection) зон осадков по КИМ при сопоставлении с наземными метеонаблюдениями за погодой составляет не менее 70% (в среднем 75-85%) и зависит от региона, времени суток, сезона и др. (Волкова, Успенский, 2010; Волкова, Успенский, 2015). Точность оценок $I_{ос}$ ниже в холодный период года и в темное время суток, при наличии температурных инверсий, в горах и на границе «суша/вода» с большой амплитудой температуры, а также при больших значениях viz. На нее влияют точность и разрешение (пространственное и временное) дополнительной информации.

Обычно размеры зон осадков, выделенных с помощью КИМ, получаются немного больше, чем по данным наземных наблюдений, из-за проблемы «частично заполненных» пикселей, так как класс «осадки» назначается для всей площади пикселя, независимо от доли в нем облачности, реально дающей осадки. Получаемые оценки $I_{ос}$ означают, что в данный момент времени в пределах пикселя спутникового изображения (с линейным размером ~4-12 км в зависимости от viz) существует небольшой участок облака (размером от нескольких десятков до сотен метров), дающий или способный в течение ближайших 15-20 мин дать осадки такой интенсивности на протяжении короткого промежутка времени (обычно несколько минут). При этом с вероятностью 70-90% (в зависимости от времени суток, сезона, $h_{ос}$, типа облачности, viz и др.) осадков более высокой интенсивности в пределах этого пикселя наблюдаться не будет. С вероятностью 10-30% осадки в пределах этого пикселя могут иметь $I > I_{ос}$, но не более чем на 1 класс/градацию. Средняя по площади пикселя I намного ниже, чем $I_{ос}$. Также ниже времени между сроками спутниковых наблюдений.

При сопоставлении спутниковой и наземной информации об осадках необходимо принимать во внимание следующее:

- 1) размеры элемента разрешения спутниковых данных существенно больше размеров территории, для которой производится наблюдения на метеостанции, поэтому результаты точных наземных наблюдений не всегда хорошо совпадают с площадными спутниковыми оценками, так как к классу «осадки заданной интенсивности» причисляется весь пиксель изображения, хотя осадки детектированной интенсивности могут выпадать из небольшого участка облака и не фиксироваться наземным наблюдателем;
- 2) существует временной сдвиг между моментами нахождения осадков в облаке и их выпадением на поверхность земли;
- 3) в зависимости от температуры и влажности воздуха, а также скорости ветра в подоблачном слое, размера облачных частиц и их фазы реальные значения интенсивности осадков в подоблачном слое и у поверхности земли могут сильно различаться, например, из-за возможного испарения капель летом или разветвления снежинок на большую, чем облако, территорию зимой;
- 4) при больших значениях viz в зависимости от высоты ВГО происходит пространственное смещение облаков на спутниковом изображении относительно их реального положения.

При создании и для валидации методики оценок $\Sigma_{ос}$ использовались данные наблюдений радиометров SEVIRI/Meteosat-10, -11 (точка стояния 0° в.д., территория 69° с.ш. - 69° ю.ш. и 69° з.д. - 69° в.д.) за 2015-2019 гг. и SEVIRI/Meteosat-8 (точка стояния 41,5° в.д., территория 69° с.ш. - 69° ю.ш. и 27,5° з.д. - 110,5° в.д.) за 2017-2019 гг. с периодичностью 3 ч (8 наблюдений в сутки) для всего круга обзора радиометра с исходным разрешением. С помощью КИМ для каждого пикселя спутникового изображения определялись значения $I_{ос}$ для каждого заданного срока спутникового наблюдения в течение суток, а затем для него рассчитывались значения средней за сутки интенсивности осадков ($I_{ос,сут}$) по серии спутниковых наблюдений: $I_{ос,сут} = \Sigma_{ос} / N_{срок}$, где $\Sigma_{ос}$ – сумма значений $I_{ос}$, а $N_{срок}$ – количество спутниковых наблюдений за сутки. Для расчета $\Sigma_{ос}$ использовались средние для градаций значения $I_{ос}$ (0,3, 1,5, 6,5, 15, 35, 75, 150 мм/ч). Далее значения $\Sigma_{ос}$ вычислялись по формуле: $\Sigma_{ос,сут} = a \cdot I_{ос,сут}$, где a – эмпирически полученный коэффициент-константа. Месячные ($\Sigma_{ос,мес}$) суммы осадков получались простым суммированием значений $\Sigma_{ос,сут}$, а годовые ($\Sigma_{ос,год}$) – суммированием значений $\Sigma_{ос,мес}$ за соответствующие периоды времени (Волкова, 2014). Примеры определения $\Sigma_{ос,сут}$, $\Sigma_{ос,мес}$, $\Sigma_{ос,год}$ см. соответственно на рис. 2-4.

Исследования автора показали, что наилучшие результаты в среднем для всех лет и всей территории обзора радиометров SEVIRI/Meteosat получаются при использовании коэффициента-константы $a=0,55$ (автором не было выявлено никакой зависимости величины этого коэффициента от географической широты, сезона или значений viz), однако для отдельных регионов и отдельных периодов времени значения коэффициента a могут немного (на $\pm 0,05$) отличаться.

Оптимальным количеством сроков спутниковых наблюдений при расчете $I_{ос,сут}$ является 8 (через 3 ч). При отсутствии «стандартного» срока спутникового наблюдения используется соседний наиболее близкий к нему срок, отстоящий от пропущенного не более чем на ± 1 ч. Применение большего количества сроков спутниковых наблюдений для расчета $I_{ос,сут}$ нецелесообразно, т.к. при отсутствии заданных сроков проблематичен поиск сроков их замещающих (особенно если отсутствуют несколько сроков подряд), а неравномерно распределенные сроки спутниковых наблюдений в течение суток могут приводить к перекашиванию выборки, когда использование слишком близко расположенных сроков возле пропущенного приводит к ложному увеличению или уменьшению $I_{ос,сут}$. Использование меньшего количества сроков в течение суток приводит к потере кратковременных ситуаций «осадками» или «без осадков», случившимися между сроками, и в результате – к ошибочному определению значений $I_{ос,сут}$ (соответственно его занижению или завышению).

В редких случаях по техническим причинам не представляется возможным рассчитать значения $\Sigma_{ос,сут}$ по спутниковым данным. В этом случае значения $\Sigma_{ос,мес}$ (в большей степени) и $\Sigma_{ос,год}$ (в меньшей степени) оказывают заниженными относительно реальных. Для решения этой проблемы используется коррекция рассчитанных значений $\Sigma_{ос,мес}$: $\Sigma_{ос,мес} = b \cdot \Sigma_{ос,мес}$, где $b = N_{мес} / N_{ос}$, где $N_{ос}$ – количество дней с расчетами в течение месяца, $N_{мес}$ – количество календарных дней в месяце.

При настройке и валидации методики в качестве контрольных использовались:

- данные наземных наблюдений за $\Sigma_{ос}$ на 48 метеостанциях, расположенных в пределах Центрально-Чернозёмного региона (ЦЧР) ЕТР за период 2009-2019 гг.;
- климатические данные о $\Sigma_{ос}$ и о среднегодовых $\Sigma_{ос}$ (глобальные и для территории России и СССР) (Дроздов и др., 1989; Мазин, Хрещан, 1989; Семенов и др., 1991; Трещников, 1988; Хромов, Мамонтова, 1974; Gruber, Levizzani, 2008);
- данные об аномальных относительно нормы осадках за 2015-2018 гг. (ВМО, 2016; ВМО, 2017; ВМО, 2018; ВМО, 2019; ВМО, 2020; <https://www.meteoinfo.ru>; Росгидромет, 2017; Росгидромет, 2018; Росгидромет, 2019; Росгидромет, 2020; <https://www.ncdc.noaa.gov>).

Результаты оценок $\Sigma_{ос,мес}$ и $\Sigma_{ос,год}$ КИМ по данным SEVIRI/Meteosat за 2015-2019 гг. представлены на <https://www.planet.itp.ru> (см. «Климатические данные») для каждого года и каждого метеоспутника.

В работе (Gruber, Levizzani, 2008) показано, что за последние 25 лет средний глобальный режим увлажнения практически не изменился. Несмотря на то, что в отдельные годы и для отдельных регионов отмечалось аномальное выпадение осадков, в среднем за год и в глобальном масштабе особых изменений в количестве выпавших осадков замечено не было. Поэтому субглобальные спутниковые (по КИМ) оценки осадков за 2015-2019 гг. сравнивались с климатической информацией и с климатическими аномалиями, т.е. отклонениями от нее за отдельные годы.

Выполненные разными авторами климатические оценки $\Sigma_{ос}$ могут заметно различаться, например, местоположение и глубина минимумов и максимумов $\Sigma_{ос}$ (ср. Gruber, Levizzani, 2008; Семенов и др., 1991; Дроздов и др., 1989; Мазин, Хрещан, 1989; Трещников, 1988; Хромов, Мамонтова, 1974). Так, по данным GPCP (Gruber, Levizzani, 2008) появляются максимумы $\Sigma_{ос}$ над Атлантикой у берегов Северной и Южной Америк, которые отсутствуют по данным других авторов. Эти же максимумы присутствуют и на картах, полученных автором по данным SEVIRI/Meteosat (см., например, рис. 5). Положение других максимумов (север Южной Америки, Западная и Центральная Африка, Южный океан, небольшие локальные максимумы у берегов Скандинавии, на юге Центральной Европы, на востоке Черного моря, на востоке Центральной Африки и юге Аравийского полуострова) и минимумов (Атлантика у берегов Западной Африки, Южная Атлантика, Сахара, Аравийский полуостров, Южная Африка, Испания, Антарктида) хорошо согласуется между собой по данным всех анализируемых источников.

Абсолютные значения минимумов и максимумов $\Sigma_{ос}$ по спутниковым данным также хорошо согласуются с климатом, особенно если принять во внимание годовые аномалии для 2015-2019 гг. и тот факт, что климатические карты оказываются более сглаженными, так как происходит осреднение информации за несколько лет и карты строятся обычно на более грубой сетке (например, 2,5° для GPCP).

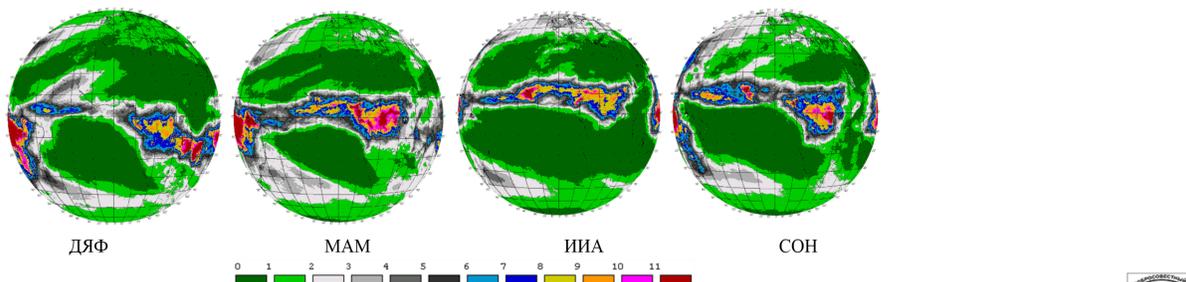


Рис. 7. Квартальные суммы осадков (мм) за 2015 г. (SEVIRI/Meteosat-10). Примечание. ДЯФ – декабрь-февраль, МАМ – март-май, ИИА – июнь-август, СОН – сентябрь-ноябрь

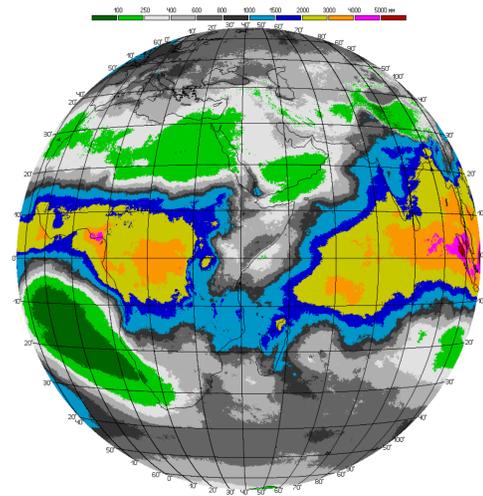


Рис. 4. Годовые суммы осадков (мм) (SEVIRI/Meteosat-8, 2019 г.)

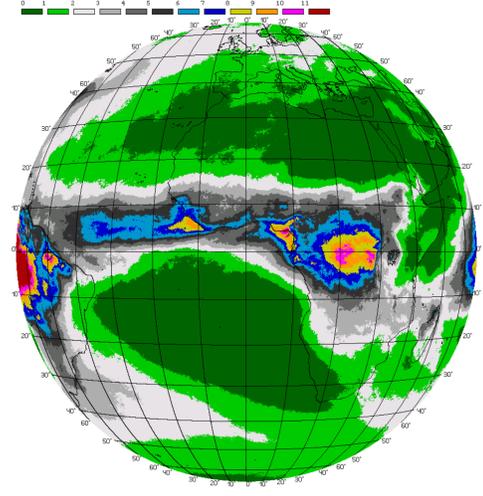


Рис. 5. Среднегодовые $\Sigma_{ос}$ (мм) (SEVIRI/Meteosat-11, 2017 г.)

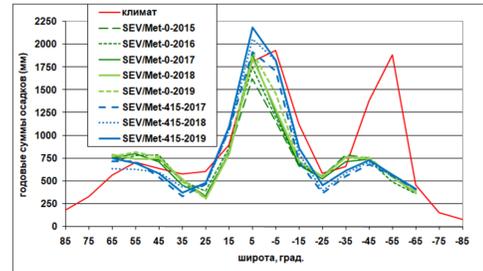


Рис. 6. Зональный ход значений $\Sigma_{ос}$: глобальных климатических данных (Дроздов и др., 1989) и субглобальных для территории обзора SEVIRI/Meteosat (0 и 41,5° в.д.)

Литература

1. Волкова Е.В. Определение сумм осадков по данным радиометров SEVIRI/Meteosat-9,10 и AVHRR/NOAA для Европейской территории России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 4. С. 163-177.
2. Волкова Е.В., Успенский А.Б. Оценки параметров облачного покрова и осадков по данным сканирующих радиометров полярно-орбитальных и геостационарных метеоспутников // Исследования Земли из космоса. 2015. № 5. С. 30-43.
3. Волкова Е.В., Успенский А.Б. Оценки параметров облачного покрова по данным геостационарного МИСЗ Meteosat-9 круглосуточно в автоматическом режиме // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7. № 3. С. 16-22.
4. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2016 год. Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет). Москва. Росгидромет, 2017. 70 с.
5. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2017 год. Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет). Москва. Росгидромет, 2018. 69 с.
6. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2018 год. Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет). Москва. Росгидромет, 2019. 79 с.
7. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2019 год. Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет). Москва. Росгидромет, 2020. 97 с.
8. Дроздов О.А., Васильев В.А., Кобышева Н.В., Равский А.Н., Смакова Л.К., Школьный Е.П. Климатология. Л.: Гидрометиздат, 1989. 568 с.
9. Заявление ВМО о состоянии глобального климата в 2015 году. ВМО, 2016. № 1167. 24 с.
10. Заявление ВМО о состоянии глобального климата в 2017 году. ВМО, 2018. № 1212. 40 с.
11. Мазин И.П., Хрещан А.Х. Облака и облачная атмосфера. Справочник. Л.: Гидрометиздат, 1989. 647 с.
12. Матвеев Л.Т. Основы общей метеорологии. Физика атмосферы. Л.: Гидрометиздат, 1965. 874 с.
13. Семенов Ю.С., Авионов С.И., Борисенков Е.П., Волковичев О.А., Петров И.И., Рейнбаум Р.Г., Стрнов В.И., Черников А.А. Атмосфера. Справочник. Л.: Гидрометиздат, 1991. 510 с.
14. Трещников А.Ф. Географический энциклопедический словарь. Понятия и термины. М.: Советская энциклопедия, 1988. 432 с.
15. Хромов С.П., Мамонтова Л.И. Метеорологический словарь. Л.: Гидрометиздат, 1974. 568 с.
16. 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.
17. WMO statement on the state of the global climate in 2016. WMO, 2017. No 1189. 28 pp.
18. WMO statement on the state of the global climate in 2018. WMO, 2019. No 1233. 39 pp.
19. WMO statement on the state of the global climate in 2019. WMO, 2020. No1248. 40 pp.

