Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 4. С. 163–177

Определение сумм осадков по данным радиометров SEVIRI/Meteosat-9,10 и AVHRR/NOAA для Европейской территории России

Е.В. Волкова

ФГБУ «НИЦ Космической гидрометеорологии «Планета», Москва, 123242, Россия
E-mail: quantocosa@bk.ru

В «НИЦ «Планета»» автором была создана комплексная пороговая методика (КПМ) автоматической попиксельной классификации данных измерений радиометра SEVIRI с геостационарного спутника серии Meteosat и радиометра AVHRR с полярно-орбитального спутника серии NOAA с целью получения параметров облачного покрова, осадков и опасных явлений погоды в круглосуточном режиме независимо от типа подстилающей поверхности для Европейской территории России (ЕТР). На основе данных о мгновенной максимальной интенсивности осадков, получаемых КПМ, автором было разработано два варианта методики для оценок суточных сумм осадков для ЕТР: с коэффициентами-константами, полученными для той же самой месячной выборки, по которой рассчитываются суммы осадков, и с коэффициентами, непрерывно меняющимися и зависящими от номера календарного дня. В обоих случаях расчёт суточных сумм осадков осуществляется путём нормирования средней за сутки интенсивности осадков, рассчитанной по серии спутниковых наблюдений в течение суток, на эмпирический коэффициент. При настройке и валидации методики использовались синхронные спутниковым данные наблюдений на метеостанциях, расположенных на юге ЕТР, за количеством выпавших в течение суток осадков за период 2008-2013 гг. Получаемые методикой оценки суточных, месячных и годовых сумм осадков вполне удовлетворительно согласуются с данными наземных наблюдений и пригодны для визуального мониторинга режима увлажнения ЕТР. Большую точность обеспечивает использование комбинированных AVHRR&SEVIRI спутниковых изображений, позволяющее избежать недостатков, присущих каждому виду исходной информации: сглаженность оценок по данным SEVIRI из-за низкого пространственного разрешения и неравномерность распределения в течение суток наблюдений по информации AVHRR.

Ключевые слова: SEVIRI, Meteosat-9, Meteosat-10, AVHRR, NOAA, суточные и месячные суммы осадков, ЕТР.

Введение

Сведения о накопленных за некоторый период времени суммах осадков оказываются полезными для оценки влагозапасов почвы, стока вод с территории, условий вегетации и т.д. Проблемам детектирования осадков по спутниковым данным и определения сумм осадков, выпавших за разные периоды времени, посвящено большое количество работ, преимущественно зарубежных, выполнявшихся в т.ч. в рамках крупных международных проектов (например, GPCP (the Global Precipitation Climatology Project), TRMM (the Tropical Rainfall Measuring Mission) и др. (Gruber, Levizzani, 2008)). В работе (Kidd et al., 2010) представлен обзор разных способов наземных и спутниковых наблюдений за осадками, проведено сравнение их преимуществ и недостатков, затронуты проблемы сопоставления спутниковых и наземных оценок интенсивности и сумм осадков, приведены требования Всемирной Метеорологической Организации (ВМО) к спутниковой информации об осадках в зависимости от целей её использования. Большинство упомянутых в обзоре работ посвящено проблемам определения средней (например, в течение часа или между

сроками спутниковых наблюдений) интенсивности осадков по спутниковым данным при помощи дистанционных оценок спектральных характеристик облачности (радиационной температуры, яркости и т.п.) и другим дополнительным параметрам облаков (эффективный радиус, оптическая плотность и др.) с последующими оценками по всем этим характеристикам сумм осадков, выпавших за определённый период времени (сутки, месяц). Получаемые оценки предполагается использовать в качестве равноценной замены наземным измерениям осадков, особенно в районах с редкой сетью метеонаблюдений.

Данная работа продолжает исследования (Волкова, Успенский, 2010; Волкова, 2013) по практическому применению комплексной пороговой методики (КПМ) автоматического анализа данных измерений радиометра SEVIRI (Spinning Enhanced Visible and InfraRed Imager) с геостационарных метеоспутников серии Meteosat и радиометра AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) с полярно-орбитальных метеоспутников серии NOAA, разработанной в т.ч. для детектирования зон осадков и определения их мгновенной максимальной в пределах пиксела спутникового изображения интенсивности (I_{max}) в круглосуточном режиме независимо от типа подстилающей поверхности. Ниже рассмотрена возможность применения результатов работы КПМ для оценок суточных ($\Sigma I_{сут}$), месячных ($\Sigma I_{мес}$) и годовых ($\Sigma I_{год}$) сумм осадков для Европейской территории России (ЕТР) по измеренным со спутника значениям I_{max}. На основе предложенной методики возможно создание достаточно эффективной системы визуального мониторинга осадков.

Исходные данные и краткое описание КПМ

Комплексная пороговая методика предназначена для автоматического определения параметров облачного покрова и осадков по спутниковым данным в круглосуточном режиме. В качестве предикторов КПМ усваивает измерения радиометра AVHRR/NOAA в 5ти каналах и радиометра SEVIRI/Meteosat в 11ти каналах, а также их разности. Их пороговые значения рассчитываются для каждого пиксела спутникового изображения как функции разных параметров (Волкова, Успенский, 2010; Волкова, 2013). Дополнительно используются данные численного анализа/прогноза полей температуры воздуха на 9-ти стандартных барических уровнях, атмосферного давления на уровне моря и приземной температуры воздуха за сроки 00 и 12 ч ВСВ из БД ГМЦ России (элемент разрешения 2,5x2,5°), а также цифровая карта рельефа (gtopo30).

Для настройки и контроля методики использовались значения суточных сумм осадков, определённых по данным наземных наблюдений ($\Sigma I_{сут.назем.}$) на 48 метеостанциях, расположенных на юге ЕТР (49-54º с.ш. и 31-43º в.д.), для 2008-2013 гг. Спутниковые

данные для каждой метеостанции были доступны: по информации SEVIRI с Meteosat-9 и Meteosat-10 − от 1 до 96 (обычно 8) наблюдений в сутки; по информации AVHRR с NOAA-18 и NOAA-19 – от 1 до 8 (обычно 2-4) наблюдений в сутки. При сопоставлении спутниковых и наземных оценок сумм осадков рассматривались фрагменты изображения размером 3x3 пиксела для AVHRR/NOAA (размеры пиксела 1′ по широте и 1,5′ по долготе (1-2 км)) и 1x1 пиксел для SEVIRI/Meteosat (линейные размеры пиксела 6-9 км) с центром в метеостанции.

При реализации КПМ соблюдается строгий порядок выполнения пошаговой классификации, т.к. большинство параметров облачного покрова, получаемых на ранних этапах работы КПМ, используется на последующих этапах. Так, при детектировании зон осадков и определении значений I_{max} предварительно детектируется облачность, для неё оцениваются температура и высота верхней границы облачности (ВГО), фазовое состояние воды в облачных частицах в слое вблизи ВГО, максимальная водность облачного слоя, тип облачности, высота нижней границы облачности (НГО) и водозапас облачного слоя. Метод определения интенсивности осадков в КПМ основан на положениях (Матвеев, 1965), что осадки определённой интенсивности выпадают из облаков соответствующих форм (по классификации ВМО) в зависимости от высоты и температуры ВГО, высоты НГО, фазового состояния и водности облака. Пороговые значения предикторов в КПМ зависят от времени суток и сезона, высоты солнца, угла спутникового визирования, высоты места над уровнем моря, температуры воздуха у поверхности земли и на уровне моря и др. Классификация осуществляется в направлении усиления явления, т.е. от отсутствия осадков до их максимальных значений.

Значения I_{max} получаются по градациям интенсивности (0, <0,5, 0,5-3, 3-10, 10-20, 20-50, 50-100, >100 мм/ч для данных SEVIRI/Meteosat и 0, <1, 1-3, 3-8, 8-15, 15-25, 25-50, 50-100, >100 мм/ч для данных AVHRR/NOAA) с сохранением исходного разрешения спутникового изображения. Для расчёта $\Sigma I_{сут}$ используются средние для градаций значения I_{max} (0.3, 1.5, 6.5, 15, 35, 75, 150 мм/ч для оценок по SEVIRI/Meteosat и 0.5, 2, 5.5, 11.5, 20, 35, 75, 150 мм/ч для оценок по AVHRR/NOAA).

Вероятность корректного детектирования зон осадков по КПМ при сопоставлении с данными наземных метеонаблюдений за погодой в срок наблюдения составляет не менее 70% (в среднем 75-85%) и зависит от времени суток, сезона и пр. (Волкова, Успенский, 2010; Волкова, 2013). Работоспособность КПМ ухудшается в холодный период года и в тёмное время суток, в случае с температурными инверсиями, при больших углах спутникового визирования, для горных регионов и на границе «суша/вода» с большой амплитудой температур, а также при удалении срока спутникового наблюдения от срока, для ко-

торого получена дополнительная информация. Качество оценок также сильно зависит от точности и разрешения (пространственного и временно′го) дополнительной информации.

В целом, размеры зон осадков, выделенные с помощью КПМ, получаются несколько больше, чем по данным наземных наблюдений (вероятность выпадения осадков вне зоны «осадки» при сопоставлении с результатами наземных метео- и радиолокационных наблюдений может достигать 40% (в среднем 20-30%)), т.к. вероятность выпадения (в течение ближайших 15-30 мин) и интенсивность осадков оцениваются косвенно − по набору спектральных и других характеристик облака (преимущественно для ВГО). Получаемые оценки I_{max} означают, что в данный момент времени в пределах пиксела спутникового изображения (с линейным размером несколько километров) существует небольшой участок облака (размером несколько десятков-сотен метров), способный дать осадки такой интенсивности в течение достаточно короткого промежутка времени (обычно несколько минут). При этом с вероятностью 70-90% (в зависимости от времени суток, сезона, высоты места над уровнем моря, типа облачности, угла спутникового визирования и др.) осадков большей интенсивности в пределах этого пиксела наблюдаться не может. С вероятностью 10-30 % осадки могут иметь большую интенсивность, но не более чем на 1 градацию. В среднем же по пикселу интенсивность осадков оказывается намного ниже. Также ниже мгновенных значений оказывается и интенсивность осадков за период времени между сроками спутниковых наблюдений. Поэтому использование значений I_{max} как средних для всего пиксела, так и средних за временной интервал между спутниковыми наблюдениями может приводить к существенным переоценкам $\Sigma I_{сут}$, полученным по спутниковым данным при простом суммировании значений I_{max}.

При сопоставлении спутниковой и наземной информации об осадках следует принимать во внимание, что размеры элемента разрешения спутниковых данных существенно больше размеров территории, для которой производятся наблюдения на метеостанции, поэтому результаты точечных наземных наблюдений не всегда хорошо совпадают с площадными спутниковыми оценками, т.к. МИСЗ причисляет к классу осадки заданной интенсивности весь пиксел изображения, хотя осадки детектированной интенсивности могут выпадать из небольшого участка облака и не фиксироваться наземным наблюдателем.

Необходимо также учитывать, что при анализе данных серии измерений SEVIRI/Meteosat каждые 15 мин у относительно небольших кучево-дождевых облаков может отмечаться периодическое уменьшение значений I_{max} для соседних по времени изображений из-за того, что облако периодически попадает на стык двух-четырёх пикселов и в результате его характеристики усредняются по нескольким пикселам.

Надо принимать во внимание и временной сдвиг между моментами нахождения осадков в облаке и их выпадением на поверхность земли. Также, в зависимости от температуры и влажности воздуха и скорости ветра в подоблачном слое, размера частиц, их фазы (вода/лёд) и пр., интенсивности осадков в подоблачном слое и у поверхности земли могут сильно различаться, например, из-за возможного испарения капель летом или развеяния снежинок на большую, чем облако, территорию зимой.

При работе с информацией SEVIRI/Meteosat (в т.ч. при сопоставлении с данными наземных наблюдений) следует также учитывать, что при больших углах спутникового визирования в зависимости от высоты положения ВГО происходит пространственное смещение облаков на спутниковом изображении относительно их реального положения.

Определение суточных сумм осадков

Исследования, проведённые автором показывают, что для расчёта $\Sigma I_{сут}$ необязательно привлекать данные наблюдений SEVIRI/Meteosat за каждые 15 мин. Вполне достаточно использовать информацию, получаемую не чаще, чем 1 раз в час, но не реже четырёх раз (через 6 ч) в сутки (оптимально – 8 раз в сутки через 3 ч). При использовании всего двух сроков (обязательно дневного и ночного через ~12 ч) не исключено появление больших ошибок, т.к. при построении спутниковых оценок возможны пропуски облаков с осадками между сроками наблюдений или, наоборот, регистрация сильных кратковременных осадков в оба срока, в то время как в течение большей части суток осадки не выпадали.

Ухудшения точности оценок $\Sigma I_{сут}$ по данным SEVIRI/Meteosat (по сравнению с результатами наземных наблюдений) не произойдёт, если интервал в 1-6 ч между спутниковыми измерениями будет выдерживаться не очень строго: например, при отсутствии спутникового наблюдения за обычный срок будут использоваться данные за соседний срок, отстоящий от отсутствующего на 15-30 мин вперёд или назад, а также если будет отсутствовать до 25% сроков спутниковых наблюдений за сутки, но не подряд. В целом, чем чаще спутниковые наблюдения, тем большими получаются размеры зон осадков как с малыми, так и с большими значениями $\Sigma I_{сут}$, а контуры зон с равными суммами оказываются более сглаженными. При уменьшении интервала времени между спутниковыми измерениями также заметно сокращаются размеры зон с $\Sigma I_{сут}$=0 мм, а площадь зон с $\Sigma I_{сут}$=0-2 мм − увеличивается (в т.ч. по сравнению с данными наземных наблюдений). Пространственное положение максимумов и минимумов значений $\Sigma I_{сут}$ с изменением частоты спутниковых наблюдений практически не меняется.

Так как пропуск отдельных сроков спутниковых измерений – достаточно частое явление для информации SEVIRI/Meteosat, а у данных AVHRR/NOAA как сроки измерений, так и временной интервал между ними не являются постоянными (при одновременном использовании данных с NOAA-18 и NOAA-19 все спутниковые наблюдения приходятся на период времени с 22 до 14 ч ВСВ с интервалом от нескольких минут до нескольких часов), то для расчётов $\Sigma I_{сут}$ удобно использовать не накопленные за сутки интенсивности осадков ($\Sigma I_{сут.МИСЗ}$), а среднюю за сутки интенсивность осадков ($I_{ср.сут.МИСЗ}$), т.е. значения $\Sigma I_{сут.МИСЗ}$, делённые на количество спутниковых измерений за сутки. Точность оценок $I_{ср.сут.МИСЗ}$ также будет тем выше, чем больше выполнено спутниковых наблюдений (оптимально 4-12 раз в сутки) и чем более равномерно их внутрисуточное распределение.

Как упоминалось выше, самый простой способ оценки $\Sigma I_{сут}$ по спутниковым данным – суммирование всех измерений интенсивности осадков в течение суток − приводит к многократному завышению $\Sigma I_{сут}$ по сравнению с данными наземных метеонаблюдений ($\Sigma I_{сут.наз.}$). И чем больше используется сроков спутниковых наблюдений в течение суток, тем больше эта переоценка.

Другой способ оценки $\Sigma I_{сут}$ заключается в том, что для значений $I_{ср.сут.МИСЗ}$ по данным о $\Sigma I_{сут.наз.}$ для той же территории строятся уравнения регрессии (например, с использованием метода наименьших квадратов) вида: $\sum I_{сут}=a_1 \cdot I_{ср.сут.МИСЗ}+a_2$, где a_1 и a_2 – эмпирические коэффициенты. Исследования автора показывают, что коэффициенты регрессии следует получать для одного месяца (для меньшего интервала времени недостаточны размеры выборки, для большего – велика сезонная изменчивость условий увлажнения и вероятность значительных ошибок для отдельных дней). Наилучшие результаты (отклонение спутниковых оценок $\Sigma I_{мес}$ от наземных минимально) получаются при использовании коэффициента a_1, рассчитанного по той же выборке, для которой необходимо получить спутниковые оценки $\Sigma I_{сут}$. В этом случае значение a_2 должно быть равно 0. Применение в уравнении коэффициентов $a_2 \neq 0$ может сильно завышать значения $\Sigma I_{сут}$ при малых значениях $I_{ср.сут.МИСЗ}$.

Метод, в котором для оценок $\Sigma I_{сут}$ коэффициенты рассчитываются по этой же выборке, хотя и наиболее точен, но не удобен для использования на практике, т.к., во-первых, необходимы данные о $\Sigma I_{сут.наз.}$ для той же территории (количество метеостанций должно быть достаточным для расчёта коэффициентов регрессии, а сами станции − равномерно распределёнными по площади) и, во-вторых, необходимо ждать конца расчётного месяца. Использование же коэффициентов, рассчитанных для данного месяца прошлого года, требует наличия архива и может приводить к большим ошибкам оценки $\Sigma I_{сут}$ из-за изменения режима увлажнения.

Ещё один способ, пригодный как для климатических, так и оперативных оценок $\Sigma I_{сут}$, – каждый день рассчитывать новые коэффициенты, имея месячную выборку перед

искомой датой. Основными его недостатками являются большие затраты времени на реализацию и необходимость поддержания в оперативной доступности архива данных синхронных спутниковых и наземных наблюдений достаточного размера.

Для оперативных оценок $\Sigma I_{сут}$ с некоторой потерей точности (например, для предварительного анализа) можно использовать коэффициенты, зависящие от номера календарного дня, например, $a_1=(datd \cdot b_1)+b_2$, $a_2=(datd \cdot c_1)+c_2$ где datd=|183-|198-day||:183+0,1 (day – номер календарного дня от начала года), b_1, b_2, c_1 и c_2 – эмпирически подобранные коэффициенты. Несмотря на неплохую работоспособность этого метода, получаемые с его помощью оценки $\Sigma I_{сут}$ и $\Sigma I_{мес}$ в ряде случаев могут сильно отличаться от результатов наземных наблюдений и спутниковых оценок, полученных с помощью коэффициентов-констант для каждого месяца.

На *рис. 1* представлен годовой ход среднемесячных значений $\Sigma I_{сут}$ ($\Sigma I_{ср.мес.сут}$), построенный по информации SEVIRI/Meteosat и AVHRR/NOAA (коэффициенты a_1 рассчитаны для каждого месяца и года) и данным наблюдений на 48 метеостанциях ЕТР. Минимальные, средние и максимальные спутниковые оценки $\Sigma I_{ср.мес.сут}$ получены для территории региона (просуммированы все попиксельные оценки)) и всех 48 метеостанций. *Рис. 1* показывает хорошее соответствие средних значений спутниковых оценок $\Sigma I_{ср.мес.сут}$ (как по региону, так и по станциям) наземным оценкам: годовые ходы полученных тремя разными способами значений $\Sigma I_{ср.мес.сут}$ (характеризующиеся минимумами и максимумами на графиках), в целом достаточно хорошо совпадают − различия не превосходят 0,2 мм (обычно значения этих величин, полученные по данным наземных наблюдений и по данным AVHRR/NOAA, оказываются несколько большими, чем аналогичные оценки по данным SEVIRI/Meteosat, а для одних и тех же спутниковых данных оценки для региона превышают оценки для метеостанций). Минимальные значения $\Sigma I_{ср.мес.сут}$, полученные по данным SEVIRI/Meteosat, как правило, превосходят значения этой величины, определённые по данным AVHRR/NOAA или по наземным данным; при этом минимальные значения $\Sigma I_{ср.мес.сут}$ для региона часто оказываются меньше аналогичных значений для станций. Полученные по данным AVHRR/NOAA максимальные значения $\Sigma I_{ср.мес.сут}$ для 48ми станций были выше, а для региона – меньше соответствующих наземных оценок. Максимальные значения $\Sigma I_{ср.мес.сут}$, определённые по данным SEVIRI/Meteosat, оказались самыми маленькими (для региона чуть большими, чем для станций). Таким образом, амплитуда изменчивости значений $\Sigma I_{ср.мес.сут}$ получилась большей для территории региона, чем для станций, и для оценок $\Sigma I_{ср.мес.сут}$ по данным AVHRR/NOAA, чем по данным SEVIRI/Meteosat. Наибольшие различия оценок $\Sigma I_{ср.мес.сут}$ при использовании трёх видов данных характерны для тёплого периода года (май-октябрь), наименьшие – для холодного (ноябрь-апрель).

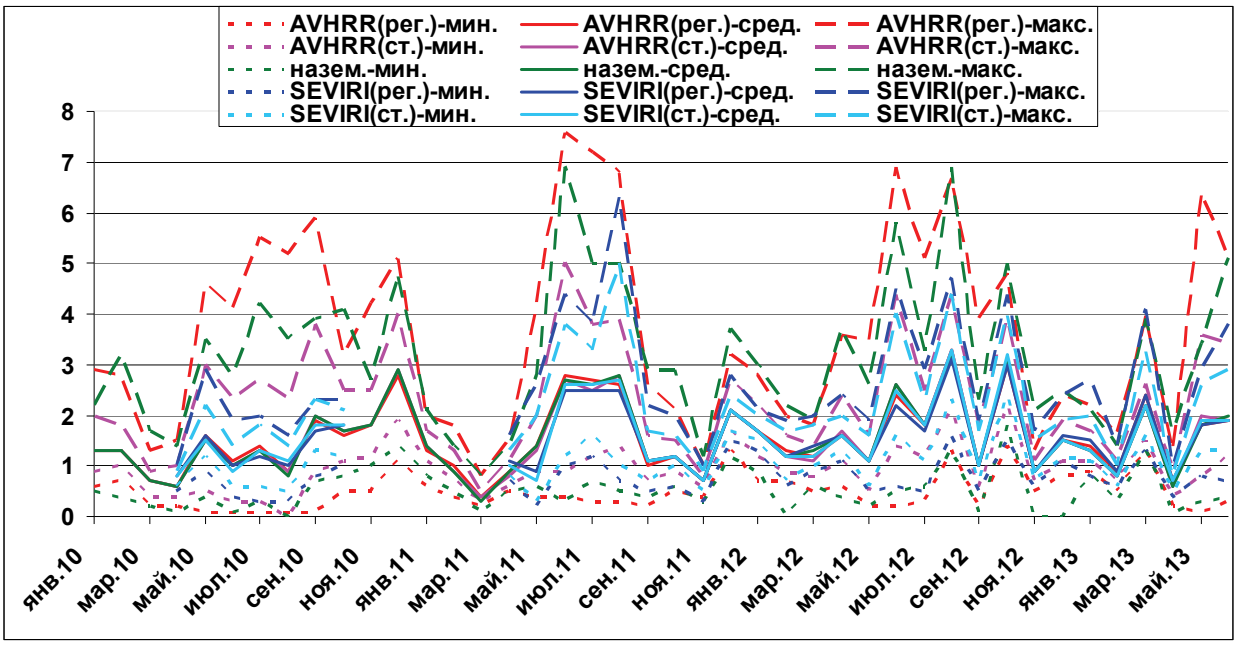

Рис. 1. Годовой ход значений среднемесячных суточных сумм осадков (мм) по данным радиометров AVHRR/NOAA и SEVIRI/Meteosat (минимальные, средние и максимальные для региона 49-54° с.ш. и 31-43° в.д. и 48 метеостанций) и по наземным измерениям на 48 метеостанциях (минимальные, средние и максимальные)

Исследования автора показывают, что величина среднего отклонения (dev) спутниковых оценок $\Sigma I_{сут}$ от наземных не зависит от времени года и близка к 0 мм при использовании рассчитанных для каждого месяца и года значений коэффициентов a_1. Среднемесячные значения среднего квадратичного отклонения (СКО) для оценок $\Sigma I_{сут}$ увеличиваются в тёплый период года до 6-8 мм (максимальные среднемесячные значения СКО для отдельных метеостанций могут достигать 15 мм) и уменьшаются в холодный период до 1-3 мм (максимальные среднемесячные значения для отдельных метеостанций не превышают 5 мм). Более высокие значения СКО для летних месяцев определяются большей интенсивностью осадков, приводящей к повышению $\Sigma I_{сут}$, и их большей локальностью, поскольку осадки выпадают преимущественно из кучево-дождевых облаков. Сказанное объясняет неполное совпадение спутниковых (площадных) и наземных (точечных) оценок в летнее время. В холодный период года осадки характеризуются меньшей интенсивностью, выпадают на большей площади и являются более однородными по территории выпадения, что приводит к меньшим значениям СКО.

Визуальный анализ классифицированных фрагментов спутниковых изображений и результаты их сопоставления с данными наземных наблюдений показали, что спутниковые оценки $\Sigma I_{сут}$ и $\Sigma I_{ср.мес.сут}$ для региона обычно имеют меньшую амплитуду изменчивости (что особенно характерно для оценок по SEVIRI/Meteosat), поля значений этих величин получаются сглаженными (*рис. 2а* и *2б*): по сравнению с результатами наземных на-

блюдений в летнее время занижаются максимальные значения, а зимой несколько увеличиваются минимальные значения $\Sigma I_{сут}$. При этом в целом по региону спутниковые и наземные оценки $\Sigma I_{сут}$, определяющие местоположение основных максимумов и минимумов согласуются вполне удовлетворительно. Вероятность расхождения спутниковых и наземных оценок, а также его величина сильно зависят от синоптической ситуации (например, наличия осадков из кучево-дождевых облаков или прохождения фронта).

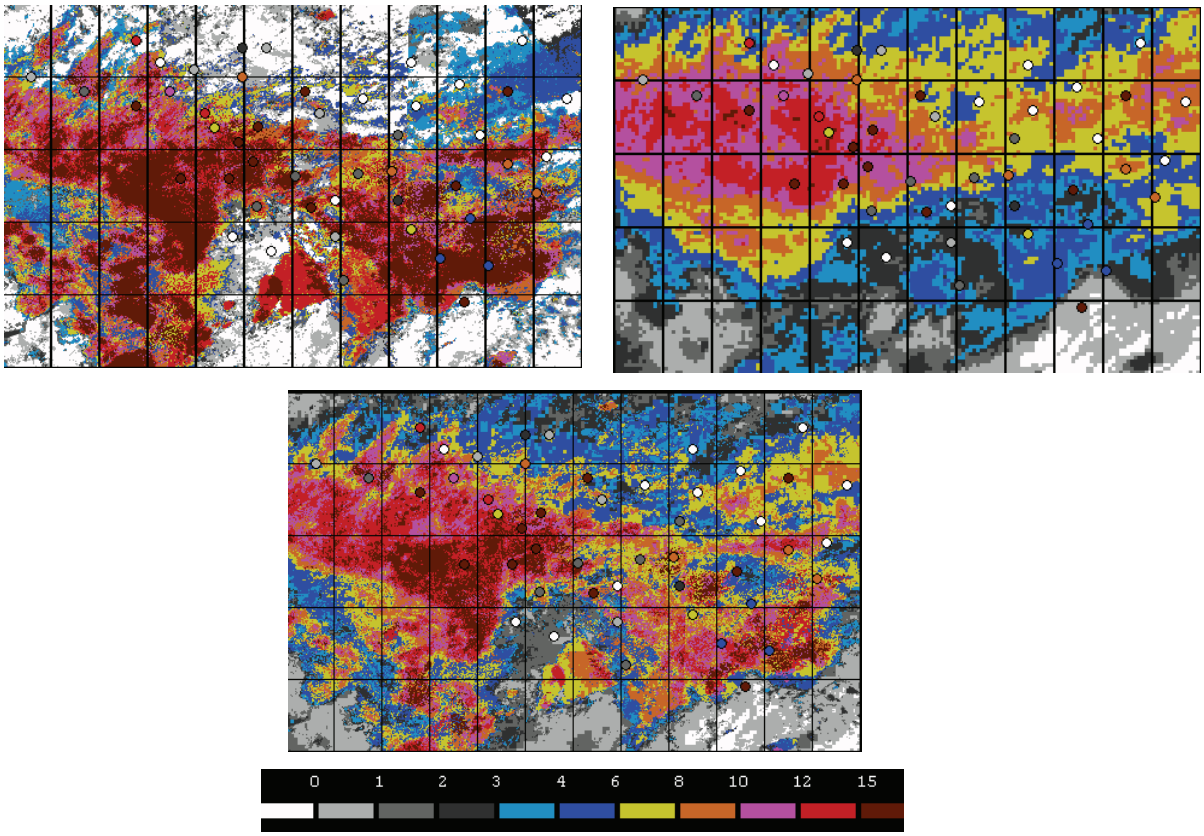

Рис. 2. Суточные суммы осадков (мм) (31 июля 2011 г.): а) по данным AVHRR/NOAA (вверху слева); б) по данным SEVIRI/Meteosat (вверху справа); в) комбинированное AVHRR&SEVIRI (внизу). Примечание. Значками показаны наблюдения за суточными суммами осадков на метеостанциях (см. шкалу цвета). Линии сетки нанесены через 1° для территории 49-54° с.ш. и 31-43° в.д.

Использование комбинированных изображений AVHRR&SEVIRI, полученных как среднее арифметическое оценок $\Sigma I_{сут}$ по двум видам спутниковой информации (при этом значения $\Sigma I_{сут}$, полученные по информации AVHRR/NOAA и SEVIRI/Meteosat, методом пространственной интерполяции совмещаются для каждого пиксела изображения AVHRR/NOAA), позволяет избежать грубых ошибок, присущих каждому виду спутниковых оценок $\Sigma I_{сут}$ (занижения максимальных значений $\Sigma I_{сут}$, характерного для оценок по информации SEVIRI/Meteosat, и отсутствия данных съёмки за временной интервал с 14 до 22 ч ВСВ, присущего информации AVHRR/NOAA) (*рис. 2 а-в*).

Определение месячных и годовых сумм осадков

Оценки $\Sigma I_{мес}$ и $\Sigma I_{год}$ по данным SEVIRI/Meteosat и AVHRR/NOAA получаются суммированием значений $\Sigma I_{сут}$ за соответствующие интервалы времени.

На *рис. 3* представлен годовой ход значений $\Sigma I_{мес}$, полученных по данным SEVIRI/Meteosat и AVHRR/NOAA (при постоянных для каждого месяца и года коэффициентах a_1) и наземным оценкам на 48 метеостанциях (минимальных, средних и максимальных значений $\Sigma I_{мес}$ для территории региона и всех станций). По *рис. 3* видно, что средние значения $\Sigma I_{мес}$, построенные по спутниковым данным (как для станций, так и для региона) хорошо согласуются друг с другом и с наземными оценками, особенно в 2011-2013 гг. (для этих лет характерны меньшее количество пропусков в спутниковой и наземной информации и большее число спутниковых наблюдений в течение суток, используемых для расчёта $\Sigma I_{сут}$). Минимальные значения $\Sigma I_{мес}$, определённые по данным SEVIRI/Meteosat, превышают аналогичные оценки, полученные по результатам наземных наблюдений и по данным AVHRR/NOAA. Максимальные для региона значения $\Sigma I_{мес}$, построенные по данным AVHRR/NOAA, обычно превосходят аналогичные наземные оценки, а построенные по данным SEVIRI/Meteosat – оказываются ниже их. Таким образом, амплитуда изменчивости значений $\Sigma I_{мес}$ для региона, определённых по данным SEVIRI/Meteosat, оказывается меньше, а полученных по данным AVHRR/NOAA − больше, чем эта же величина, рассчитанная при использовании данных наземных наблюдений.

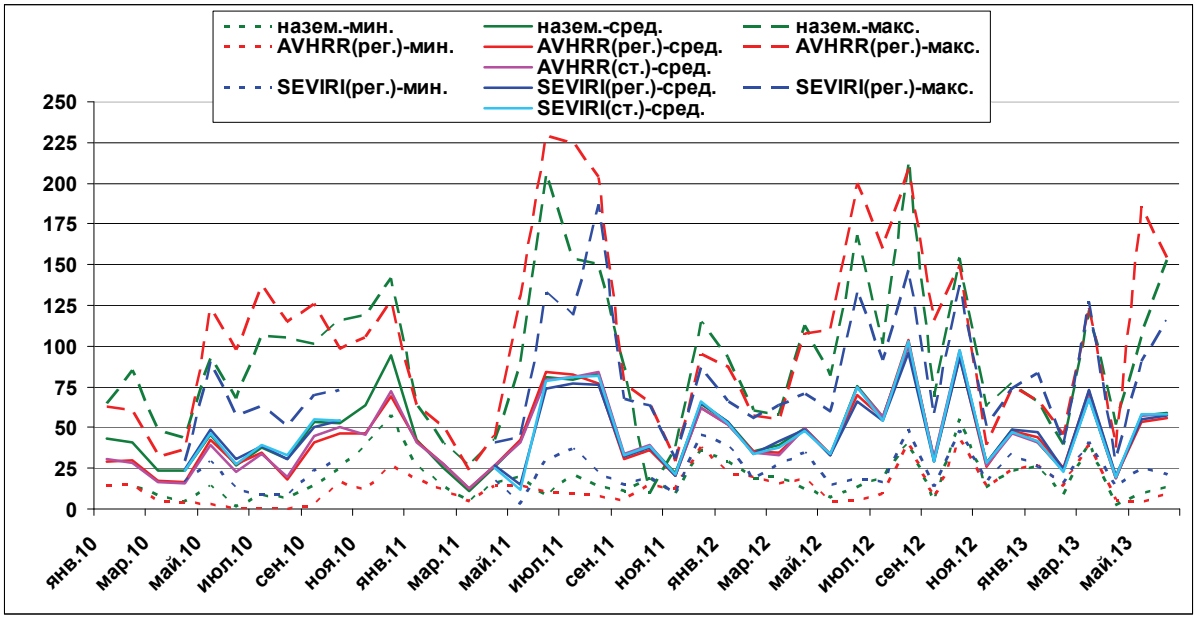

Рис. 3. Годовой ход значений месячных сумм осадков (мм) по данным радиометров AVHRR/NOAA (минимальные, средние и максимальные для региона и средние для 48 метеостанций) и SEVIRI/Meteosat (минимальные, средние и максимальные для региона и средние для 48 метеостанций) и наземным измерениям на метеостанциях (минимальные, средние и максимальные для 48 метеостанций)

Сопоставление оценок $\Sigma I_{мес}$, построенных по спутниковой и наземной информации, показывает, что для отдельных метеостанций в подавляющем большинстве случаев значения |dev| и СКО не превышают 5-15 мм для зимних месяцев и 10-30 мм для летних (значения СКО обычно больше по величине, чем |dev|, и имеют более ярко выраженный сезонный ход).

На *рис. 4* представлен годовой ход значений $\Sigma I_{мес}$, полученных на метеостанции г. Курск. Из *рисунка* видно, что основные максимумы и минимумы оценок $\Sigma I_{мес}$ по спутниковой и наземной информации хорошо совпадают. При этом оценки $\Sigma I_{мес}$ по данным AVHRR/NOAA лучше согласуются с результатами наземных наблюдений, чем с оценками $\Sigma I_{мес}$ по данным SEVIRI/Meteosat (максимальные значения меньше по величине). Скорее всего, основной причиной несовпадения значений $\Sigma I_{мес}$, полученных при использовании трёх видов информации, является разный пространственный масштаб этих данных.

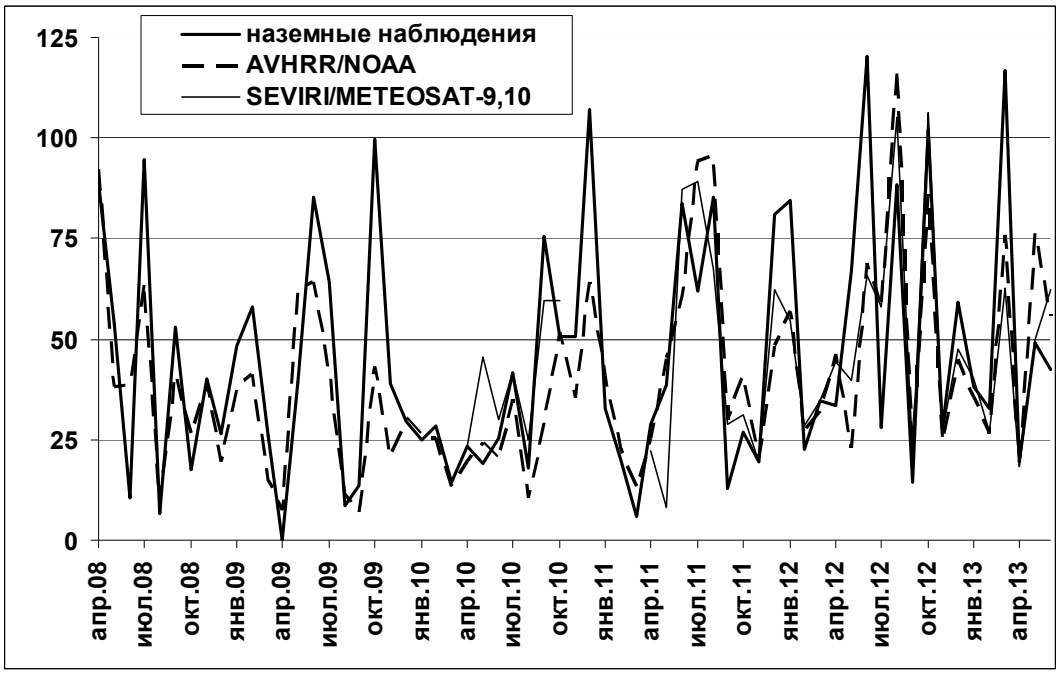

Рис. 4. Годовой ход значений месячных сумм осадков (мм) по данным радиометров AVHRR/NOAA и SEVIRI/Meteosat и наземным измерениям для метеостанции г. Курск

Визуальный анализ фрагментов спутниковых изображений показывает (*рис. 5*), что поля значений $\Sigma I_{мес}$, полученных по данным SEVIRI/Meteosat, сглажены по сравнению с полями таких же значений, построенных по данным AVHRR/NOAA и результатам наземных наблюдений: максимальные значения для всего региона меньше по величине (особенно в летние месяцы), а минимальные – больше (особенно в холодный период года), контуры зон равных значений $\Sigma I_{мес}$ более ровные (различия между минимальными и максимальными значениями в пределах рассматриваемой территории обычно не превышают 1,5-2 раз в зимнее время и 2,5-3 раз в летнее). Оценки $\Sigma I_{мес}$ по данным AVHRR/NOAA получаются заметно неоднородными и

ближе по величине к результатам наземных наблюдений: максимальные значения могут превышать минимальные в 5-10 раз летом и в 3-5 раз зимой. В целом, средние для региона оценки $\Sigma I_{мес}$ по данным SEVIRI/Meteosat превышают (особенно в летние месяцы) оценки по данным AVHRR/NOAA и результатам наземных наблюдений. Это, по-видимому, можно объяснить определяемой по спутниковым данным большей частотой выпадения осадков в пределах пиксела с метеостанцией, чем на самой станции (вследствие разного пространственного масштаба наблюдений – при наземных наблюдениях регистрируются осадки, выпавшие непосредственно над осадкомерным ведром и никак не учитываются осадки, выпавшие даже в нескольких метрах от него). Похожий на оценки $\Sigma I_{мес}$ по данным SEVIRI/Meteosat результат получится, если попиксельные оценки этой величины по данным AVHRR/NOAA усреднить по фрагментам, соответствующим размеру элемента разрешения информации SEVIRI/Meteosat.

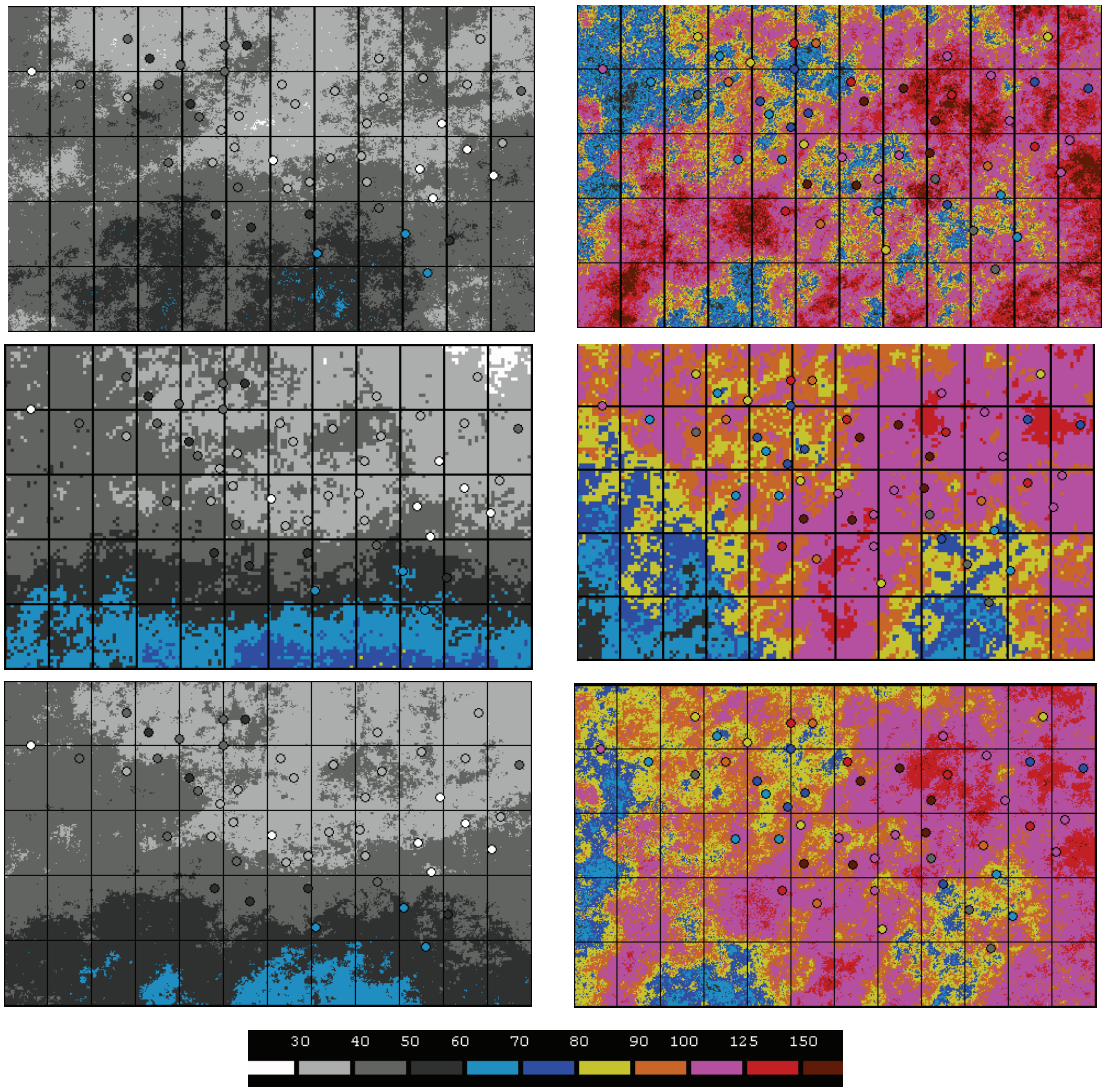

Рис. 5. Месячные суммы осадков (мм) (слева – январь 2013 г., справа – август 2012 г.): а) по данным AVHRR/NOAA (вверху); б) по данным SEVIRI/Meteosat (в центре); в) комбинированное AVHRR&SEVIRI (внизу). Примечание. Значками показаны наблюдения за месячными суммами осадков на метеостанциях (см. шкалу цвета). Линии сетки нанесены через 1° для территории 49-54° с.ш. и 31-43° в.д.

Комбинированное AVHRR&SEVIRI изображение полей значений $\Sigma I_{мес}$ (*рис. 5*) позволяет частично избежать ошибок, присущих каждому виду спутниковой информации (см. выше).

Сопоставление оценок $\Sigma I_{год}$, выполненных автором для отдельных метеостанций по данным спутниковых и наземных наблюдений, показывают, что в 70-80% случаев (для разных лет выборки) значения |dev| не превышают 25% от значения $\Sigma I_{год.назем.}$, а в 45-50% случаев – 10%. Наибольшие расхождения между спутниковыми и наземными оценками $\Sigma I_{год}$ обычно отмечаются при аномально (на фоне соседних метеостанций) больших или низких (до 1,5-2 раз) значений $\Sigma I_{год,назем.}$.

При визуальном анализе фрагментов спутниковых изображений (*рис. 6*) видно, что поля оценок $\Sigma I_{год}$ по данным SEVIRI/Meteosat оказываются сглаженными (разница между минимальными и максимальными значениями в пределах рассматриваемой территории обычно не превышает 30-50 % от максимального значения) по сравнению с полями оценок $\Sigma I_{год}$ по данным AVHRR/NOAA и результатами наземных метеонаблюдений, для которых разница может достигать 100-200% (на соседних метеостанциях (расстояние 20-40 км) значения $\Sigma I_{год}$ могут различаться на 100-200 мм и более). Комбинированное AVHRR&SEVIRI изображение полей значений $\Sigma I_{год}$ обычно оказывается более похожим на результаты наземных оценок.

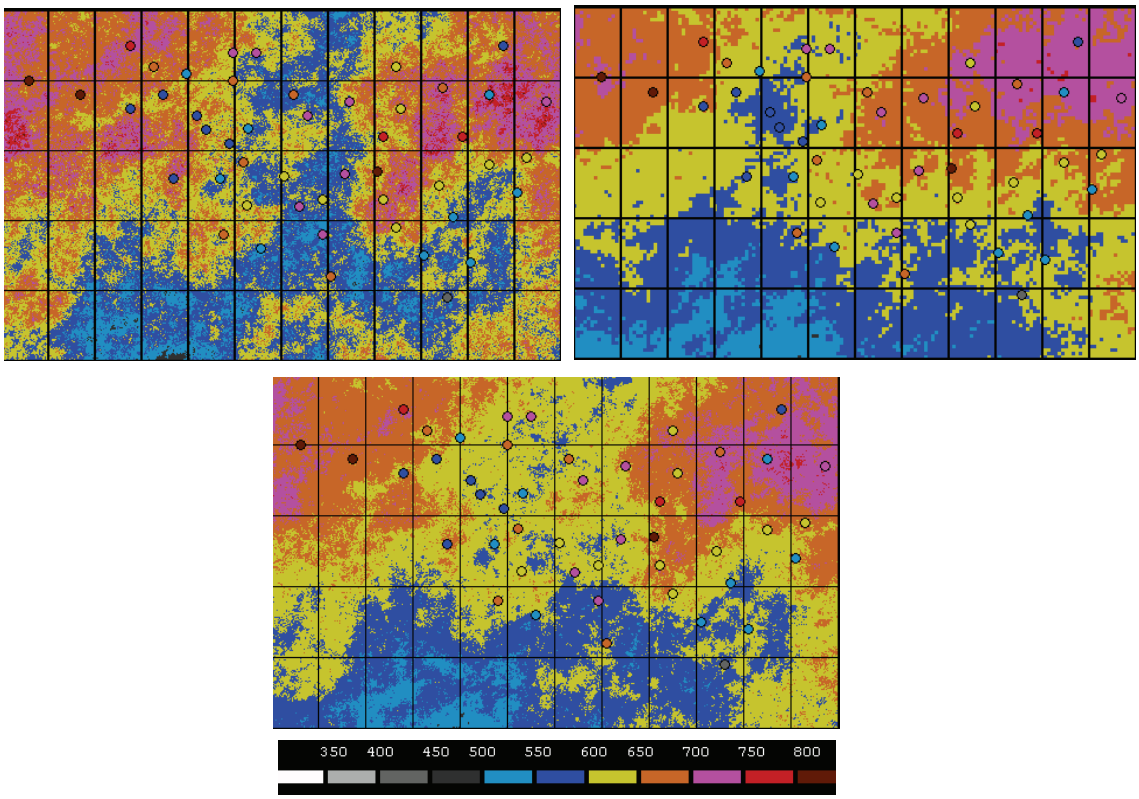

Рис. 6. Годовые суммы осадков (мм) за 2012 г.: а) по данным AVHRR/NOAA (вверху слева); б) по данным SEVIRI/Meteosat (вверху справа); в) комбинированное AVHRR&SEVIRI (внизу). Примечание. Значками показаны наблюдения за годовыми суммами осадков на метеостанциях (см. шкалу цвета). Линии сетки нанесены через 1° для территории 49-54° с.ш. и 31-43° в.д.

Расхождение в оценках месячных сумм осадков для отдельных метеостанций часто достигает 50% от фоновых значений (Gruber, Levizzani, 2008), поэтому получаемые автором спутниковые оценки сумм осадков можно считать, в целом, удовлетворительными для мониторинга режима увлажнения рассматриваемой территории.

Заключение

Таким образом, сведения о мгновенной I_{max}, получаемые с помощью КПМ по данным наблюдений радиометров SEVIRI/Meteosat и AVHRR/NOAA для ЕТР, вполне пригодны для оценок $\Sigma I_{сут}$, $\Sigma I_{мес}$ и $\Sigma I_{год}$. Рекомендуемым автором вариантом методики для климатических оценок сумм осадков является использование линейного уравнения с одним постоянным коэффициентом, подобранным эмпирически по той же самой месячной выборке, для которой рассчитываются значения $\Sigma I_{сут}$ и $\Sigma I_{мес}$, а для оперативных и предварительных оценок − с двумя коэффициентами, зависящими от календарного дня. Для расчёта значений $\Sigma I_{сут}$ используются значения $I_{ср.сут.МИСЗ}$, полученные по равномерно распределённой в течение суток выборке из 4-12 сроков спутниковых наблюдений.

Получаемые спутниковые оценки $\Sigma I_{сут}$, $\Sigma I_{мес}$ и $\Sigma I_{год}$ вполне удовлетворительно согласуются с данными наземных наблюдений. Большую точность обеспечивает использование комбинированных AVHRR&SEVIRI спутниковых изображений, т.к. с помощью информации SEVIRI/Meteosat получаются более сглаженные оценки (с меньшей амплитудой пространственной изменчивости), а отсутствие данных AVHRR/NOAA за временной интервал с 14 до 22 ч ВСВ может привести к недоучёту осадков, выпавших в это время.

При визуальном анализе полей значений $\Sigma I_{сут}$, $\Sigma I_{мес}$ и $\Sigma I_{год}$ для региона в целом хорошо видна общая тенденция увлажнения территории (преобладающие максимальные и минимальные значения сумм осадков, местоположение выпадения их максимальных и минимальных количеств). Однако спутниковые оценки сумм осадков 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 и др. причин.

Автор выражает признательность Е.Л. Музылёву (ИВП РАН) за предоставленные данные наземных наблюдений и ряд советов.

Литература

1. *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.
2. *Волкова Е.В.* Оценки параметров облачного покрова, осадков и опасных явлений погоды по данным радиометра AVHRR с МИСЗ серии NOAA круглосуточно в автоматическом режиме // Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса. 2013. Т. 10. № 3. С. 66-74.
3. *Матвеев Л.Т.* Основы общей метеорологии. Физика атмосферы. Л.: Гидрометиздат, 1965. 874 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 p.
5. *Kidd C., Levizzani V., Laviola S.* Quantitative precipitation estimation from Earth observation satellites // Rainfall: State of the science. Geophysical Monograph Series 191. 2010. P. 127-158.

Estimation of precipitation amount using SEVIRI/Meteosat-9 and AVHRR/NOAA data for the European territory of Russia

E.V. Volkova

State Research Centre of Space Hydrometeorology "Planeta", Moscow, 123242, Russia
E-mail: quantocosa@bk.ru

The author's Complex Threshold Method (CTM) of the automatic pixel-by-pixel classification of SEVIRI/Meteosat and AVHRR/NOAA data retrieves cloud, precipitation and weather hazard properties for day and night all year round conditions in the temperate zone above land, water and snow/ice surfaces. Based on the CTM, a new method to obtain daily precipitation amount (DPA) for the European territory of Russia (ETR) is introduced. The proposed method utilizes the pixel maximum instant precipitation rate derived from the CTM. Two main DPA estimating algorithms are compared in the paper. One of them uses a coefficient-constant retrieved for the same monthly satellite data set, yet the other one relies on a continuously changing coefficient due to the calendar number of the day. To calculate DPA both algorithms multiply the average daily precipitation rate (produced with the daily set of satellite images) by this empirically determined coefficient. The method was adjusted and tested on the satellite and ground-based meteorological data set for the south of the ETR in 2008-2013. The assessments of derived daily, monthly and yearly precipitation amounts demonstrate a good correlation with meteorological observations (gauges), though the SEVIRI-fields look more smoothly compared with the AVHRR and ground-based fields. Combined (AVHRR&SEVIRI) images lack shortcomings of either data. The method can be efficiently used for visual monitoring of daily, monthly and yearly precipitation amounts.

Keywords: SEVIRI, Meteosat-9, Meteosat-10, AVHRR, NOAA, daily precipitation, monthly precipitation, ETR.

References

1. Volkova E.V., Uspenskii A.B. Otsenki parametrov oblachnogo pokrova po dannym geostatsyonarnogo MISZ Meteosat-9 kruglosutochno v avtomaticheskom rezhime (Day and night automatic estimation of cloud cover parameters using Meteosat-9 data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya zemli iz kosmosa*, 2010, Vol. 7, No. 3, pp. 16-22.
2. Volkova E.V. Otsenki parametrov oblachnogo pokrova, osadkov i opasnyh yavlenii pogody po dannym radiometra AVHRR s MISZ serii NOAA kruglosutochno v avtomaticheskom rezhime (Day and night automatic estimation of cloud cover parameters, precipitation and weather hazards using AVHRR/NOAA data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya zemli iz kosmosa*, 2013, Vol. 10, No. 3, pp. 66-74.
3. Matveev L.T. *Osnovy obshchei meteorologii. Fizika atmosfery* (The foundations of meteorology. Rhysics of atmosphere), Leningrad: Gidrometizdat, 1965, 874 p.
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 p.
5. Kidd C., Levizzani V., Laviola S. Quantitative Precipitation Estimation From Earth Observation Satellites, Rainfall: State of the Science. *Geophysical Monograph Series 191*, 2010, pp. 127-158.