

Специализированный программный комплекс получения и валидации спутниковых оценок параметров облачности и осадков

Е.В. Волкова, А.Б. Успенский, А.В. Кухарский

*НИЦ Космической гидрометеорологии «Планета»
Москва 123242, Россия*

E-mail: quantocosa@bk.ru, uspensky@planet.iitp.ru, kuha@mail.ru

Специализированный Программный Комплекс (СПК) «ЕТР» позволяет автоматически в круглосуточном режиме детектировать параметры облачного покрова, осадков и опасных явлений погоды (ОЯП) для Европейской территории России (ЕТР) по данным радиометра AVHRR с полярно-орбитальных спутников серии NOAA и радиометра SEVIRI с геостационарного спутника Meteosat-10, а также валидировать полученные результаты классификации данными наземных наблюдений метеорологического радиолокатора (МРЛ) и на метеостанциях и другими спутниковыми методиками. Структура СПК «ЕТР» позволяет достаточно легко адаптировать его к другому схожему виду спутниковой информации (например, МСУ-ГС со спутника «Электро» или МСУ-МР со спутника «Метеор»). Полная автоматическая обработка спутниковых данных включает классификацию для каждого срока спутникового наблюдения и валидацию один раз в сутки и ежемесячно. Запуск автоматической классификации и валидации происходит сразу после появления в наличии в соответствующих базах данных (БД) файлов с необходимыми данными. СПК «ЕТР» не требует больших вычислительных ресурсов и может быть установлен на любую ПЭВМ (под Windows), имеющую доступ к БД со спутниковыми и прогностическими данными, результатами наземных наблюдений МРЛ и на метеостанциях, а также аналогичными результатами классификаций других спутниковых методик. Получаемые с помощью СПК продукты по облачности и осадкам в основном удовлетворяют требованиям Всемирной Метеорологической Организации (ВМО) и не уступают по качеству зарубежным аналогам, имея перед ними ряд преимуществ в виде круглосуточной работы для любого типа облачности и подстилающей поверхности в пределах ЕТР, большего количества детектируемых параметров облачности, осадков и ОЯП и их классов, меньшего количества привлекаемой дополнительной информации.

Ключевые слова: SEVIRI, Meteosat-10, AVHRR, NOAA, облачная маска, тип облачности, высота ВГО, интенсивность осадков, гроза, град, ЕТР

Введение

Спутниковые наблюдения за облачностью, осадками и ОЯП необходимы для решения многих задач мониторинга и прогноза погоды и климата, т.к. они могут существенно дополнить и заменить информацию наземной наблюдательной сети. Облачные образования препятствуют дистанционному зондированию атмосферы и подстилающей поверхности на основе спутниковых измерений уходящего теплового излучения. Сведения об осадках и ОЯП необходимы для гидрологического мониторинга и прогноза, в т.ч. наводнений, пожаров, засух.

Для решения этих проблем за рубежом под эгидой EUMETSAT в начале 2000-х гг. стартовал проект SAF (Satellite Application Facility) (<http://www.eumetsat.int>), в который вошел ряд крупных европейских организаций – центров обработки и распространения спутниковой информации, в т.ч. для нужд мониторинга и прогноза (NWC (NoWCASTing)) и исследований климата (CM (Climate Monitoring)). В рамках проектов SAF NWC и SAF CM производятся разнообразные спутниковые продукты по облачности и осадкам в глобальном и региональном масштабе (<http://www.cmsaf.eu>, <http://www.nwcsaf.smhi.se>). Методики определения параметров облачного покрова и осадков в рамках SAF NWC

и SAF CM непрерывно развиваются, а списки выходных продуктов дополняются новыми (Kniffka, Lockhoff et al., 2013). Результаты спутниковой классификации в рамках проектов SAF валидируются данными наземных МРЛ и метеонаблюдений и других спутниковых методик. Качество получаемых спутниковых продуктов по облачности и осадкам близко к требованиям, предъявляемым к ним ВМО для анализа и прогноза погоды и климата (Kidd et al., 2010; Kniffka, Lockhoff et al, 2013).

В данной работе рассматривается СПК «ЕТР» (созданный авторами в ФГБУ «НИЦ «Планета»»), который позволяет автоматически в круглосуточном режиме детектировать параметры облачного покрова, осадков и ОЯП для ЕТР по данным радиометра AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) с полярно-орбитальных спутников серии NOAA и радиометра SEVIRI (Spinning Enhanced Visible and InfraRed Imager) с геостационарных спутников серии Meteosat, а также валидировать полученные результаты классификации климатическими оценками, данными наземных МРЛ и метеонаблюдений и другими спутниковыми методиками. Основная цель работы – создание достаточно эффективной и не требующей больших вычислительных и информационных ресурсов системы спутникового мониторинга облачности и осадков регионального покрытия, не уступающей по качеству зарубежным аналогам.

Описание СПК «ЕТР»

СПК «ЕТР» представляет собой комплекс из четырех пакетов программ (ПП), написанных на ФОРТАН-90 под Windows, который обеспечивает в автоматическом режиме: 1) сбор необходимых для его работы данных (из соответствующих БД); 2) предварительную подготовку спутниковой и дополнительной, в т.ч. контрольной, информации; 3) классификацию (с помощью Комплексной Пороговой Методики (КПМ)); 4) валидацию результатов классификации. ПП «avhrrnoaa» и «sevmetsat» получают параметры облачности, осадков и ОЯП с помощью КПМ соответственно по данным AVHRR и SEVIRI, ПП «sumprec» рассчитывает суточные и месячные суммы осадков по данным AVHRR и SEVIRI, а ПП «validation» валидирует результаты классификации КПМ данными наземных МРЛ и метеонаблюдений и других спутниковых методик (ПП «mrl», «eumetsat», «sprec» и др. в его составе обеспечивают предварительную подготовку контрольных данных к валидации). На *рис. 1* показана схема строения СПК «ЕТР».

Классификация и валидация спутниковых данных СПК «ЕТР» осуществляются в автоматическом режиме круглосуточно на протяжении всего года для ЕТР и сопредельных стран (47°–63° с.ш. и 20°–51,5° в.д.). СПК «ЕТР»: 1) детектирует параметры облачного покрова, осадков и ОЯП для каждого срока спутникового наблюдения (по информации AVHRR – ежечасно, по информации SEVIRI – каждые 15 мин, непосредственно сразу после поступления данных в БД) или несколько раз в сутки за несколько сроков по очереди; 2) рассчитывает суточные суммы осадков 1 раз в сутки (за предыдущий день);

3) рассчитывает месячные суммы осадков 1 раз в месяц (1-го числа за предыдущий месяц); 4) проводит валидацию: ежедневную – 1 раз в сутки для всех сроков спутниковых наблюдений за предыдущие сутки, ежемесячную – 1 раз в месяц (1-го числа) для всех сроков спутниковых наблюдений за предыдущий месяц.

Результаты работы СПК «ЕТР» представлены в виде: 1) dat-файлов, содержащих матрицы с результатами классификации по КПМ параметров облачности, осадков и ОЯП по данным AVHRR и SEVIRI в точных значениях или кодах; 2) rsx-файлов с визуальными результатами классификации по КПМ параметров облачности, осадков и ОЯП по данным AVHRR и SEVIRI; 3) txt-файлов (журналы-таблицы) с информацией о количественной валидации (ежедневной и ежемесячной) результатов классификации КПМ по данным AVHRR и SEVIRI климатическими данными, результатами наблюдений МРЛ и на метеостанциях и др. спутниковыми методиками; 4) rsx-файлов с визуальной валидацией результатов классификации КПМ по данным AVHRR и SEVIRI для отдельных сроков спутниковых наблюдений результатами наблюдений МРЛ и на метеостанциях и др. спутниковыми методиками.

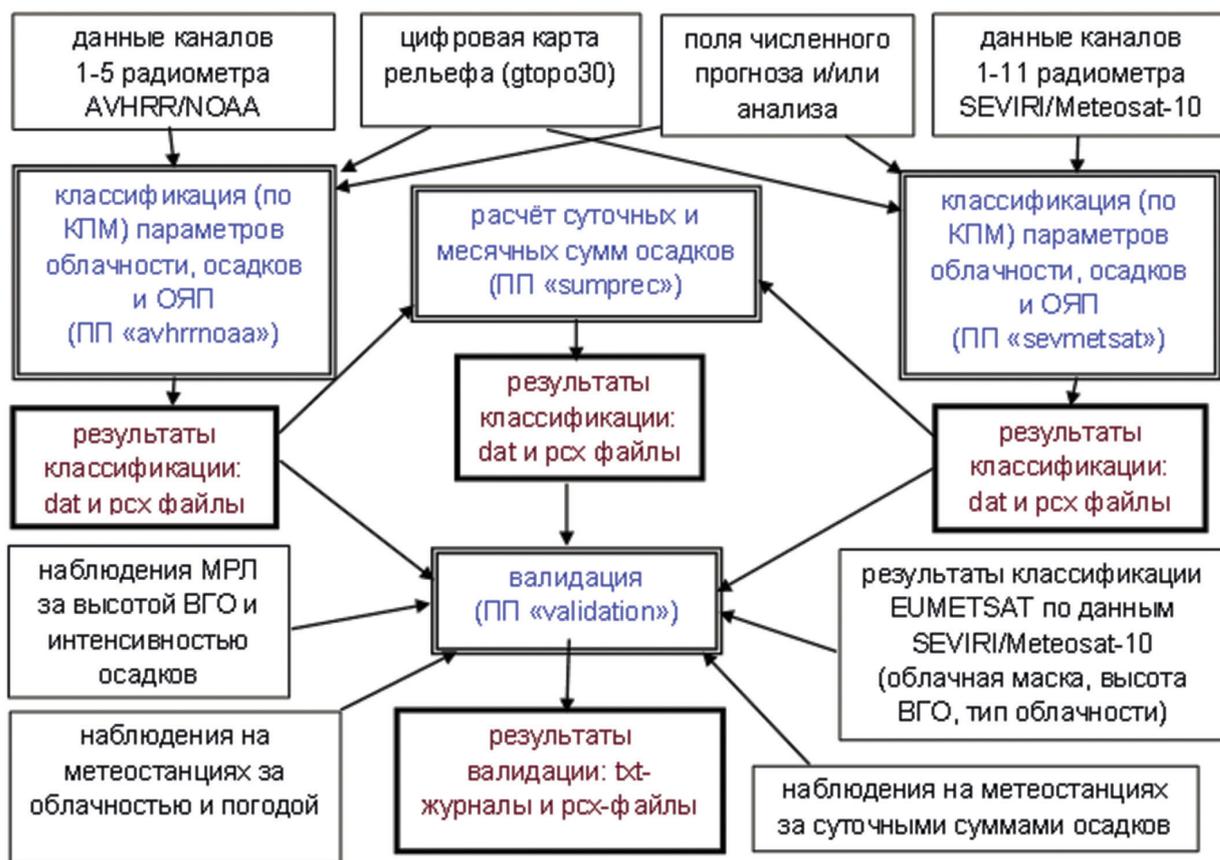


Рис. 1. Схема работы СПК «ЕТР» классификации и валидации спутниковых данных (AVHRR/NOAA и/или SEVIRI/Meteosat-10) для региона ЕТР

Классификация

Для детектирования параметров облачного покрова, осадков и ОЯП в СПК «ЕТР» применяются 2 варианта КПМ отдельно для информации AVHRR и SEVIRI (подробнее см. в Волкова, 2013; Волкова, Успенский, 2010). Перед проведением классификации оба вида спутниковой информации методом пространственной интерполяции приводятся к равномерной прямоугольной географической проекции с шагом 1' по широте и 1,5' по долготе. В качестве дополнительной информации в КПМ используются данные прогноза и/или анализа (приземная температура воздуха ($T_{a_{\text{приз}}}$), температура воздуха на 9-ти стандартных барических уровнях и атмосферное давление на уровне моря (p_{sea}) с пространственным разрешением 2,5° за сроки 0 и 12 ч ВСВ (из БД ГМЦ России), а также цифровая карта рельефа (gtopo30 (<http://eros.usgs.gov>)).

ПП «avhrrnoaa» и «sevmetsat» проводят предварительную подготовку спутниковых данных соответственно в каналах 1–5 ($\lambda=0,6; 0,9; 3,7; 11$ и 12 мкм) для информации AVHRR и в каналах 1–11 ($\lambda=0,6; 0,8; 1,6; 3,9; 6,3; 7,3; 8,7; 9,7; 11; 12$ и $13,4$ мкм) для информации SEVIRI, а затем осуществляют попиксельную классификацию пороговым методом. В качестве предикторов используются значения альбедо и радиационной температуры, их разности, а также параметры облачности, осадков и ОЯП, полученные на предыдущих этапах классификации. Динамические пороговые значения задаются в КПМ в виде эмпирически полученных линейных и нелинейных функциональных зависимостей от высоты солнца (h_o), календарного дня, $T_{a_{\text{приз}}}$, p_{sea} , температуры воздуха, приведенной к уровню моря ($T_{a_{\text{sea}}}$) и максимальной в атмосферном столбе ($T_{a_{\text{max}}}$), угла спутникового визирования (viz), географической широты, высоты места над уровнем моря (h_{ref}) и др. Выделение классов/градаций идет от отсутствия явления к его максимальному значению. Пороговое решающее правило состоит из нескольких процедур (обычно от 1–2 до 10). Тест считается пройденным, если пройдены все процедуры. В КПМ соблюдается строгий порядок выполнения этапов классификации (рис. 2).

Выходными продуктами КПМ являются результаты определения параметров облачного покрова (облачная маска, типы облачности (13 классов), максимальная (W_{max} , г/м³) и суммарная (SW , кг/м²) водность облачного слоя (по 8–9 градаций), температура верхней границы облачности (ВГО) ($T_{\text{ВГО}}$ в К), высота ВГО ($h_{\text{ВГО}}$ в гПа и м) и нижней границы облачности ($h_{\text{НГО}}$, км) (4 градации), фазовое состояние воды в облачных частицах в слое вблизи ВГО ($faza$) (4 класса)), осадков (мгновенная максимальная интенсивность (I_{max} , мм/ч) (8–9 градаций), тип осадков у поверхности земли (13 классов)) и ОЯП (зоны гроз, града и обледенения разной интенсивности (по 4 класса)) в виде матриц и rsx-файлов.

По окончании суток (по ВСВ) по результатам определения I_{max} с помощью ПП «sumpres» рассчитываются суточные суммы осадков ($\sum I_{\text{сут}}$), а по окончании месяца – месячные суммы ($\sum I_{\text{мес}}$). Суммы осадков вычисляются как для каждого вида спутниковой информации, так и для комбинированной (см. подробнее в Волкова, 2014).

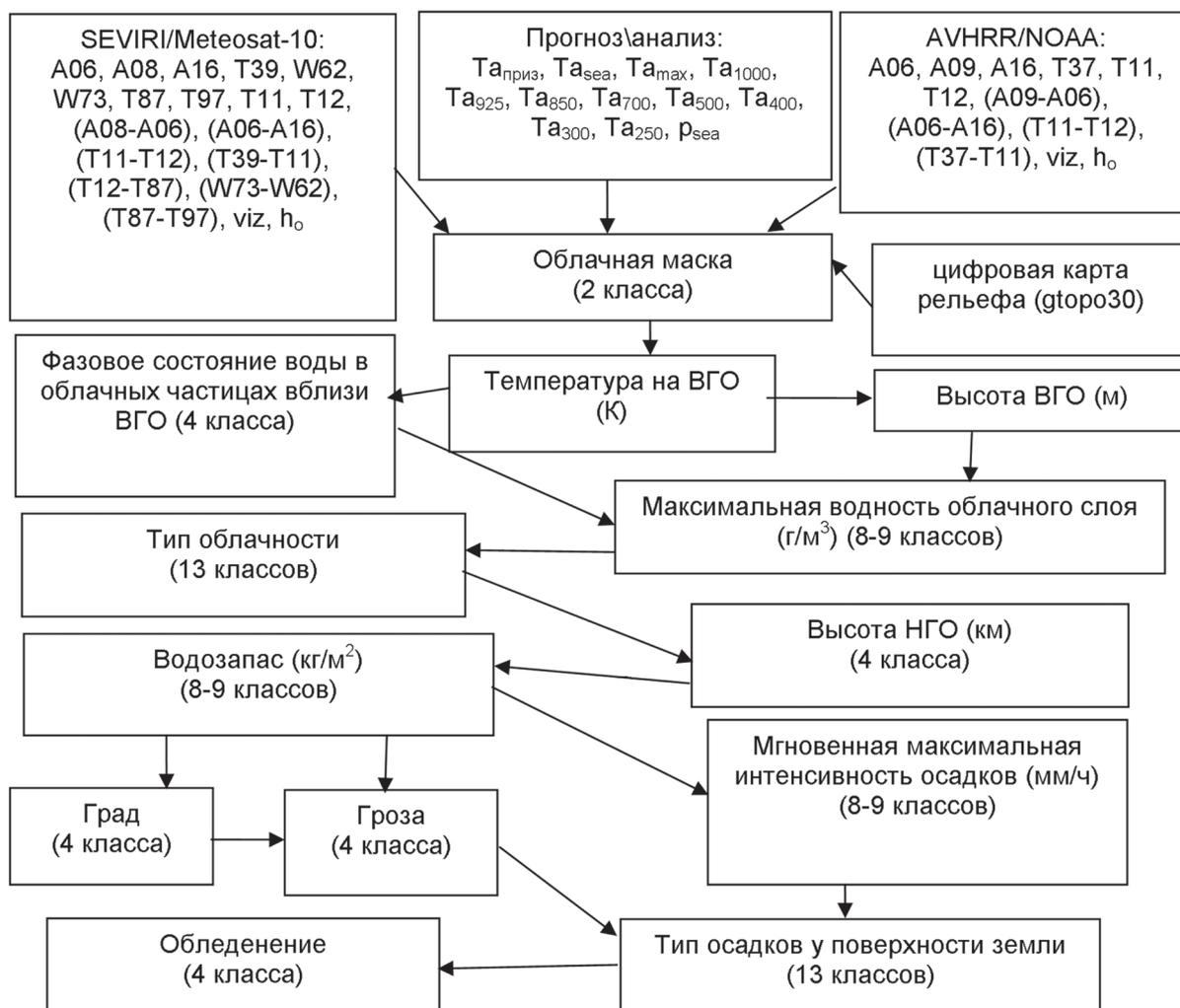


Рис. 2. Схема работы КПМ – классификации спутниковых данных (AVHRR/NOAA и/или SEVIRI/Meteosat-10) для региона ЕТР.

Примечание: A06, A08, A09, A16 – измерения соответственно в каналах 0,6; 0,8; 0,9 и 1,6 мкм (альбедо); T39, T37, W62, W73, T87, T97, T11, T12 – измерения соответственно в каналах 3,9; 3,7; 6,2; 7,3; 8,7; 9,7; 11,0 и 12,0 мкм (радиационная температура)

Валидация

Валидация результатов классификации по КПМ осуществляется с помощью ПП «validation»: 1) климатической информацией о параметрах облачного покрова для типов облачности по классификации ВМО (Ясногородская, 1978; Мазин, Хргиан, 1989); 2) данными наземных наблюдений на метеостанциях за количеством общей облачности (КОО), погодой в срок наблюдения и в последний час и $\Sigma_{сут}$; 3) данными наблюдений МРЛ за $h_{ВГО}$ и интенсивностью осадков; 4) результатами классификации других спутниковых методик (например, EUMETSAT (облачная маска, $h_{ВГО}$ и тип облачности)). Предполагает-

ся сопоставление с результатами классификации КПМ по данным сканеров МСУ-ГС со спутника «Электро-2» и МСУ-МР со спутника «Метеор-М3».

Перед проведением валидации контрольные данные должны быть представлены в «стандартном» виде. Для этого используются ПП: «mrl» – для данных наблюдений МРЛ, «eumetsat» – для результатов классификации методики EUMETSAT, «sprс» – для данных наземных наблюдений за $\Sigma I_{\text{сут}}$. С их помощью контрольные данные переносятся из БД в соответствующие директории на ПЭВМ и трансформируются в «стандартный» вид, использование которого позволяет применять контрольные данные в разных форматах, не меняя основных программ.

При количественной валидации рассчитываются оценки точности и выдается автоматическое заключение о качестве классификации (степени отличия валидируемых данных от контрольных) по каждому классу и/или суммарно по всем классам (в т.ч. «взвешенная» оценка в зависимости от повторяемости класса в пределах выборки). Для этого значения оценок точности сравниваются с табличными порогами. Качество классификации может быть: «отличное» (практически полное совпадение валидируемых и контрольных оценок), «хорошее», «удовлетворительное», «плохое» и «очень плохое» (почти полное несовпадение валидируемых и контрольных данных). Чем меньше классов и больше размеры выборки, тем обычно лучше получаются оценки качества классификации.

----- 1. 8.2014 nimg= 8 npix= 2782810-----													
	Ci,Cs	Cu,Sc	Cbinc	Cbcalv	Ns,Cb	Cbcap	Cb+Ci	Ac,Cu	As,St	Ns+As	med+C1	St,Sc	CsAsNs
CLcover,%	1.0	9.1	2.9	5.2	6.4	6.2	20.8	7.9	9.0	12.9	3.0	.0	15.6
Tvgo,K	261.2	275.4	227.2	262.0	263.6	241.0	249.9	274.1	266.6	264.8	256.1	280.3	249.8
Hvgo,m	6729.	2862.	11064.	5357.	4699.	8735.	7465.	3460.	4990.	4998.	7142.	1550.	7930.
max.water,g/m3	.05	.17	4.17	.80	.40	3.46	.93	.15	.10	.36	.15	.15	.32
sum.water,kg/m2	.05	.05	9.39	1.05	.44	7.15	1.25	.05	.05	.22	.05	.05	.18
Iprecip,mm/h	.0	.1	31.2	6.5	2.5	23.0	4.1	.0	.0	.1	.0	.0	.0
POpprec,%	.0	9.8	86.5	87.1	93.1	99.6	45.4	.0	.0	6.3	.0	.0	.5
POP(faza/ice),%	1.2	.0	100.0	21.9	8.9	100.0	60.2	.0	.0	1.5	22.6	.0	48.8
POP(faza/i>w),%	98.8	.0	.0	18.2	54.0	.0	39.8	.2	12.1	26.5	77.4	.0	51.2
POP(faza/i<w),%	.0	29.6	.0	59.8	36.8	.0	.0	43.8	81.9	64.5	.0	.0	.0
POP(faza/wat),%	.0	70.4	.0	.0	.2	.0	.0	55.9	6.0	7.5	.0	100.0	.0
POP(icing),%	.0	20.6	100.0	99.2	95.6	100.0	100.0	26.8	43.7	83.7	100.0	.0	100.0
POP(l/icing),%	.0	20.6	.0	10.8	14.4	.0	.0	26.8	43.7	39.3	100.0	.0	61.3
POP(m/icing),%	.0	.1	.0	17.7	81.1	.0	28.8	.0	.0	40.3	.0	.0	35.3
POP(h/icing),%	.0	.0	100.0	70.7	.0	100.0	71.2	.0	.0	4.1	.0	.0	3.5
POP(thund),%	.0	.0	28.2	.0	.0	5.3	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
POP(hail),%	.0	.0	40.4	.0	.0	20.2	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
npixels	26955	252310	79732	144782	177227	173365	579194	219962	251173	360346	82892	160	434712
quality	satis	excel	excel	good	excel	excel	good	excel	good	excel	good	excel	good
all 13 classes	-	good/	good	good	good	(weighed)							

Рис. 3. Фрагмент файла-журнала валидации климатическими оценками параметров облачного покрова для каждого класса облачности. Примечание: POP – вероятность события

Выходными продуктами ПП «validation» являются txt-файлы-журналы и rsx-файлы. В файлы-журналы (см. пример на рис. 3 – валидация параметров облачного покрова для каждого типа облачности климатическими оценками) заносятся такие оценочные характеристики, как среднее значение оцениваемого параметра, среднее отклонение (dev), среднее абсолютное отклонение (|dev|) и среднее квадратичное отклонение (СКО) от контрольной величины; вероятности правильного и ошибочного детектирования, суммарная ошибка и др., а также оценка качества классификации. Изображения из rsx-фай-

лов в искусственных цветах показывают отклонение величины исследуемого параметра по валидируемой выборке от контрольного значения (рис. 4) или позволяют визуально сопоставить результаты спутниковой классификации с результатами наземных наблюдений на метеостанциях (рис. 5) и МРЛ.

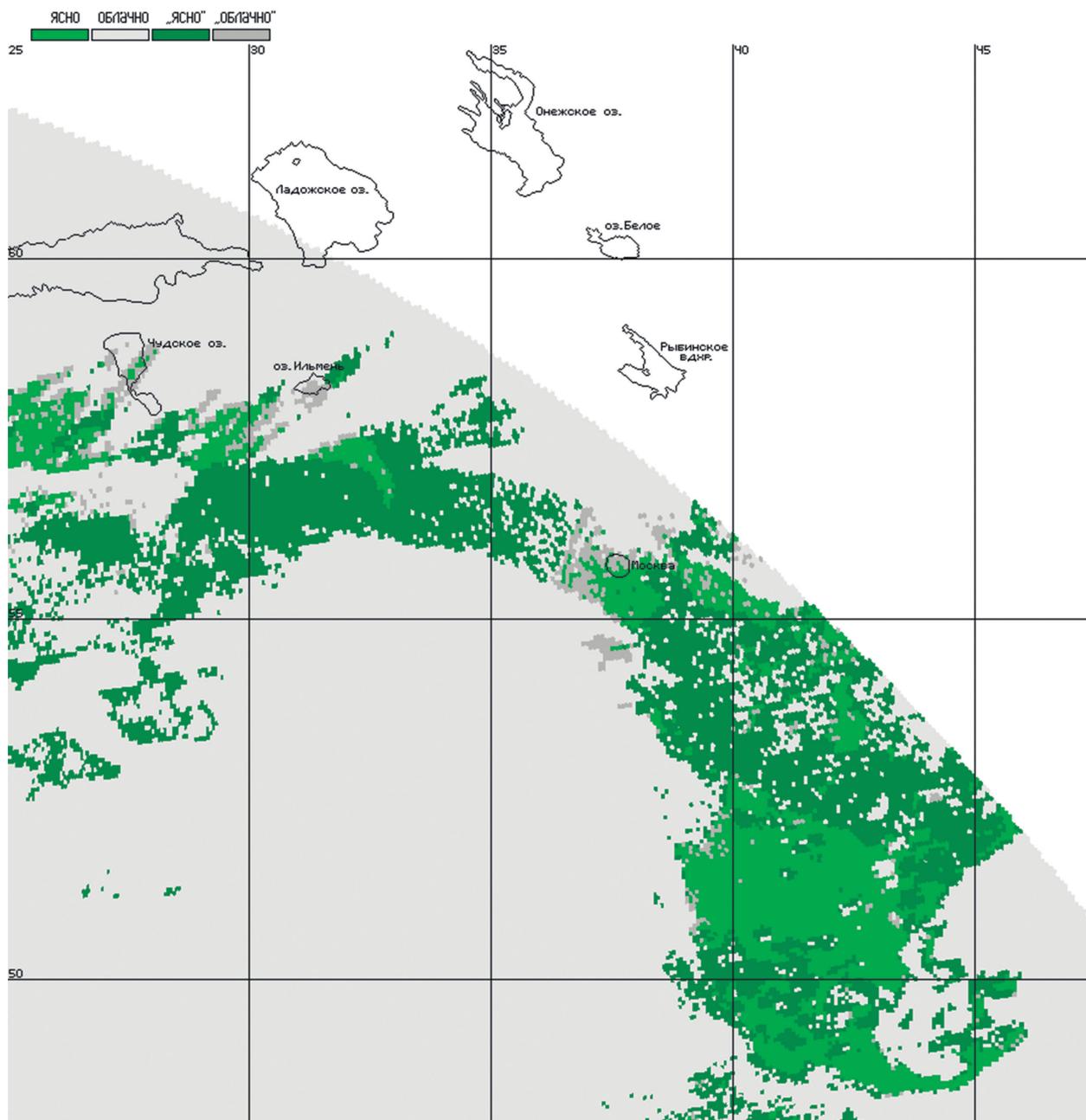


Рис. 4. Пример сопоставления оценок облачной маски, полученной по КПМ (валидируемая) и EUMETSAT (контрольная); (SEVIRI/Meteosat-10, 30.11.2013 14:45 ВСУ).

Примечание: ясно и облачно – совпавшие классы по обеим методикам, «ясно» и «облачно» – ошибочно детектированные классы по КПМ по сравнению с EUMETSAT

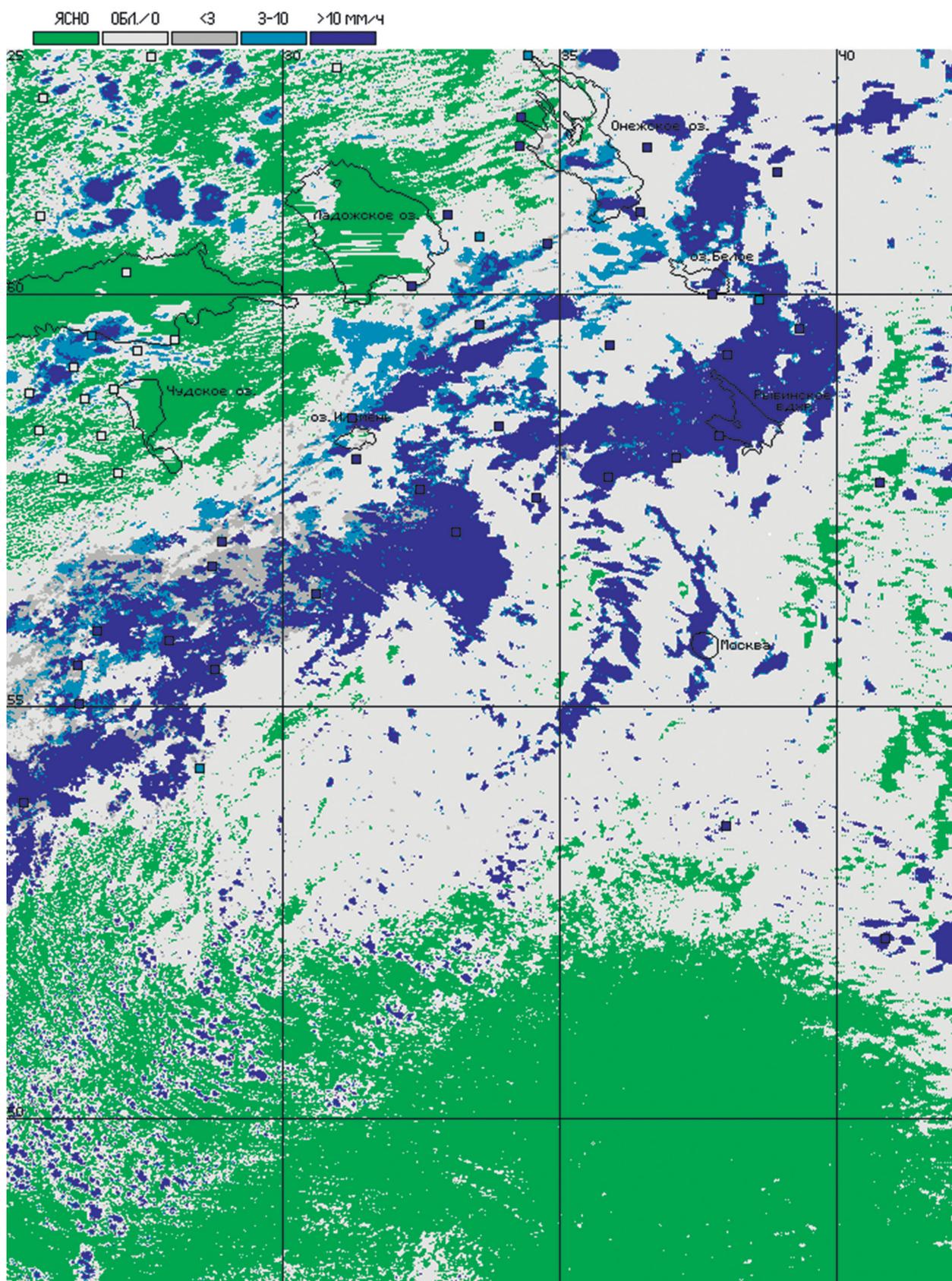


Рис. 5. Результат сопоставления оценок интенсивности осадков, полученных по КИМ по данным AVHRR/NOAA (1.08.2014 г., 11:43 ВСУ), с наземными метеонаблюдениями за погодой. Примечание: значками в тех же цветах показаны оценки интенсивности осадков на метеостанциях

Оценка работоспособности СПК «ЕТР»

В центрах EUMETSAT SAF NWC и SAF CM производятся следующие спутниковые продукты по облачности и осадкам (<http://www.eumetsat.int>, <http://www.cmsaf.eu>, <http://www.mwcsaf.smhi.se>): 1) облачная маска; 2) тип облачности; 3) $T_{\text{ВГО}}$ и $h_{\text{ВГО}}$; 4) микрофизические параметры облачности, в т.ч. фаза, оптическая толщина облака (τ) и эффективный радиус облачных частиц ($r_{\text{эф}}$); 5) вероятность выпадения осадков (PPO (probability of precipitation occurrence)); 6) интенсивность осадков из кучевообразной облачности. Для их получения использованы программные комплексы (ПК) MAIA (создан в Метеослужбе Франции для анализа данных AVHRR и адаптирован к информации SEVIRI/Meteosat (Cotin, 2007)) и SCANDIA (создан в SHMI (Swedish Hydrometeorological Institute) для анализа информации AVHRR/NOAA (Toss, 2010)). В качестве дополнительной информации в ПК используются поля вертикального распределения температуры и влажности воздуха, температуры подстилающей поверхности, p_{sea} , расчеты радиационных моделей, карты рельефа, типа и отражательных свойств подстилающей поверхности (климатические значения с коррекцией на текущие изменения по данным обработки спутниковых изображений за последние несколько дней, зенитный угол солнца и viz) и др. Расчеты проводятся отдельно для ночных, дневных и сумеречных условий, а также для суши, моря и прибрежных районов. Пороговые значения предикторных характеристик описываются линейными функциями, зависящими от типа подстилающей поверхности, h_{ref} , освещенности, viz и др. (Cotin, 2007).

Разработка обоих ПК началась в 1990х гг. и за прошедшее время они неоднократно модернизировались, а их продукты подвергались валидации как данными наземных наблюдений (на метеостанциях и МРЛ), так и другими спутниковыми методиками (MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), CPR (Cloud Profiling radar), CALIOP (Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization), CALIPSO (Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation) и др.). Ниже представлено сопоставление работоспособности КПИМ с ПК MAIA и SCANDIA.

Облачная маска и количество общей облачности

Оценки точности методик MAIA и SCANDIA наземными метеонаблюдениями за КОО в рамках проектов EUMETSAT SAF NWC и SAF CM (Kniffka, Lockhoff et al., 2013; Kniffka, Mereink, 2013; Karlsson, 2012; Dybbroe et al., 2006; Hollmann, 2013; <http://www.mwcsaf.smhi.se>), а также двух вариантов КПИМ представлены в *табл. 1*.

Требования ВМО, предъявляемые к точности оценок КОО для целей климатических исследований (Karlsson, 2012; Kniffka, Lockhoff et al., 2013): $\text{dev} = \pm 10\%$ для месячных оценок и $\text{dev} = \pm 15\%$ для суточных или $\text{dev} = \pm 1$ окт., СКО = 20%.

При сопоставлении соответствующих вариантов методик EUMETSAT SAF и КПИМ видно (*табл. 1*, а также Волкова, 2011), что КПИМ практически не уступает зарубежным

Таблица 1. Сопоставление точности оценок КОО и облачной маски, выполненных разными методиками

Оценки точности	КПМ			EUMETSAT SAF NWC и CM	
	SEVIRI		AVHRR	SEVIRI	AVHRR
	наз. набл.	Eumetsat*	назем. набл.	назем. набл.	назем. набл.
<i>dev</i> , %	-14 (± 20)	12 (8–17)	4 (± 10)	-2,7 (± 30)	~ 0 (± 10)
<i>dev</i> , окт.	-1,6	-1,4	-0,5 (-0,6– -0,1)	-	± 1
<i>dev</i> , окт.	2,2	2,2	1,5 (1,0–2,3)	-	1,4 (1,2–1,6)
СКО, %	-	-	~ 10 (до 20)	14 (12–17)	11 (до 30)
СКО, окт.	3,2	4,0	2,5 (1,7–2,9)	-	-
POD ($err \leq 1$ окт.), %	54	62	75 (58–82)	-	-
POD ($err \leq 2$ окт.), %	62	73	85 (70–91)	-	-
POD (0–1 окт.), %	55	-	74 (70–76)	-	-
POD (2–6 окт.), %	23	-	34 (31–39)	-	-
POD (7–8 окт.), %	97	-	91 (89–93)	-	-
FAR (0–1 окт.), %	27	-	42 (33–57)	-	-
FAR (2–6 окт.), %	39	-	37 (24–47)	-	-
FAR (7–8 окт.), %	48	-	26 (25–27)	-	-
HR (3класса), %	57	68	70	-	-
POD (0–2 окт.), %	-	60 (54–64)	77 (69–83)	95 (90–98)	80 (66–89)
POD (6–8 окт.), %	-	93 (88–97)	95 (91–96)		95 (94–97)
FAR (0–2 окт.), %	-	15 (8–20)	18 (14–23)	25 (21–27)	15,5 (12–34)
FAR (6–8 окт.), %	-	23 (21–26)	7 (6–10)		6,5 (3–11)
HR (2класса), %	-	-	-	80 (77–82)	91,5 (88–95)

Примечание: POD – вероятность правильного детектирования (Probability of Detection), FAR – «ложная тревога» (False Alarm Ratio), HR – точность детектирования (Hit Rate). Eumetsat* – точность КПМ относительно Eumetsat (Волкова, 2011). 1 окт.=12,5% покрытия небосвода. В скобках указана амплитуда изменчивости значений в зависимости от времени года и суток и др. условий

аналогам по качеству детектирования облачной маски в умеренных широтах. Все рассматриваемые методики для двух видов спутниковой информации в целом удовлетворяют предъявляемым к ним требованиям ВМО. Оценки КОО по данным SEVIRI обычно завышены по сравнению с наземными (завышение по оценкам MAIA для ЕТР может достигать 30% (Kniffka, Lockhoff et al., 2013), по оценкам КПМ – не более 20 %), а по данным AVHRR – ближе к наземным оценкам (в большинстве случаев $|dev| \leq 10$ % или ≤ 1 окт.). Наиболее часто ошибки детектирования облачности методиками EUMETSAT возникают при больших значениях viz (по данным SEVIRI), вблизи береговой линии, над водоемами и снежно-ледовым

покровом, зимой, ночью и в сумерках, при наличии температурных инверсий, а также при детектировании полупрозрачной облачности, низких и очень низких облаков (Kniffka, Lockhoff et al., 2013; Kniffka, Mereink, 2013; Karlsson, 2012). Точность оценок КОО по КПМ зависит от h_{ref} времени года и суток – она максимальна летом днем над сушей ($h_{ref} \leq 500$ м) или водоемами вдали от берегов и минимальна зимой ночью, при наличии температурных инверсий или сильном выхолаживании, а также на границе суша/вода с большой амплитудой температур или в горах, а для данных SEVIRI – при больших значениях viz .

Высота ВГО

Требования ВМО, предъявляемые к точности определения $h_{ВГО}$: по данным SEVIRI – $dev = \pm 800$ м ($dev = \pm 500$ м для оптически плотной облачности), СКО = 1500 м (Kniffka, Lockhoff et al., 2013; Kniffka, Mereink, 2013); по данным AVHRR – $dev = \pm 500$ м для оптически плотной облачности (Karlsson et al., 2013) и $dev = \pm 1000$ м для всей облачности, СКО = 1500 м (Karlsson, 2012).

При сопоставлении спутниковых оценок $h_{ВГО}$, полученных по данным радиометра SEVIRI в рамках проектов EUMETSAT SAF NWC и SAF CM, с наземными МРЛ наблюдениями и др. спутниковыми оценками достигнуто (Kniffka, Lockhoff et al., 2013): $dev = -650 - -1000$ м, СКО = 1500–2500 м. Если сравнивать только оптически плотную облачность без перистых (Ci), то оценки лучше: $dev = -690$ м, $|dev| = 1400$ м, СКО = 2150 м. Для горных регионов ошибки больше – $dev = -1205$ м, $|dev| = 2350$ м, СКО=3050 м. Ночью точность определения $h_{ВГО}$ хуже, чем в сумерках и днем, а над водой лучше, чем над сушей. Во всех случаях оценки по SEVIRI оказываются ниже контрольных из-за занижения $h_{ВГО}$ для облачности нижнего и среднего ярусов, в т.ч. полупрозрачной. При наличии полупрозрачной облачности в составе многослойной недооценка $h_{ВГО}$ может превышать 2 км (Kniffka, Mereink, 2013). Ошибки определения $h_{ВГО}$ в значительной степени связаны с типом облачности, т.к. применяются разные алгоритмы для определения $h_{ВГО}$ у очень низкой, низкой и средней достаточно плотной облачности; высокой плотной облачности; высокой полупрозрачной облачности. $h_{ВГО}$ не определяется для разорванной облачности и пикселей, детектированных как «частично заполненные облачностью» (Kniffka, Mereink, 2013) или определяется как константа для фрагмента спутникового изображения (Cotin, 2007).

Точность оценок $h_{ВГО}$ (SCANDIA) по данным AVHRR: $dev = -2660$ м, СКО = 4735 м (выборка 1982–2009 гг.) для всей облачности (Karlsson, 2012). Качество оценок $h_{ВГО}$ сильно зависит от τ (Karlsson, 2012; Karlsson et al., 2013): для $\tau > 0,3$ $dev = -435$ м, СКО = 2440 м, а для $\tau > 0,5$ $dev = -125$ м, СКО = 2140 м. В целом, для плотной облачности нижнего яруса $dev = 620$ м, СКО = 1280 м, для облачности среднего яруса $dev = -690$ м, СКО = 1605 м, для высокой облачности $dev = -5180$ м, СКО = 6350 м. Отмечается систематическое занижение значений $h_{ВГО}$ для высокой облачности и завышение для низкой облачности. Качество оценок $h_{ВГО}$ сильно зависит от точности предварительной классификации облачности по типам.

В КПМ $h_{\text{ВГО}}$ вычисляется по единой формуле независимо от типа облачности. Ошибки могут возникать для полупрозрачной облачности над небольшими водоемами с большой амплитудой температур относительно суши. Сквозь C_i иногда просвечивает нижележащая облачность. Как правило, у кучевообразной облачности $h_{\text{ВГО}}$ восстанавливается точнее, чем у слоистообразной (табл. 2).

Таблица 2. Сопоставление оценок высоты ВГО, выполненных разными методиками, для разных классов облачности

Климатич. (ВМО)		Eumetsat (SEVIRI) (сред.)	Класс облачности (КПМ)	КПМ				МРЛ (сред.)
Класс облачности	min-max			AVHRR		SEVIRI		
				Сред.	min-max	Сред.	min-max	
Ns	2–7	6,2	Ns,Cb	4,2	2,5–6,5	4,3	2,1–12,3	3,8
St	<2	2,2	St	1,6	0,1–2,8	0,8	0,1–3,3	2,9
Sc	<2	3,6	Sc,Cu	2,7	1–6,5	3,3	0,4–7,6	2,6
Cu	2–5							
Cb	3–15 (и выше)	10,9	Cb calv.	5,1	3,7–6,3	6,9	3,9–19,4	4,2
			Cb cap.	8,4	6,5–17,5	9,9	5,5–13,6	7,7
			Cb inc.	10,3	5,7–17,5	12,8	6,9–19,5	7,1
			Cb+Ci	7,0	5,6–14	8,5	5,2–18,7	5,4
Ac	2–7	6,4	Ac,Cu	3,0	1,2–6,5	3,2	0,8–7,5	6,8
As	2–7		As	3,8	1,6–6,5	4,9	1,4–7,7	6,2
			low+As	4,2	1,6–6,6	4,9	1,6–7,6	4,7
Ci	5–8 (до 18)	11,1	Ci,Cs	6,8	5,8–12	6,5	5,4–12,5	8,8
			med+Ci	7,0	5,4–12,3	7,3	5,4–12,6	7,9
			NsAsCs	7,2	5,4–16,0	7,9	5,2–17,0	5,8

Примечание: климатические оценки по ВМО взяты из (Ясногородская, 1978).
Оценки Eumetsat (SEVIRI) получены Волковой Е.В. для архива 2009-2010 гг. (Волкова, 2011).
Типы облачности по КПМ см. подробнее в Волкова, 2013 и Волкова, Успенский, 2010.

В целом как средние для класса облачности, так и диапазон изменчивости значений $h_{\text{ВГО}}$, полученные КПМ по данным AVHRR и SEVIRI, хорошо согласуются с климатическими оценками (табл. 2) и между собой (для большинства облачных классов $|\text{dev}| \leq 1$ км). Наибольшие различия ($|\text{dev}| \geq 1,5$ км) отмечаются для мощных кучево-дождевых облаков (Cb), для которых по данным SEVIRI средние значения $h_{\text{ВГО}}$ выше, чем по данным AVHRR из-за того, что регион наблюдения AVHRR был ограничен умеренными широтами, а у SEVIRI рассматривался весь круг обзора (облака в тропиках более мощные (Мазин, Хргиан, 1989)).

Для территории ЕТР $|\text{dev}|$ для них не более 0,5 км. Исследования авторов (Волкова, Успенский, 2009) показывают, что ошибки определения $h_{\text{ВГО}}$ в большинстве случаев не превосходят 10–15% от полученного значения, т.е. $|\text{dev}| \leq 400$ м для низкой облачности, $|\text{dev}| \leq 800$ м для облачности среднего яруса и $|\text{dev}| \leq 1,5\text{--}2$ км для облачности верхнего яруса, многослойной и большого вертикального развития. Величина dev зависит от τ (в меньшей степени) и от точности (в т. ч. пространственного и временно́го разрешения) дополнительной информации о $T_{a_{\text{sea}}}$, $T_{a_{\text{max}}}$ и p_{sea} . Она не зависит от времени суток и h_0 , но на нее влияют величина $v_{\text{из}}$ (для информации SEVIRI). Ошибки возможны при наличии температурных инверсий или очень маленьких вертикальных температурных градиентах.

Сопоставление результатов оценок $h_{\text{ВГО}}$ по данным SEVIRI с помощью КПМ и методики EUMETSAT, выполненное в (Волкова, 2011), показывает, что в 55% случаев $|\text{dev}| \leq 2,5$ км, а в 70% случаев – $|\text{dev}| \leq 3,5$ км, в 15% случаев – $|\text{dev}| > 5$ км; в среднем $|\text{dev}| = 2,8$ км, СКО = 3,6 км. В целом, КПМ несколько завышает значения $h_{\text{ВГО}}$ (возможно из-за более грубого масштаба оценок EUMETSAT – 3×3 пиксела). Однако чем больше τ , тем ближе значения $h_{\text{ВГО}}$, полученные по оценкам разных методик (табл. 2). У классов облачности, содержащих C_i или высокослоистую (As), оценки $h_{\text{ВГО}}$ по КПМ оказываются заметно выше, чем по данным EUMETSAT. Средние значения $h_{\text{ВГО}}$, полученные для соответствующих классов облачности по EUMETSAT (табл. 2), заметно отличаются от оценок с помощью КПМ и близки к верхней границе климатической информации для соответствующих классов облачности.

Тип облачности (облачный анализ)

Классификация облачности по типам, применяемая в рамках проектов EUMETSAT SAF NWC и CM, отличается от принятой в ВМО (Ясногородская, 1978). Деление на типы происходит, например, в зависимости от барической $h_{\text{ВГО}}$, определяемой по радиационной температуре, и τ . Так, уровни 675 и 450 гПа разделяют облачность нижнего, среднего и верхнего ярусов, а в зависимости от значений τ в пределах каждого яруса выделяются облачные классы (Sedlar, Karlsson, 2011). В других методиках, например (Cotin, 2007), деление на классы происходит в зависимости от значений радиационной температуры и др. предикторов. По информации SEVIRI обычно выделяются 9 (<http://www.eumetsat.int>, <http://www.cmsaf.eu>) или 15 классов (Cotin, 2007), а по информации AVHRR – 9 (Sedlar, Karlsson, 2011), 10 (<http://www.nwcsaf.smhi.eu>) и более классов с использованием дополнительных предикторов. Из-за того, что во всех этих методиках деление облачности на типы предшествует определению $h_{\text{ВГО}}$, для них типичны одинаковые ошибки: тонкие C_i ошибочно принимаются за разорванную облачность и наоборот, а низкая и очень низкая облачность в случае с температурной инверсией или низкая облачность, перекрытая C_i , детектируются как облачность среднего яруса.

В КПМ используется классификация ВМО (Мазин, Хргиан, 1989). Выделяются 13 классов, в т.ч. 4 вида многослойной (Волкова, 2013; Волкова, Успенский, 2010),

в зависимости от $h_{\text{ВГО}}$, W_{max} и др. Исследования авторов показывают, что ошибки определения типа облачности по КПМ не превышают 5–10% от всех облачных пикселей и возникают на краях облачных классов и массивов, т.е. связаны с проблемой частично заполненных пикселей. Ошибочно принимаемые друг за друга классы облачности оказываются близки друг к другу по $h_{\text{ВГО}}$, τ , мощности, толщине и плотности слоя C_i или A_s и др. Ошибка проведения границы между этими классами обычно не превышает 1–2 пикселей. Грубых ошибок замечено не было. Неточности классификации возникают при больших значениях $\nu_{\text{из}}$ по информации SEVIRI (фиксируется тепловое излучение не от ВГО, а от боковой части облака, из-за этого облако кажется оптически более плотным), над водоемами с температурой, сильно отличающейся от температуры суши (при просвечивании более теплых, чем суша, водоемов облако кажется более низким и оптически тонким, а в случае с более холодными, чем суша, водоемами, τ и мощность облака увеличиваются), и в горах (из-за сложностей соотношения $h_{\text{ВГО}}$ и h_{ref} при неизменной мощности и водности облака может ошибочно меняться его тип за счет изменения ярусности).

Из-за того, что в разных спутниковых методиках используются разные принципы деления облачности на классы, существуют большие трудности при сопоставлении работоспособности этих методик. В (Волкова, 2011) была предпринята попытка сопоставить результаты работы двух методик (КПМ и EUMETSAT) для данных радиометра SEVIRI (при сопоставлении классов облачности автор исходил из схожести названий классов). Исследования показали низкую корреляцию. Хотя совпадение обеих методик по детектированию мощных C_b достигает ~100%. EUMETSAT теряет относительно КПМ тонкую полупрозрачную, а КПМ относительно EUMETSAT – очень низкую облачность (из-за ложного завышения КОО по EUMETSAT). Структура потерь по классам облачности слабо зависит от времени года, но сильно – от времени суток.

Фазовое состояние воды в облачных частицах

В рамках проектов EUMETSAT SAF NWC и SAF CM в дневное время определяется фаза вблизи ВГО или для каждого яруса облачности, при этом выделяются 2 класса («лед», «вода») (Kniffka, Meirink, 2013) или 3 класса («лед», «вода», «смешанные») только по информации SEVIRI (Meirink et al., 2010). Первая методика плохо работает над снежно-ледовыми поверхностями и в многослойной облачности (нижняя облачность просвечивает сквозь C_i). В ряде случаев переоценка «водяных» облаков может достигать 100 % (Kniffka, Meirink, 2013). Ограничения второй методики – низкое качество для облаков среднего яруса и C_i , а также плотных облаков с крупными кристаллами и для многослойной облачности (Meirink et al., 2010).

КПМ выделяет 4 класса облачности в зависимости от фазы вблизи ВГО: «жидко-капельная», «кристаллическая», «смешанная, жидкая фаза преобладает» и «смешанная, твердая фаза преобладает». Получаемые значения повторяемости этих классов находят-

ся в хорошем соответствии с описанием типов облачности и климатическими оценками (Мазин, Хргиан, 1989). Количественная валидация спутниковых оценок не проводилась из-за отсутствия регулярных наблюдений. Однако высокая точность классификации косвенно подтверждается сопоставлением результатов детектирования зон осадков, грозы и града (используют сведения о *faza*) с результатами наземных наблюдений. В целом точность классификации в зависимости от синоптической ситуации, времени года и суток, h_{ref} типа облачности и др. составляет не менее 80% всех облачных пикселей. Ошибки оценок почти всегда не превышают ± 1 соседний класс. Грубых ошибок, когда вместо «ледяных» облаков детектируются «водяные» или наоборот, отмечено не было. Неточная классификация может отмечаться для тонких *Ci* (просвечивает нижележащая облачность) и частично заполненных облачностью пикселей. В случае с мелкими кучевообразными облаками, размеры которых существенно меньше элемента спутникового разрешения, получается средняя оценка для пикселя.

Интенсивность и тип осадков у поверхности земли

Требования, предъявляемые ВМО к информации об осадках, сильно варьируют в зависимости от дальнейших целей ее использования (Kidd et al., 2010): пространственное разрешение – 10–500 км (оптимально 1–100 км), периодичность – 1–72 ч (оптимально от 2 мин до 1 сут.), точность – 1–5 мм/ч или 5–10 мм/сут. (оптимально 0,05–0,1 мм/ч или 0,5–2 мм/сут) (Kidd et al., 2010).

В рамках проектов EUMETSAT SAF NWC и SAF CM в светлое время суток определяются POP и интенсивность осадков (*I*) из кучевообразной облачности (<http://www.eumetsat.int>, <http://www.cmsaf.eu>, <http://www.nwcsaf.smhi.eu>). Для зон с $I \geq 0,2$ мм/ч в зависимости от микрофизических свойств облака ($r_{эф}$, τ) и его типа выделяется 5 градаций PPO: 0–20, 20–40, 40–60, 60–80 и 80–100 %. Мгновенная интенсивность и суммы осадков за час рассчитываются только для кучевообразной и слоисто-кучевообразной облачности для пикселей с PPO > 0% по $r_{эф}$, τ и *faza*. Часовые суммы интегрируются по методу трапеций за час для серии спутниковых наблюдений (Fernandez, 2013). Для ситуаций с неопределенными $r_{эф}$ и τ PPO = 0% и *I* = 0 мм/ч, хотя осадки могут выпадать и из слоистообразной облачности. Конечный результат для интенсивности и сумм представлен в виде 12 градаций: 0–0,2; 0,2–1; 1–2; 2–3; 3–5; 5–7; 7–10; 10–15; 15–20; 20–30; 30–50 и >50 мм/ч. Работоспособность методики оценивалась по данным МРЛ. Для мгновенных интенсивностей POD = 84–85%, FAR = 25–27%, dev = 0,2–0,9 мм/ч, |dev| = 0,7–1,4 мм/ч, СКО = 1,9–4,1 мм/ч. Для часовых сумм – POD = 91–92%, FAR = 47%, dev = 0,2–0,7 мм/ч, |dev| = 0,5–0,9 мм/ч, СКО = 1,4–2,6 мм/ч. Точность метода зависит от типа облачности и h_0 (интенсивность осадков ложно усиливается с уменьшением h_0). Большие ошибки возникают над снежно-ледовыми поверхностями и при наличии снега и крупных ледяных кристаллов в облаках.

Для детектирования зон осадков и определения I_{\max} в КПМ используется информация о W_{\max} , SW, $T_{\text{ВГО}}$, $h_{\text{ВГО}}$, $h_{\text{НГО}}$, фаза, типе облака и др. По информации SEVIRI выделяется 8 градаций I_{\max} : 0,0–0,5; 0,5–3; 3–10; 10–20; 20–50; 50–100 и >100 мм/ч, а по информации AVHRR – 9 градаций: 0,0–1; 1–3; 3–8; 8–15; 15–25; 25–50; 50–100 и >100 мм/ч. Оценки работоспособности КПМ при сопоставлении с данными наземных метеонаблюдений представлены в табл. 3.

Таблица 3. Сопоставление с наземными метеонаблюдениями работоспособности 2х вариантов КПМ по детектированию осадков разного типа и интенсивности, а также ОЯП

Оценки работоспособности	КПМ	
	AVHRR/NOAA	SEVIRI/Meteosat
<i>POD б/ос, %</i>	62–85 (76)	59–80 (70)
<i>POD ос, %</i>	90–96 (91)	72–80 (76)
<i>FAR ос, %</i>	3–7 (4)	7–9 (8)
<i>Hit Rate, %</i>	87–90 (89)	69–78 (74)
<i>РРО в зоне «осадки», %</i>	93–97 (96)	79–93 (91)
<i>РРО вне зоны «осадки», %</i>	11–28 (18)	15–38 (33)
<i>POD сл.ос., %</i>	72–90 (87)	-
<i>POD ум.ос., %</i>	75–88 (82)	-
<i>POD сил.ос., %</i>	29–82 (73)	-
<i>POD снег, %</i>	66–87	41–43 (42)
<i>POD дождь, %</i>	74–84	64–74 (70)
<i>POD ост.ос., %</i>	12–22	18–21 (20)
<i>POD гроза, %</i>	29–86	14–44
<i>POD град, %</i>	30–95	5–22

Примечание: климатические оценки по ВМО взяты из (Ясногородская, 1978). Оценки Eumetsat (SEVIRI) получены Волковой Е.В. для архива 2009-2010 гг. (Волкова, 2011). Типы облачности по КПМ см. подробнее в Волкова, 2013 и Волкова, Успенский, 2010.

Анализ табл. 3 показывает, что КПМ лучше детектирует зоны осадков по информации AVHRR, чем по данным SEVIRI. В целом более чем в 85–90 % случаев расхождение спутниковой и наземной оценок интенсивности осадков не превышает ± 1 градацию, а более чем в 95% случаев ± 2 градации. Точность КПМ зависит от времени года и суток, $h_{\text{рег}}$, $T_{\text{приз}}$, T_{sea} и др. Наибольшие ошибки возникают в холодный период года (особенно при наличии температурных инверсий) в ночное время, при больших значениях $v_{\text{из}}$ (для информации SEVIRI), в случае с многослойной облачностью, а также над небольшими водоемами с большой амплитудой температур относительно суши при неплотной облачности (над холодными водоемами осадки ложно усиливаются).

Для обоих видов спутниковой информации КПМ определяет тип осадков у поверхности земли (13 классов) и ОЯП (гроза, град и обледенение (по 4 класса вероятности/интенсивности)) (см. Волкова, Успенский, 2010; Волкова, 2013) по значениям W_{\max} , SW , $T_{\text{ВГО}}$, $h_{\text{ВГО}}$, I_{\max} и др. Оценки работоспособности КПМ приведены в *табл. 3*. КПМ точнее детектирует тип осадков и ОЯП по информации AVHRR, чем по данным SEVIRI. Качество классификации зависит от времени года и суток (оно максимально днем летом и минимально ночью зимой), h_{ref} , $Ta_{\text{приз}}$, Ta_{sea} и др. Для информации SEVIRI качество детектирования убывает с увеличением viz и уменьшением масштаба и интенсивности явления.

По измеренным значениям I_{\max} в КПМ рассчитывается средняя за сутки интенсивность осадков, по которой с помощью эмпирической формулы (Волкова, 2014) оцениваются $\Sigma I_{\text{сут}}$. Точность методики при сопоставлении с наземными метеонаблюдениями: $dev = 0,2$ мм, $|dev| \approx 0$ мм, СКО = 1–8 мм в зависимости от времени года (зимой $|dev|$ и СКО меньше, т.к. меньше интенсивность осадков). Для $\Sigma I_{\text{мес}}$ $|dev| = \text{СКО} = 5–30$ мм в зависимости от сезона. Для $\Sigma I_{\text{год}}$ в 70–80% случаев значения $|dev|$ не превышают 25% величины оценок по наземным наблюдениям, и в 45-50% случаев – 10 % величины. Использование информации SEVIRI (по сравнению с данными AVHRR) может несколько завышать оценки ΣI в среднем по региону, но амплитуда изменчивости оказывается меньше из-за более грубого пространственного разрешения. На практике отличие наземных оценок $\Sigma I_{\text{мес}}$ для отдельных метеостанций достаточно часто достигает 50% от фоновых значений (Gruber, Levizzani, 2008), поэтому получаемые КПМ оценки ΣI можно считать удовлетворительными для мониторинга режима увлажнения ЕТР.

Заключение

СПК «ЕТР» осуществляет классификацию и валидацию спутниковых данных (AVHRR/NOAA и SEVIRI/Meteosat) для территории ЕТР в автоматическом режиме круглосуточно. Структура СПК позволяет достаточно легко адаптировать его к другому схожему виду спутниковой информации (например, МСУ-ГС со спутника «Электро» или МСУ-МР со спутника «Метеор»). Полная автоматическая обработка спутниковых данных осуществляется: классификация – не реже одного раза в сутки, валидация – 1 раз в сутки и ежемесячно. Запуск автоматической классификации и валидации происходит сразу после появления в наличии в соответствующих БД файлов с необходимыми данными. В процессе работы каждый ПП автоматически «подкачивает» необходимые ему для работы данные из соответствующих БД, пути к которым, названия файлов и другая вспомогательная информация указаны в соответствующих информационных файлах.

СПК «ЕТР» не требует больших вычислительных ресурсов и может быть установлен на любую ПЭВМ (под Windows), имеющую доступ к БД со спутниковыми и прогностическими данными, результатами наземных наблюдений на метеостанциях и МРЛ, а также аналогичными результатами классификаций других спутниковых методик.

Получаемые с помощью СПК «ЕТР» облачные продукты в основном удовлетворяют предъявляемым к ним требованиям ВМО и не уступают по качеству зарубежным аналогам, имея перед ними ряд преимуществ. Так, КППМ:

- работает круглосуточно (точность несколько падает в ночное время), над любой подстилающей поверхностью (точность ухудшается с увеличением h_{ref} и в случае большой температурной неоднородности подстилающей поверхности) и для любого типа облачности;
- детектирует больше облачных продуктов (определяется $h_{НГО}$, W_{max} , SW, тип осадков, а также вероятность и интенсивность ОЯП) и классов для соответствующих параметров (у фаза и типа облачности);
- используется меньшее количество дополнительной информации;
- облачная маска точнее детектируется в высоких широтах;
- $h_{ВГО}$ для соответствующих классов облачности лучше согласуется с климатическими оценками для них;
- облачный анализ выполняется с более высоким пространственным разрешением, выделяет большее количество классов и позволяет по ним предварительно оценивать степень опасности облачного покрова.

Литература

1. Атлас облаков // Под ред. М.М.Ясногородской. Л.: Гидрометиздат, 1978. 268 с.
2. 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.
3. 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.
4. Волкова Е.В. Сравнительный анализ работоспособности двух пороговых методик автоматического детектирования облачности и оценки параметров облачного покрова по данным радиометра SEVIRI с МИСЗ Meteosat-9. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 4. С. 54–60.
5. 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.
6. Волкова Е.В., Успенский А.Б. Сравнительный анализ оценок высоты верхней границы облачности по данным радиометра AVHRR МИСЗ NOAA и метеорологического радиолокатора. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2009. Вып. 6. Т. 2. С. 104–110.
7. Облака и облачная атмосфера. Справочник / Под ред. И.П. Мазина и А.Х. Хргиана. Л.: Гидрометиздат, 1989. 647 с.
8. Cotin L.F.L. Algorithm Theoretical Basis Document for “Cloud Products” (CMA-PGE01, CT-PGE02&CTTH-PGE03 v.1.4) // SAF/NWC/CDOP/MFL/SCI/ATBD/01. Issue 1. Rev. 4. November 17, 2007. 69 p.
9. Dybbroe A., Hornquist S., Lavanant L., Marguinaud P. Cloud Masking for the O&SI SAF Global METOP/AVHRR SST Product // Proceedings of the 2006 Satellite Conference. Helsinki, Finland. 12–16 June 2006. 8 pp.
10. Fernandez P. Algorithm Theoretical Basis Document for “Precipitation Product from Cloud Physical Properties” (PPh-PGE14: PCPh v.1.0 & CRPh v.1.0) // SAF/NWC/CDOP2/INM/SCI/ATBD/14. Issue 1.0. July 15, 2013. 40 p.
11. Hollmann R. Annual Product Quality Assessment Report 2012 // SAF/CM/DWD/AQA/OR2013. Issue 1.1. October 15, 2013. 71 p.
12. Karlsson K.G. CM SAF Cloud, Albedo, Radiation Dataset, AVHRR-based, Edition 1 (CLARA-A1). Cloud Products. Validation Report // SAF/CM/SMHI/VAL/Gac/CLD. Issue 1.2. April 30, 2012. 133 p.
13. Karlsson K.G., Riihele A., Muller R., Meirink J.F., Sedlar J., Stengel M., Lockhoff M., Trentmann Y., Kaspar F., Hollmann R., Wolters E. CLARA-1: The CM SAF cloud, albedo and radiation dataset from 28yr of global AVHRR data // Atmos. Chem. Phys. Discuss. Vol. 13. 2013. P. 935–982.
14. 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.
15. Kniffka A., Meirink J.F., Stengel M. CM SAF: Product User Manual. SEVIRI dataset cloud products // Edition 1. SAF/CM/DWD/PUM/SEV/CLD. Issue 1.2. October 16, 2013. 45 p.

16. Kniffka A., Lockhoff M., Meirink J.F., Stengel M. CM SAF: Validation Report. SEVIRI cloud products // Edition 1, SAF/CM/DWD/VAL/SEV/CLD. Issue 1.2. October 16, 2013. 88 p.
17. Meirink J.F., Roebeling R., Wolters E., Deneke H. CM SAF: Algorithm Theoretical Basis Document. Cloud Physical Products: AVHRR/SEVIRI // SAF/CM/KNMI/ATBD/PPP. Issue 1.1. June 06, 2010. 24 p.
18. Sedlar J., Karlsson K.G. Algorithm Theoretical Baseline Document Joint Cloud Property Histogram Products AVHRR/SEVIRI (CM-SAF Products CM-11, CM-12) // SAF/CM/SMHI/PDC/CTY. Issue 1.1. September 27, 2011. 18 pp.
19. Thoss A. Algorithm Theoretical Basis Document for SAF NWC/PPS “Cloud Mask” (CM-PGE01 v. 3.0 – patch 1) // SAF/NWC/CDOP/SMHI-PPS/SCI/ATBD/1. Issue 2.3. August 17, 2010. 48 p.

Specialized complex of programs for retrieving and validating satellite estimates of cloud and precipitation

E.V. Volkova, A.B. Uspensky, A.V. Kukharsky

*State Research Centre of Space Hydrometeorology “Planeta”
Moscow 123242, Russia*

E-mail: quantocosa@bk.ru, uspensky@planet.iitp.ru, kuha@mail.ru

The Specialized Complex of Programs (SCP) is introduced. Being developed in the State Research Centre of Space Hydrometeorology “Planeta” the SCP automatically pixel-by-pixel classifies the SEVIRI/Meteosat-10 and AVHRR/NOAA data to retrieve cloud, precipitation and weather hazard properties for day and night all year round conditions above land, water and snow/ice surfaces for the European territory of Russia (ETR), and automatically validates satellite estimations by ground-based observations at meteorological stations, the meteorological radar, and the same products of independent satellite complexes. The internal structure of the SCP permits to adjust it rather easily to any other similar satellite information (for example, to MSU-GS Electro or MSU-MR Meteor data). The classifying process is set to each satellite observation while the complete validation procedure starts daily and monthly after all the necessary satellite and supplementary information is available. The SCP “ETR” does not require much computing resources and can be set on any personal computer having access to the archives contained satellite data, forecasted fields of pressure at sea level and air temperature at 9 standard levels and at ground, observations at meteorological stations and by the ground-based meteorological radar, and independent satellite estimations. The cloud and precipitation products obtained by the SCP satisfy the requirements on quality proposed by the World Meteorological Organization and demonstrate good similarity to the EUMETSAT cloud products exceeding the latter because they are produced day and night above any surface and detect more cloud products and discriminate more classes while using less supplementary information.

Keywords: SEVIRI, Meteosat-9, Meteosat-10, AVHRR, NOAA, cloud mask, cloud analysis, cloud top height, precipitation, thunderstorm, hail, ETR

References

1. *Atlas oblakov* (Atlas of clouds), Ed. M.M. Yasnogorodskaya, Leningrad: Gidrometizdat, 1978, 268 p.
2. Volkova E.V. Opredelenie sum osadkov po dannym radiometrov SEVIRI/Meteosat-9,10 i AVHRR/NOAA dlya Evropeiskoi territorii Rossii (Estimation of precipitation amount using SEVIRI/Meteosat-9 and AVHRR/NOAA data for the European Territory of Russia), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, Vol. 11, No. 4, pp. 163–177.
3. Volkova E.V. Otsenki parametrov oblachnogo pokrova, osadkov i opasnykh 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.
4. Volkova E.V. Sravnitel'nyi analiz rabotosposobnosti dvuh metodik avtomaticheskogo detektirovaniya oblachnosti i otsenki parametrov oblachnogo pokrova po dannym radiometra SEVIRI s MISZ Meteosat-9 (Comparison of two threshold methods for cloud cover parameters estimation using SEVIRI/Meteosat-9 data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011, Vol. 8, No. 4, pp. 54–60.
5. 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.

6. Volkova E.V., Uspenskii A.B. Sravnitelnyi analiz otsenok vysoty verhney granitsy oblachnosti po dannym radiometra AVHRR MISZ NOAA i meteorologicheskogo radiolokatora (Comparison of AVHRR/NOAA and radar estimation of cloud top height), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2009, Vol. 6, No. 2, pp. 104–110.
7. Mazin I.P. and Hrgian A.H. *Oblaka i oblachnaya atmosfera* (Clouds and cloud atmosphere), Leningrad: Gidrometizdat, 1989, 647 p.
8. Cotin L.F.L. Algorithm Theoretical Basis Document for “Cloud Products” (CMa-PGE01, CT-PGE02&CTTH-PGE03 v.1.4), *SAF/NWC/CDOP/MFL/SCI/ATBD/01*, Issue 1, Rev. 4, November 17, 2007, 69 p.
9. Dybbroe A., Hornquist S., Lavanant L., Marguinaud P. Cloud Masking for the O&SI SAF Global METOP/AVHRR SST Product, *Proceedings of the 2006 Satellite Conference*, Helsinki, Finland, 12–16 June 2006, 8 p.
10. Fernandez P. Algorithm Theoretical Basis Document for “Precipitation Product from Cloud Physical Properties” (PPh-PGE14: PCPh v.1.0 & CRPh v.1.0), *SAF/NWC/CDOP2/INM/SCI/ATBD/14*, Issue 1.0, July 15, 2013, 40 p.
11. Hollmann R. Annual Product Quality Assessment Report 2012, *SAF/CM/DWD/AQA/OR2013*, Issue 1.1, October 15, 2013, 71 p.
12. Karlsson K.G. CM SAF Cloud, Albedo, Radiation Dataset, AVHRR-based, Edition 1 (CLARA-A1). Cloud Products. Validation Report, *SAF/CM/SMHI/VAL/Gac/CLD*, Issue 1.2, April 30, 2012, 133 p.
13. Karlsson K.G., Riihele A., Muller R., Meirink J.F., Sedlar J., Stengel M., Lockhoff M., Trentmann Y., Kaspar F., Hollmann R., Wolters E. CLARA-1: The CM SAF cloud, albedo and radiation dataset from 28yr of global AVHRR data, *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, Vol. 13, 2013, pp. 935–982.
14. Kidd C., Levizzani V., Laviola S. Quantitative Precipitation Estimation from Earth Observation Satellites – Rainfall: State of Science, *Geophysical Monograph Series 191*, 2010, pp. 127–158.
15. Kniffka A., Meirink J.F., Stengel M. CM SAF: Product User Manual. SEVIRI dataset cloud products, *SAF/CM/DWD/PUM/SEV/CLD*, Issue 1.2, October 16, 2013, 45 p.
16. Kniffka A., Lockhoff M., Meirink J.F., Stengel M. CM SAF: Validation Report. SEVIRI cloud products, *SAF/CM/DWD/VAL/SEV/CLD*, Issue 1.2, October 16, 2013, 88 p.
17. Meirink J.F., Roebeling R., Wolters E., Deneke H. CM SAF: Algorithm Theoretical Basis Document. Cloud Physical Products, *AVHRR/SEVIRI, SAF/CM/KNMI/ATBD/PPP*, Issue 1.1, June 06, 2010, 24 p.
18. Sedlar J., Karlsson K.G. Algorithm Theoretical Baseline Document Joint Cloud Property Histogram Products AVHRR/SEVIRI (CM-SAF Products CM-11, CM-12), *SAF/CM/SMHI/PDC/CTY*, Issue 1.1, September 27, 2011, 18 p.
19. Thoss A. Algorithm Theoretical Basis Document for SAF NWC/PPS “Cloud Mask” (CM-PGE01 v. 3.0 – patch 1), *SAF/NWC/CDOP/SMHI-PPS/SCI/ATBD/1*, Issue 2.3, August 17, 2010, 48 p.