Оценки параметров облачного покрова и осадков по данным радиометра МСУ-МР полярно-орбитального метеоспутника «Метеор-М» № 2 для Европейской территории России

Е.В. Волкова

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

Многоспектральная комплексная пороговая методика (КПМ) автоматической классификации параметров облачного покрова, осадков и опасных явлений погоды (ОЯП) в круглосуточном режиме для Европейской территории России и сопредельных стран по данным радиометра AVHRR с полярно-орбитальных метеоспутников серии NOAA была модернизирована и специально приспособлена для данных сканера МСУ-МР с полярно-орбитального метеоспутника «Метеор-М» № 2 для той же территории. В качестве пре-дикторов методика использует измерения МСУ-МР в каналах 4–6 (λ=3,8; 11 и 12 мкм), а также их разности. Пороговые значения рассчитываются для каждого пиксела спутникового изображения как функции разных параметров. Дополнительно используются прогностические поля вертикального распределения температуры воздуха и атмосферного давления на уровне моря, цифровая карта рельефа, а также параметры облачности и осадков, полученные на начальных этапах классификации. На примере архива синхронных спутниковых и наземных наблюдений за 2015–2016 гг. проведена валидация полученных с помощью КПМ по данным МСУ-МР результатов определения параметров облачности, осадков и ОЯП данными наземных наблюдений на метеостанциях, а также выполнено сравнение с аналогичными результатами, полученными КПМ по данным AVHRR, с климатическими оценками и зарубежными аналогами. Результаты сопоставления показывают хорошее качество выходных информационных продуктов КПМ, не уступающее зарубежным методикам и удовлетворяющее предъявляемым к ним пользователями требованиям. Результаты классификации КПМ рекомендуются к использованию в качестве равноценной замены наземным метеонаблюдениям для мезомасштабного мониторинга облачного покрова и его параметров.

Ключевые слова: МСУ-МР, Метеор-М, облачная маска, тип облачности, зоны осадков, высота ВГО, интенсивность осадков, водность, водозапас

Одобрена к печати: 25.09.2017 DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-5-300-320

Введение

В настоящее время при анализе и прогнозе погоды, а также моделировании различных погодных явлений в качестве дополнения к наземным наблюдениям все чаще используют спутниковые оценки параметров облачного покрова, в том числе осадков, гроз и града. Спутниковый мониторинг облачности проводится с помощью различных сканирующих устройств, установленных на геостационарных и полярно-орбитальных (п/о) метеоспутниках. Для каждого вида спутниковой информации разработано большое число разнообразных методик, основанных на пороговых, кластерных и других подходах.

Европейская организация по эксплуатации метеорологических спутников (Еврометсат, *англ*. European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites — EUMETSAT, http://www.eumetsat.int) обеспечивает в ряде прикладных спутниковых центров SAF (Satellite Application Facility), таких как SAF NWC (NoWCasting) и SAF CM (Climate Monitoring), для нужд прогноза погоды и исследования климата производство на регулярной основе спутниковых продуктов по облачности и осадкам как регионального, так и глобального покрытия (http://www.cmsaf.eu, http://www.nwcsaf.smhi.se): облачная маска, температура и высота верхней границы облачности (ВГО) ($T_{\rm BFO}$ и $h_{\rm BFO}$), фазовое состояние воды вблизи ВГО (faza), оптическая толщина облака (COT), эффективный радиус облачных частиц (R_{aff}), тип облачности,

вероятность выпадения осадков (PPO — Probability of Precipitation Occurrence) и интенсивность (Л) осадков из кучевообразной облачности. Для их получения использованы программные комплексы (ПК) MAIA (создан в Метеослужбе Франции для анализа данных AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) с п/о метеоспутников серии NOAA и адаптирован к информации радиометра SEVIRI (Spinning Enhanced Visible and InfraRed Imager) с геостационарных метеоспутников Meteosat-8, 9, 10 (Cotin, 2007)) и SCANDIA (создан в Шведском институте гидрологии и метеорологии, Swedish Meteorological and Hydrological Institute, SHMI) для анализа информации AVHRR (Thoss, 2010)). В качестве дополнительной информации в этих ПК используются поля вертикального распределения температуры и влажности воздуха, температуры подстилающей поверхности, атмосферного давления на уровне моря $(p_{_{VD,M}})$, расчеты радиационных моделей, карты рельефа, типа и отражательных свойств подстилающей поверхности, зенитный угол солнца (z_0), угол спутникового визирования (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, высоты места над уровнем моря (h_{ref}) , z_0 , viz и др. (Cotin, 2007). Качество получаемых выходных продуктов SAF регулярно контролируется при сопоставлении с данными метеорологического радиолокатора (МРЛ), наземными метеонаблюдениями и с независимыми спутниковыми оценками и в основном удовлетворяет требованиям, предъявляемым к ним пользователями (Hollmann, 2015; Kidd, Levizzani, Laviola, 2010; Kniffka et al., 2013).

Российский п/о гидрометеорологический спутник «Метеор-М» № 2 выведен на орбиту со средней высотой 836 км в июле 2014 г. Время пересечения экватора на нисходящей орбите 9:30 ВСВ (Всемирное скоординированное время, *англ*. Universal Time Coordinated, UTC). Многозональное сканирующее устройство малого разрешения (МСУ-МР), установленное на его борту, обеспечивает получение и передачу на Землю многоспектральных (шесть каналов (спектральных зон) в диапазоне волн от 0,5 до 12,5 мкм) изображений облачности и подстилающей поверхности в пределах полосы обзора (~2800 км) с пространственным разрешением в надире ~1 км.

Многоспектральная комплексная пороговая методика (КПМ), разработанная первоначально для информации радиометра AVHRR (Волкова, 2013), была специально приспособлена к информации MCУ-MP, и на ее основе создан специализированный программный комплекс (СПК), позволяющий в автоматическом режиме круглосуточно осуществлять классификацию спутниковых данных с целью получения информации об облачности, осадках и ОЯП, а также валидировать выходные продукты климатическими оценками и результатами наземных метеонаблюдений за аналогичными параметрами.

Описание СПК "MSUMRetr"

Комплекс "MSUMRetr" в автоматическом режиме обеспечивает сбор необходимых для его работы данных из соответствующих баз данных (БД), предварительную подготовку

спутниковой и дополнительной информации, классификацию с помощью КПМ и валидацию результатов классификации данными наземных наблюдений на метеостанциях и климатическими оценками. В процессе работы СПК детектирует параметры облачного покрова, осадков и ОЯП для каждого срока спутникового наблюдения; рассчитывает суточные и месячные суммы осадков; проводит валидацию ежедневную (один раз в сутки для всех сроков спутниковых наблюдений за предыдущие сутки) и ежемесячную (1-го числа каждого месяца для всех сроков спутниковых наблюдений за предыдущий месяц).

Результаты работы СПК представлены в виде: 1) матриц с результатами классификации параметров облачности, осадков и ОЯП по данным МСУ-МР в точных значениях или кодах за каждый срок спутникового наблюдения; 2) рсх-файлов с визуальными результатами классификации параметров облачности, осадков и ОЯП (полусуточный монтаж за 00–12 и 12–00 ч ВСВ); 3) журналов-таблиц с информацией о количественной валидации результатов классификации КПМ по данным МСУ-МР климатическими оценками и результатами наземных метеонаблюдений; 4) рсх-файлов с визуальной валидацией результатов классификации для отдельных сроков спутниковых наблюдений результатами наземных метеонаблюдений.

При количественной валидации выходных продуктов КПМ рассчитываются следующие характеристики точности: dev (deviation) — среднее отклонение валидируемых оценок от контрольных; |dev| — среднее абсолютное отклонение; СКО — среднее квадратичное отклонение; POD (Probability of Detection) — вероятность правильного распознавания относительно контрольной выборки; FAR (False Alarm Ratio) — вероятность ложного детектирования относительно валидируемой выборки; HR (Hit Rate) — суммарная точность детектирования; POD_{err < A} — вероятность детектирования с ошибкой не более *A*; PPO — вероятность правильного распознавания относительно валидируемой выборки (степени отличия валидируемых данных от контрольных) по каждому классу и/или суммарно по всем классам (в том числе «взвешенная» оценка в зависимости от повторяемости класса в пределах выборки). Для этого значения оценок точности сравниваются с табличными порогами.

Входные данные и краткое описание КПМ

Автоматическая классификация данных МСУ-МР осуществляется круглосуточно на протяжении всего года для территории 47–63° с.ш. и 20–50° в.д. (ЕТР и сопредельные страны) с пространственным разрешением 1' по широте и 1,5' по долготе. Настройка и валидация работоспособности КПМ поводилась на основе архива синхронных спутниковых и наземных наблюдений за 2015–2016 гг.

В КПМ в качестве предикторов используются значения радиационной температуры в каналах 4–6 МСУ-МР (λ =3,7 (T_{37}), 11 (T_{11}) и 12 мкм (T_{12})), их разности ((T_{37} - T_{11}), (T_{11} - T_{12})), а также параметры облачности, осадков и ОЯП, полученные на предыдущих этапах классификации. Дополнительная информация — поля численного прогноза температуры воздуха на стандартных барических уровнях (Ta_{1000} , Ta_{925} , Ta_{850} , Ta_{700} , Ta_{500} , Ta_{400} , Ta_{300} , Ta_{250}), приземной температуры воздуха ($Ta_{при3}$) и $p_{yp.M}$, а также цифровая карта рельефа gtopo30 (http:// егоs.usgs.gov). По ним рассчитываются значения температуры на промежуточных барических уровнях ($Ta_{850-700}$, $Ta_{700-500}$, $Ta_{500-400}$, $Ta_{400-300}$), температура воздуха, приведенная к уровню моря ($Ta_{yp.M}$) и максимальная в атмосферном столбе (Ta_{max}). Пороговые значения задаются в виде эмпирически полученных функциональных зависимостей от таких параметров, как номер календарного дня от начала года (day), высота солнца (h_o), $Ta_{при3}$, $p_{yp.M}$, Ta_{max} , географическая широта (ϕ), h_{ref} и др. Решающее правило состоит из нескольких процедур. Выделение классов/градаций идет от отсутствия явления к его максимальному значению. Тест на принадлежность к следующему классу/градации считается пройденным, если пройдены все процедуры. По окончании суток (по BCB) по результатам оценок I_{max} рассчитываются суточные суммы осадков (ΣI_{cyr}), а по окончании месяца — месячные суммы (ΣI_{mec}). В *maбл. 1* приведен список получаемых КПМ выходных продуктов по облачности, осадкам и ОЯП, в том числе выделяемые классы/градации и необходимые для этого предикторы, а на *puc. 1* — порядок выполнения этапов классификации в КПМ.



Рис. 1. Схема работы КПМ при классификации спутниковых данных (МСУ-МР/«Метеор-М»)

Таблица 1. Детектируемые КПМ параметры облачного покрова, осадков и ОЯП, их классы/ градации и необходимые для классификации предикторы

Детектируемый параметр	Обозначение	Классы/градации	Предикторы
Облачная маска	КОО	облачно, ясно	$T_{11}, (T_{11} - T_{12}), (T_{37} - T_{11}), day, h_o, Ta_{yp,M}, Ta_{npu3}$
Температура ВГО, К, °С	Т _{вго}	точные значения	$(T_{37}-T_{11}), (T_{11}-T_{12}), T_{11}, T_{12}, h_o, T_{11}, T_{12}, T_{12$
Высота ВГО, м, гПа	$h_{_{ m BFO}}, ph_{_{ m BFO}}$	точные значения	$T_{\rm BFO}, p_{\rm yp.m.}, Ta_{\rm max}, \varphi, h_{\rm ref}$
Фазовое состояние воды в облачных частицах на ВГО	faza	кристаллические, водяные, сме- шанные: вода > лед, вода < лед	$(T_{37}-T_{11}), T_{\rm BFO}, \text{data, } h_{\rm o}, Ta_{\rm yp.m.}$
Максимальная водность облачного слоя, г/м ³	$W_{ m max}$	<0,1, 0,1-0,2, 0,2-0,3, 0,3-0,5, 0,5-1, 1-3, 3-5, >5	$ \begin{array}{c} T_{11}, (T_{11} - T_{12}), (T_{37} - T_{11}), h_{\rm BTO}, \\ Ta_{700-500}, Ta_{500}, Ta_{500-400}, Ta_{400}, \\ Ta_{400-300}, Ta_{300}, h_o, Ta_{yp.M.}, Ta_{max}, \\ Ta_{npu3}, h_{ref}, day \end{array} $
Тип облачности	cltyp	CiCs, CuSc, Cbinc, Cbcalv, NsCb, Cbcap, Cb+Ci, Ac, As, CuNsCb+As, AcAs+Ci, St, Cs+As+Ns	$\begin{array}{c} T_{11}, (T_{11} - T_{12}), (T_{37} - T_{11}), T_{BFO}, \\ h_{BFO}, W_{max}, \text{faza, day}, h_{ref}, h_o, \\ Ta_{yp,M}, Ta_{700}, Ta_{700-500}, Ta_{500}, \\ Ta_{400}, Ta_{300} \end{array}$
Высота НГО, км	$h_{ m HFO}$	<1,5, 1,5–3, 3–5, >5	$(T_{11}-T_{12})$, cltyp, h_{BFO} , W_{max} , h_{ref} , $Ta_{\text{yp.M.}}$
Толщина облачного слоя, км	dH	<0,5, 0,5-1, 1-2, 2-3, 3-4, 4-5, 5-6, 6-7, 7-8, 8-9, 9-10, 10-11, 11-12, >12	$h_{\rm HFO}, h_{\rm BFO}, h_{\rm ref},$
Водозапас, кг/м ²	SW	<0,1, 0,1-0,5, 0,5-1, 1-2, 2-5, 5-15, 15-25, >25	$(T_{11}-T_{12}), W_{max}, Ta_{max}, day, dH, Ta_{yp.M.}$
Максимальная мгновен- ная интенсивность осадков, мм/ч	$I_{ m max}$	0, 0–1, 1–3, 3–5, 5–8, 8–15, 15–25, 25–50, 50–100, >100	$ \begin{array}{c} T_{11}, (T_{11} - T_{12}), (T_{37} - T_{11}), T_{\rm BFO}, \\ W_{\rm max}, SW, faza, h_{\rm BFO}, h_{\rm HFO}, \\ Ta_{\rm при3}, Ta_{\rm yp.M}, Ta_{\rm max}, day, h_o, h_{\rm ref}, \\ Ta_{850}, Ta_{850-700}, Ta_{700}, Ta_{700-500}, \\ Ta_{500}, Ta_{400}, Ta_{300}, Ta_{250} \end{array} $
Град	hail	без града, град в облаках/слабый, умеренный, сильный град	$T_{11}, (T_{11}-T_{12}), (T_{37}-T_{11}), SW,$ cltyp, $W_{max}, T_{BTO}, h_{BTO}, day,$ $h_{ref}, Ta_{yp,M.}, h_o, Ta_{300}, Ta_{250}$
Гроза	thund	без грозы, слабая, умеренная, сильная гроза	T_{11} , $(T_{11}-T_{12})$, hail, SW, W_{max} , T_{BFO} , h_{BFO} , h_{0} , day, h_{ref} , $Ta_{y_{\text{PM}}}$, Ta_{400} , Ta_{300} , Ta_{250}
Тип осадков у поверх- ности земли	prtyp	без осадков, слабый, умеренный и сильный снег, мокрый снег, ледяной дождь, морось, слабый, умеренный и сильный дождь, ливень, снежная крупа, град	$\begin{array}{c} T_{11}, I_{\max}, \text{hail, } W_{\max}, \text{SW, } Ta_{\max}, \\ Ta_{\pi p \mu_3}, Ta_{y_{\text{P},M}}, T_{\text{BFO}}, h_{\text{BFO}}, h_{ref}, \\ \text{day, } Ta_{1000}, Ta_{850}, Ta_{850-700}, Ta_{700} \end{array}$
Оптическая плотность облачного слоя	COD	<5, 5-10, 10-15, 15-20, 20-25, 25-30, 30-40, 40-50, 50-60, 60-70, >70	$(T_{11}-T_{12})$, cltyp, W_{max} , I_{max} , hail, faza, $Ta_{yp.M.}$
Оптическая толщина облачного слоя	СОТ	<5, 5-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-50, 50-75, 75-100, 100-150, 150-200, 200-250, 250-300, 300-400, >400	$(T_{11}-T_{12})$, COD, d <i>h</i> , $Ta_{yp.m}$, day
Эффективный радиус облачных частиц, мкм	R _{eff}	<5, 5–10, 10–15, 15–20, 20–25, 25–30, 30–35, >35	cltyp, I _{max} , faza, COD
Обледенение	icing	без обледенения, слабое, умерен- ное, сильное обледенение	
Высота верхней и ниж- ней границ слоя обледе- нения каждой интен- сивности, км	ВГ, НГ	<1, 1–2, 2–3, 3–4, 4–5, 5–6, 6–7, 7–8, >8	$ph_{\text{BFO}}, h_{\text{HFO}}, p_{\text{yp.m}}, Ta_{\text{yp.m.}}, h_{\text{ref}}, \varphi$

Валидация выходных продуктов КПМ осуществлялась с помощью климатической информации о параметрах облачного покрова для разных типов облаков по классификации Всемирной метеорологической организации (ВМО, *англ*. World Meteorological Organization, WMO) (Мазин, Хргиан, 1989; Мучник, 1974; Шметер, 1972; Ясногородская, 1978), аналогичными оценками параметров облачности, осадков и ОЯП, полученными КПМ по данным AVHRR для близких сроков наблюдения, а также данными наземных наблюдений на метеостанциях за количеством общей облачности (КОО), $h_{\rm HFO}$, погодой в срок наблюдения и $\Sigma I_{\rm сут}$. При количественном сопоставлении спутниковых оценок с наземными рассматривались небольшие (5×5 или 9×9 пикселов) фрагменты спутниковых изображений (метеостанция в центре) и разницей по времени 15–30 мин.

Валидация результатов классификации КПМ

В *табл. 2* приведены критерии, предъявляемые пользователями к качеству спутниковой информации об облачности и осадках по данным AVHRR. В тех случаях, когда они отсутствуют, автором предложены свои критерии качества. Также приведены оценки качества, достигнутые в рамках проектов SAF NWC и CM при определении параметров облачного покрова и осадков по информации AVHRR, и аналогичные оценки, полученные автором по данным MCУ-MP.

Параметр облачности	Оценка точности	Требования к точности	Зарубежные методики***	КПМ (МСУ-МР)
КОО	dev, %	±10-30**	-925	±5-15
	dev, окт.	±1**	1,4 (1,2–1,6)	-0,5 (00,9)
	СКО, %	20-45**	15-30	20-35
	СКО, окт	2**	2,1-3,2	2,6 (1,8-3,1)
	KSS	-	0,33-0,67	0,77
	HR, %	-	70 (40–90)	65 (55-80)
h _{BFO}	dev, м	±500-1800**	-5180620	±300-3000
	СКО, м	1500-2000**	1280-6350	-
dH	dev, м	±100-1000*	не определяется	±500-2000
ph _{BFO}	dev, rПa	±75-170**	-100180	±100
h _{HFO}	dev	±1 градация [*]	не определяется <u>±1</u> 85	±1 градация
	HR, %	55 00*		85 (77–95)
тип облачности	HR, %	75-90	73-93	80-90
faza	dev	±1 класс [*]	-	±1 класс
	HR, %	75-90*	0-90	80–95
водность	dev	±1 градация*	INC	±1-2 градации
	HR, %	75-90*		70–90

Таблица 2. Точность определения параметров облачного покрова, осадков и ОЯП

Таблица 2. Продолжение

Параметр облачности	Оценка точности	Требования к точности	Зарубежные методики***	КПМ (МСУ-МР)
водозапас	dev	±1 градация [*]		±1–2 градации
	HR, %	75–90*		70-90
зоны осадков	POD, %	65–75*	85-92	91 (89–97)
	FAR, %	15-35*	25-47	17 (6–25)
тип осадков	POD, %	60-80*	не определяется	20-76 (3 класса)
град	POD, %		не определяется	60
гроза	POD, %	05-85	не определяется	73
COD	dev	±1 градация [*]	-	±1–2 градации
СОТ	dev	±10 % ^{**} или ±1 градация [*]	5-300 %	±1–2 градации
R _{eff}	dev	±1 градация [*]	-	±1-2 градации
ΣI _{сут}	dev, мм	±0,5-10**	-	±1
ΣΙ _{мес}	dev, мм	$+10, 25, 0/ - 5^{t^*}$	_	±10
ΣІ	dev, мм	±10-23 % 0T 21	-	-3049

Примечания: ^{*} — критерии, предложенные автором; ^{**} — требования к спутниковым оценкам по данным AVHRR (Hollmann, 2013, 2015; Kidd, Levizzani, Laviola, 2010; Karlsson, 2009; Karlsson et al., 2012, 2013; Kniffka et al., 2013; Stengel, Karlsson, Meirink, 2015); ^{***} — получено в рамках проектов EUMETSAT SAF NWC и CM по данным AVHRR (Fernandez, 2013; Hollmann, 2013, 2015; Karlsson, 2012; Karlsson et al., 2009, 2013; Thoss, 2010).



Рис. 2. Сопоставление оценок количества облачности (окт.) по спутниковым (КООМСУ-МР) и наземным (КООМЕТЕО) наблюдениям за отдельные периоды 2015—2016 гг. Обозначения: «зима» — октябрь-март, «лето» — апрель-сентябрь, «день» — ho ≥ 0,1 рад, «ночь» ho < 0,1 рад. Примечание: 1 окт. = 12,5 % покрытия небосвода облачностью

Облачная маска. Спутниковые оценки облачного покрова всегда завышают оценки КОО из-за проблемы частично заполненных облачностью пикселов. Поэтому и оценки КОО с помощью КПМ по данным MCУ-MP обычно оказываются выше наземных наблюдений (*puc. 2*). Для малооблачных условий («0–2 окт.») переоценки КОО практически не зависят от сезона и времени суток. У разорванной облачности («3–7 окт.») летом и днем завышение

намного больше (до 2,5 окт.), чем зимой и ночью. Для значительной и сплошной облачности («5–8 окт.») в холодный период года (особенно ночью) отмечается занижение КОО на 0,5– 1 окт. по спутниковым данным из-за того, что радиационные характеристики облаков оказываются близкими к подстилающей поверхности. Во многих методиках такие «сомнительные» пикселы причисляются к облачным (в результате переоценка облачного покрова составляет в среднем 30–40%, достигая в отдельных случаях 50–60% (Hollmann, 2013; Karlsson et al., 2009)). В КПМ эти пикселы относятся к классу «ясно». Исследования автора показывают, что потерянная КПМ и «ложная» облачность (классифицируется в дальнейшем как Ci, As, Ac, Sc, St, Cu) обычно имеет небольшие значения W_{max} и SW, преимущественно без осадков или реже со слабыми осадками и всегда без ОЯП.

Оценки точности КПМ для рассматриваемой выборки приведены в *maбл. 2*, а также: |dev|=1,6 окт., $\text{POD}_{err\leq 1 \text{ окт.}}=64\%$, $\text{POD}_{err\leq 2 \text{ окт.}}=78,5\%$, $\text{POD}_{oбn}\approx95,5\%$, $\text{POD}_{scHo}\approx78,5\%$, FAR_{oбn} $\approx6\%$, FAR_{scHo} $\approx17\%$, $\text{HR}_{scHo/oбn}=87,5\%$. Точность оценок КОО КПМ зависит от h_{ref} , времени года и суток. Она максимальна летом днем над сушей ($h_{ref} \leq 500$ м) и минимальна зимой ночью, при наличии температурных инверсий или сильном выхолаживании, на границе суша/вода с большой амплитудой температур. Климатические оценки по данным наземных наблюдений (Мазин, Хргиан, 1989) показывают, что для ЕТР средние значения КОО в январе на севере превышают 85\%, на юге — $\sim65-70\%$; в июле на севере — более 70%, на юге — $\sim40-50\%$. По данным МСУ-МР за 2015–2016 гг. оценки КОО для рассматриваемой территории составили: в целом за год 65–80%, в теплый период года — 55– 80%, в холодный — 70–90% (на севере КОО больше, чем на юге), т.е. хорошо согласуются с климатом.

Точностные оценки определения КОО в SAF NWC и CM по информации AVHRR при сопоставлении с данными наземных метеонаблюдений следующие: dev = -3,6%, CKO = 11% (выборка 1982–2009 гг.) (Karlsson, 2012) или dev = -9...+2% (Hollmann, 2015); |dev| \approx 1,5 окт., POD_{обл} \approx 95%, POD_{ясно} \approx 80%, FAR_{обл} \approx 6,5%, FAR_{ясно} = 15,5% (до 17,5% в зависимости от времени суток (http://www.nwcsaf.smhi.se) и даже до 34% (Thoss, 2010)), HR_{ясно/обл} \approx 91,5%. Для пустыни и над снегом/льдом |dev| > 10%, а СКО — до 30%. Значения КОО обычно завышены для низкой и очень низкой облачности, особенно при наличии температурной инверсии. Большие ошибки — в темное время и в сумерках, а также зимой над очень холодной подстилающей поверхностью (Karlsson, 2012). Ночью часто теряются безоблачные условия (оценки КОО на 10–11% выше), а в сумерках — низкие теплые облака (оценки КОО на 15–18% ниже) (Dybbroe et al., 2006) и оптически тонкая облачность (до 10%) (Stengel, Karlsson, Meirink, 2015).

Таким образом, точность детектирования облачной маски КПМ удовлетворяет требованиям пользователей (*табл. 2*) и не уступает зарубежным аналогам.

Температура ВГО, высота ВГО и НГО, толщина облачного слоя. Регистрируемая МСУ-МР радиационная температура не соответствует реальным значениям $T_{\rm BFO}$, так как даже у оптически плотной облачности излучает не поверхность облака, а нижележащий слой. Поэтому в КПМ проводится эмпирическая коррекция значений T_{11} (вводится поправка, косвенно учитывающая толщину слоя Ci и/или As, а также микрофизические свойства вблизи ВГО) независимо от типа облачности (Волкова, Успенский, 2009). Далее по барометрической формуле для политропной атмосферы производится расчет $ph_{\rm BFO}$ в гектопаскалях, а затем $h_{\rm BFO}$ – в метрах над уровнем моря.

Валидация показывает, что получаемые КПМ значения $h_{\rm BFO}$ и $T_{\rm BFO}$ хорошо согласуются с климатическими оценками для соответствующих типов облаков (*maбл. 3*). В целом у кучевообразной облачности величина $h_{\rm BFO}$ восстанавливается точнее, чем у слоистообразной. Ошибки в основном не превосходят 10–15% от полученного значения, но для неплотной облачности могут достигать 25%, т.е. обычно $|dev| \leq 0,5$ км для низкой облачности и большого вертикального развития, $|dev| \leq 1$ км для облачности среднего яруса, $|dev| \leq 1,5-2$ км для облачности верхнего яруса и многослойной и $|dev| \leq 3$ км для однослойных Ci. Величина dev зависит от СОТ (в меньшей степени) и типа облачности, а также от точности (в том числе пространственного и временнОго разрешения) дополнительной информации о $Ta_{\rm yp,M}$, $Ta_{\rm max}$ и $p_{\rm yp,M}$. Она не зависит от сезона и h_0 . Ошибки возможны при наличии температурных инверсий или очень маленьких вертикальных температурных градиентах, при $h_{\rm ref} \geq 500$ м, для неплотной облачности над небольшими водоемами с большой амплитудой температур относительно суши и при просвечивании нижележащей облачности сквозь тонкие Ci и As (отмечается понижение $h_{\rm BFO}$).

Климатические оценки h _{вго} *		Спутниковые оценки h _{вго} (КПМ по данным МСУ-МР)		
класс облачности	диапазон, км	класс облачности	средняя h _{вго} , км	диапазон h _{вго} , км
Ns	2-7	Ns, Cb	4,3	2,8-6,2
St	<2	St	2,0	<3
Sc	<2	Cu,Sc	3,4	1,5-6,2
Cu	2-5			
СЬ	3–15 (и выше)	Cb calv.	5,1	3,5-6,1
		Cb cap.	7,9	5,7–13,7
		Cb inc.	9,6	6,6–16,2
		Cb+Ci	6,4	4,5-12,8
Ac	2-7	Ac, Cu	3,5	1,5-6,2
As	2-7	As	3,8	2,0-6,2
		CuNsCb+As	4,1	
Ci, Cs,Cc	5–8 (до 18)	Ci, Cs	6,4	4,6-10,5
		AcAs+Ci	6,3	4,5-10,7
		CsAsNs	6,1	4,6-11,4

Таблица 3. Сопоставление оценок $h_{\rm BFO}$ по спутниковым и климатическим данным

Примечание: * — (Мазин, Хргиан, 1989; Ясногородская, 1978).

При валидации оценок $h_{\rm BFO}$, полученных по данным AVHRR в SAF NWC и CM (Karlsson, 2012), получено: dev=-2660 м, CKO=4735 м (выборка 1982-2009 гг.) для всей облачности. Качество оценок $h_{\rm BFO}$ сильно зависит от COT (Karlsson et al., 2013): для COT>0,3 dev=-435 м,

СКО=2440 м, а для СОТ>0,5 dev=-125 м, СКО=2140 м. В среднем, 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, т.е. в целом, отмечается систематическое занижение значений $h_{\rm BFO}$ для высокой облачности и завышение для низкой. На точность оценок сильно влияет качество предварительной классификации облачности по типам, так как для каждого типа облака существует свой алгоритм восстановления $h_{\rm BFO}$ (Stengel, Karlsson, Meirink, 2015). Для значений $ph_{\rm BFO}$ достигнуто dev=-72 гПа (-100...-40 гПа) (Hollmann, 2015).

В КПМ $h_{\rm HFO}$ рассчитывается от поверхности Земли для четырех градаций в зависимости от разных параметров (*maбл. 1*), описывающих «внешний вид» облака. Точность оценок $h_{\rm HFO}$ зависит от времени года и суток, наличия водоемов, h_{ref} , а также точности определения типа облачности и $W_{\rm max}$. При сопоставлении с наземными наблюдениями за $h_{\rm HFO}$: POD_{*h*HFO < 1.5 км} = 92% (86–98% в зависимости от времени года и суток), POD_{*h*HFO > 1.5 км} = 62% (41–89%), FAR_{*h*HFO < 1.5 км} = 10% (4–18%), FAR_{*h*HFO > 1.5 км} = 34% (15–58%), HR = 86% (77–95%). Наибольшие ошибки встречаются у многослойной облачности. Более холодные или теплые, чем суша, водоемы способны на 1 градацию повысить или понизить $h_{\rm HFO}$ у неплотной облачности. При перемещении над горным регионом облако может менять $h_{\rm HFO}$, не меняя при этом $h_{\rm BFO}$. В зарубежных методиках $h_{\rm HFO}$ обычно не определяется.

Толщина облачного слоя в КПМ вычисляется по формуле: $dH = h_{BFO} - h_{HFO} - h_{ref}$. На точность оценок dH влияет только точность восстановления значений h_{BFO} и h_{HFO} . В зарубежных методиках значения dH по спутниковым данным регулярно не определяются (только в ходе отдельных экспериментов для заданных районов и некоторых типов облачности, например, оценки dH для St в работе (Yi et al., 2016)).

Таким образом, оценки $T_{\rm BFO}$, $h_{\rm BFO}$ и $ph_{\rm BFO}$, выполненные КПМ, хорошо согласуются с климатическими оценками, вполне удовлетворяют предъявляемым к ним требованиям и не уступают зарубежным аналогам (*табл. 2*), а оценки $h_{\rm HFO}$ и dH хорошо согласуются с климатическими оценками и наземными наблюдениями и не имеют зарубежных аналогов. Значения $T_{\rm BFO}$, $h_{\rm BFO}$, $ph_{\rm BFO}$, $h_{\rm HFO}$ и dH получаются средними для площади пиксела.

Тип облачности (облачный анализ). В КПМ используется классификация типов облачности, принятая в ВМО (Мазин, Хргиан, 1989). Выделяются 13 классов, в том числе четыре вида многослойной (*табл. 1*). Хорошая работоспособность КПМ при классификации типов облачности подтверждается косвенно при дальнейшем детектировании зон осадков, грозы и града, качество детектирования которых оценивается по результатам наземных метеонаблюдений. Ошибки определения класса облачности не превышают 5–10%. Они возникают на краях облачных классов и массивов и связаны с проблемой частично заполненных пикселов. Ошибочно принимаемые друг за друга классы облачности оказываются близки друг к другу по $h_{\rm BFO}$, COT, dH, толщине и плотности слоя Ci и/или As и др. Ошибка проведения границы между классами обычно не превышает 1–2 пикселов. Грубых ошибок замечено не было. Ошибки могут возникать 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, COT и dH увеличиваются), и в горах (из-за сложностей соотнесения h_{BFO} и h_{ref} при неизменных dH и W_{max} может ошибочно меняться тип облачности за счет изменения его ярусности). Пример облачного анализа см. на *рис. 3*.



RCHO CI, Cs Cu, Sc Chinc. Chicalu. Ns, Ch Chicae. Ch+Ci Ac As Cu, Ns, Ch+As AqAs+Ci St Cs+As+Ns

Рис. 3. Классификация облачности по типам (27 июня 2015 г., 11:45 ВСВ, МСУ-МР/«Метеор-М»). Обозначения: Ci, Cs — перистые, Cu, Sc — кучевые, Ac — высоко-кучевые, As — высоко-слоистые, St — слоистые, Cbinc — мощные кучево-дождевые волосатые, Cbcalv — кучево-дождевые лысые, Cbcap — мощные кучево-дождевые с перистыми, Ns, Cb — слоисто-дождевые и кучево-дождевые, Cb+Ci — перистые над облаками большого вертикального развития, Cs+As+Ns — многоярусная фронтальная облачность, AcAs+Ci — перистые над Ac или As, CuNsCb+As — облачность среднего яруса над нижней

Классификация облачности по типам, применяемая в SAF NWC и CM по данным AVHRR, отличается от принятой BMO. Уровни 675 и 450 гПа разделяют облачность нижнего, среднего и верхнего ярусов, а в зависимости от значений COT в пределах каждого яруса выделяются пять облачных классов (Stengel, Karlsson, Meirink, 2015), девять (Sedlar, Karlsson, 2011) и более (Cotin, 2007). Так как облачный анализ предшествует оценкам $h_{\rm BFO}$, то типичны следующие ошибки: тонкие Ci ошибочно принимаются за разорванную облачность и наоборот, а низкая и очень низкая облачность в случае с температурной инверсией или Сі над низкой облачностью детектируются как облачность среднего яруса.

Таким образом, облачный анализ, выполненный с помощью КПМ по данным МСУ-МР, не уступает зарубежным аналогам, так как детектирует больше классов, по которым возможна предварительная оценка параметров облачного покрова и степени его «опасности».

Микрофизические свойства облаков. Выделяемые КПМ четыре класса облачности в зависимости от faza на ВГО (*табл. 1*) находятся в хорошем соответствии с описанием облачных классов и климатическими оценками (Мазин, Хргиан, 1989). Хорошее качество классификации косвенно подтверждается результатами детектирования зон осадков, грозы и града на последующих этапах КПМ. В зависимости от синоптической ситуации, времени года и суток, h_{ref} и типа облачности НR $\geq 80\%$. Ошибки в 98–100% случаев не превышают ±1 соседний класс и отмечаются в случаях с очень тонкими Ci (просвечивает нижележащая облачность), на краях облачных массивов и для облачности над водоемами. Грубых ошибок, когда вместо «ледяных» облаков детектируются «водяные» или наоборот, отмечено не было.

Зарубежные методики оценивают faza в слое вблизи ВГО или для каждого яруса облачности только в дневное время, при этом выделяются три класса: «лед», «вода», «смешанные» в зависимости от значений T_{11} (Meirink et al., 2010; Stengel, Karlsson, Meirink, 2015). Методики плохо работают над снежно-ледовыми поверхностями и в многослойной облачности, особенно для облаков среднего яруса и Сі над плотными водяными облаками, а также для плотных облаков с крупными ледяными кристаллами.

Водность облака (W) — это масса капель воды и кристаллов льда, из которых состоят облака, в единичном объеме (Хромов, Мамонтова, 1974). Водозапас облака (SW) — количество осажденной воды из облака на единичную поверхность (Мазин, Хргиан, 1989), или содержание жидкой воды и льда в вертикальном столбе единичного сечения от основания до вершины облака (Хромов, Мамонтова, 1974). R_{eff} — радиус облачных частиц, в наибольшей степени отвечающий за микрофизические свойства облака и дающий максимальный вклад в его водность. Оптическая плотность облака (COD — Cloud Optical Depth) — величина ослабления прямой солнечной радиации при прохождении облачного слоя единичной толщины, а оптическая толщина облачного слоя (COT — Cloud Optical Thickness) — интегральная величина, характеризующая ослабление прямой солнечной радиации на пути сквозь облачный слой (Мазин, Хргиан, 1989). В КПМ значения W_{max} , COD и R_{eff} определяются в зависимости от «внешнего вида» облака (maбл. 1), а значения SW и COT — по формулам: SW=0,5· W_{max} dhh, COT = 0,5·COD·dhh, где dhh — скорректированная dH на толщину слоя Ci и/или As.

Визуальный анализ больших фрагментов классифицированных спутниковых изображений показывает хорошее согласие оценок W_{max} , SW, COD, COT и R_{eff} с синоптической ситуацией и климатическими оценками. Хорошая точность классификации W_{max} и SW косвенно подтверждается результатами детектирования зон осадков, гроз и града разной интенсивности. Завышение значений COD, COT, W_{max} и SW на 1 градацию может отмечаться ночью и в холодный период года. Также ошибки (±1–2 градации) возможны над водоемами для относительно тонкой облачности. Неточности оценок W_{max} , SW, COD, COT и R_{eff} могут возникать при анализе полей Ac и Cu (в том числе Sc): из-за осреднения информации колебания их реальных значений в пределах пиксела могут достигать ±2 градаций относительно среднего значения для этого пиксела. На 1–2 градации завышение значений COT и SW может наблюдаться у многослойной облачности (особенно "CsAsNs") в передней части фронтальной зоны. Исследования показывают, что ошибки определения W_{max} , SW, COD, COT и R_{eff} в 75–85% случаев не превышают ±1 градацию, а в 90–98% — ±2 градации. Вероятность грубых ошибок (более трех градаций) равна нулю. Визуальное сопоставление результатов классификации R_{eff} КПМ по данным MCУ-MP с оценками R_{eff} зарубежных исследователей для схожих синоптических ситуаций показывает хорошее соответствие.

В рамках проектов SAF NWC и CM в светлое время суток рассчитываются значения R_{eff} (Kniffka et al., 2013) по данным спутниковых измерений в каналах с λ = 1,6; 0,6; 0,8 и 3,7–3,9 мкм и с применением радиационных моделей переноса (Deneke et al., 2007). Поэтому оценки R_{eff} возможны только в дневное время при малых z_0 (при больших z_0 возникают значительные ошибки в случаях с облачными тенями или «ложными» оценками альбедо (*A*) от боковин облака). Серьезные ошибки получаются над снежно-ледовыми поверхностями, так как их *A* сопоставимо с облачным. Спутниковые оценки R_{eff} относятся к верхней 20–40% части облака (Chen et al., 2008) или ВГО (Deneke et al., 2007; EUMETSAT, 2013). По данным наземных наблюдений значения R_{eff} получаются меньше, чем по спутниковым (Chiu et al., 2012).

Спутниковые наблюдения за COD проводятся только в рамках экспериментов для отдельных видов облачности и районов земного шара. В основе большинства методик лежат положения, что значения COD прямо пропорциональны *A*, *W* и R_{eff} . Расчеты проводятся с помощью радиационных моделей переноса или кластерных методов (Ipe et al., 2004). Точность оценок падает с ростом z_o (ошибки определения *A* из-за теней и ложных «засветок») и над снежно-ледовыми поверхностями. На качество оценок COD также влияет адекватность задания входных параметров в модели и описания вертикальной структуры облачного слоя. Наиболее частые и большие ошибки возникают при определении COD оптически плотных облаков (COD > 50) (Pincus et al., 1995).

В рамках проектов SAF NWC и CM в светлое время суток регулярно рассчитываются значения COT (Kniffka et al., 2013). Для разной спутниковой аппаратуры разработаны разные алгоритмы определения COT (Pandey et al., 2012). В большинстве случаев используют однослойные (Deneke et al., 2007; Meirink et al., 2010) или двухслойные модели (Huang et al., 2006; Yoo, Li, 2012) в многослойной атмосфере с релеевским рассеянием с однородной плоскопараллельной облачностью (поэтому ошибки растут для конвективных облаков и ячеек (Meirink et al., 2010)). Точность оценок COT сильно зависит от адекватности задания в моделях входных параметров (Barnard, Long, 2004; Deneke et al., 2007), особенно от точности определения faza. Для водяных облаков в моделях используется логарифмическое или гамма-распределение облачных капель по размерам с $R_{eff} = 8$ или 9 мкм (над сушей) и 10 или 11 мкм (над океанами), а для ледяных облаков — смесь из кристаллов с разными размерами со средним $R_{eff} = 30, 35$ или 40 мкм (Deneke et al., 2007; Yoo, Li, 2012). В некоторых моделях отдельно для жидко-капельных

и кристаллических облаков задается по несколько градаций R_{eff} для разных уровней в облаке (Deneke et al., 2007). Точность оценок СОТ слабо зависит от λ используемого спектрального канала, но на нее влияют R_{eff} faza, z_0 (в тени СОТ ложно уменьшается, при больших z_0 — увеличивается (Pincus et al., 1995)), содержание водяного пара, аэрозоля и озона в атмосфере, неоднородность облачного покрова (т.е. КОО), наличие неоднородностей внутри облака и др. (Barnard, Long, 2004). Серьезные ошибки возникают над снежно-ледовыми поверхностями, а также для облаков с неоднородной *h*_{вго}. Наиболее частые и большие ошибки случаются при определении СОТ оптически наименее и наиболее плотных облаков (Deneke et al., 2007): для COT > 10 ошибки в среднем составляют 10%, для COT < 10 — 50-300% (Hollman, 2013). Для ледяных облаков средняя ошибка — 10%, для водяных — до 30% и точность сильно зависит от faza (Deneke et al., 2007). Так, faza обычно определяется только для ВГО, которая для многих облаков является ледяной или смешанной (последняя в моделях обычно причисляется к ледяной), и в результате все облако считается ледяным. Поэтому все спутниковые оценки СОТ соответствуют только верхнему слою облаков (EUMETSAT, 2013) и обычно не превышают 100 (Pandey et al., 2012) или 128 (Ipe et al., 2004; Pincus et al., 1995). В целом значения СОТ по данным AVHRR недооценены даже по отношению к оценкам MODIS (Hollman, 2013).

В зарубежной литературе термину «водность облака» соответствует параметр LWC (Liquid Water Content). Значения LWC обычно получают в результате непосредственных измерений в облаке (с самолетов, зондов и др.) в ходе отдельных экспериментов для заданных районов. Есть отдельные попытки рассчитывать значения LWC по спутниковым данным через R_{eff} (Heymsfield, Matrosov, Baum, 2003; Reid et al., 1999). Однако из-за того, что значения R_{eff} соответствуют верхней части облака (Deneke et al., 2007; EUMETSAT, 2013), то и значения LWC получаются для нее же. Рассчитываемые таким образом оценки LWC обычно не превышают 0,5 г/м³ даже для очень мощных Cb, хотя самолетные эксперименты регистрируют значения водности в Cu в несколько граммов на метр кубический (Reid et al., 1999), а в мощных Cb — в десятки граммов на метр кубический (Калинин, Смирнова, 2008; Мучник, 1974; Шметер, 1972). Для более точного определения значений LWC помимо оценок R_{eff} необходимо иметь информацию и о концентрации облачных частиц в единичном объеме (Masun, Хргиан, 1989), что является достаточно сложной проблемой (Heymsfield, Matrosov, Baum, 2003).

В рамках проектов SAF NWC и CM (Hollmann, 2013) по спутниковым данным оцениваются параметры LWP (Liquid Water Path) и IWP (Ice Water Path), которые считаются аналогами водозапаса и ледозапаса облака. Иногда используется комбинированная величина CWP, или CLIWP (Cloud (Liquid and Ice) Water Path): CWP=CLIWP=LWP+IWP. Значения LWP и IWP оценивают по спутниковым наблюдениям за COT и R_{eff} : LWP= $a \cdot \text{COT} \cdot R_{eff} \cdot \rho_{вола}$ и IWP= $a \cdot \text{COT} \cdot R_{eff} \cdot \rho_{nen}$, где ρ — плотность соответственно воды или льда, a=2/3 или 5/9 (Chiu et al., 2012; Deneke et al., 2007; Heymsfield, Matrosov, Baum, 2003). Использование этой методики ограничено светлым временем суток. Ошибки растут при больших z_o , над снежно-ледовыми поверхностями и в случаях с кучевообразной и многослойной облачностью (Meirink et al., 2010), так как в модели для расчета СОТ и R_{eff} задается плоскопараллельная однородная облачность. Спутниковые наблюдения за СОТ и R_{eff} относятся к верхней части облака (Chen et al., 2008), поэтому и оценки LWP и IWP соответствуют только верхней части облака (Chen et al., 2008; EUMETSAT, 2013) и их значения даже для мощных Cb не превышают 1000 г/м² (Deneke et al., 2007), хотя в реальных условиях значения SW для них (особенно с грозой и градом) составляют десятки килограмм на метр квадратный (Калинин, Смирнова, 2008; Мазин, Хргиан, 1989). Сопоставление спутниковых оценок LWP и IWP с аналогичными СВЧ-наблюдениями показывает значительную их недооценку (Deneke et al., 2007; Hollmann, 2013; SAF CM, 2005). В целом точность оценок LWP, IWP и CWP сильно зависит от точности восстановления СОТ, R_{eff} и KOO (Meirink et al., 2010; SAF CM, 2005). Сопоставление оценок LWP и IWP по данным AVHRR с аналогичными CBЧ-наблюдениями и оценками MODIS дает ошибку -5...-35% (СКО=20-50%) (Hollmann, 2013) или 10-25% (для выбранных целей -15%) в сторону занижения (Deneke et al., 2007; SAF CM, 2005). При грубом пространственном разрешении (15 км) для месячных оценок LWP по данным AVHRR удается добиться точности 5-10% для отдельных случаев, однако из-за большой зависимости метода от оценок КОО реальная точность оценок CLWP всего 20% (SAF CM, 2005). СВЧ-наблюдения занижают значения СWP, так как не видят ледяных частиц и плохо работают в дождь (Deneke et al., 2007), поэтому спутниковые оценки СWP оказываются еще ниже по сравнению с реальными.

Таким образом, оценки W_{max} и LWC, а также SW и CWP — совершенно разные величины, имеющие одинаковые единицы измерения. Оценки W_{max} , SW, COD, COT и R_{eff} получаются в КПМ средними для площади пиксела и соответствуют всей толщине облачного слоя, определяются круглосуточно и над любой поверхностью.

Осадки, ОЯП. КПМ детектирует зоны осадков в зависимости от их мгновенной I и типа у поверхности земли, а также зоны ОЯП (гроза, град, обледенение (Волкова, 2008)) разной интенсивности (*табл. 1*). Пример классификации I_{тах} (I максимальна для площади пиксела) и сопоставление с наземными метеонаблюдениями показан на рис. 4. Визуальный анализ фрагментов классифицированных спутниковых изображений облачности показывает удовлетворительное согласование результатов классификации зон осадков разной интенсивности с синоптической ситуацией, наземными наблюдениями и климатологией для разных типов облачности (Мазин, Хргиан, 1989; Хромов, Мамонтова, 1974; Ясногородская, 1978). Точность детектирования зон осадков — HR=80% (73-85%). Более чем в 80% случаев расхождение спутниковой и наземной оценок I не превышает ± 1 градацию, а более чем в 95% случаев — ±2 градации. Значения POD для слабых, умеренных и сильных осадков составляют соответственно 71, 80 и 72%. Точность детектирования умеренных осадков практически одинакова в течение года, для слабых осадков она выше в холодный период, а для сильных осадков в теплый. В целом ошибки растут в холодный период года (особенно при наличии температурных инверсий), в ночное время, у многослойной облачности, в горах, а также над небольшими водоемами с большой амплитудой температур относительно суши при неплотной облачности.

Классы «дождь» и «снег» детектируются достаточно хорошо (POD = 70-80%, PPO = 60-70%). Ошибки появляются на границе раздела зон выпадения дождя и снега (в переходные и холодные сезоны), а также при распознавании классов «ледяной дождь», «мокрый снег»

и «снежная крупа», так как на точность их детектирования сильно влияет качество и разрешение (временнОе, горизонтальное и вертикальное) дополнительной информации. Кроме того, эти явления достаточно кратковременные и локальные и поэтому часто проходят мимо наземных метеонаблюдений. Обычно эти классы чаще ошибочно относятся к классу «снег», чем «дождь».



Рис. 4. Результаты сопоставления оценок интенсивности осадков (мм/ч), полученных по КПМ по данным MCУ-MP/«Метеор» (27 июня 2015 г., 17:37 ВСВ), с наземными метеонаблюдениями за «погодой в срок наблюдения и в последний час» (18 ч ВСВ). Обозначения: clear — безоблачно; наземные наблюдения на метеостанциях: пр — без осадков, lp — слабые осадки, mp — умеренные осадки, hp — сильные осадки, hai — град, fog — туман, thu — гроза, snw — снег

КПМ удовлетворительно (POD≈60–70%) детектирует зоны града как в облаках, так и у поверхности Земли, а также зоны гроз (*maбл. 2*) и обледенения. Получаемые оценки хорошо согласуются с синоптической ситуацией, климатическими данными и наземными метеонаблюдениями. Точность детектирования сильно зависит от дополнительной информации. Качество классификации несколько убывает с уменьшением масштаба и интенсивности явления. В ночное время и холодный период года может происходить «ложное» завышение размера и количества зон «град в облаках» и «слабая гроза».

По измеренным значениям $I_{\rm max}$ с помощью КПМ рассчитывается средняя за сутки интенсивность осадков ($I_{cp.cyt}$), по которой ΣI_{cyt} оценивается с помощью методики из (Волкова, 2014): $\Sigma I_{cvr} = I_{cp,cvr} \cdot aa$. Коэффициент *аа* может быть константой для каждого месяца и года и рассчитываться (с использованием данных наземных наблюдений за $\Sigma I_{\rm cvr}$) по той же самой выборке, для которой получаются оценки $\Sigma I_{\rm cvr}$ (метод пригоден для климатических исследований, dev=0 мм/сут), или рассчитываться по формуле $aa=1-(0,5\cdot datd)$, где datd = 0,1 + |183 - |198 - day|| / 183. Точность оценки ΣI_{cvr} вторым способом при сопоставлении с наземными метеонаблюдениями составляет: dev=0,1 мм (±1 мм для отдельных месяцев), СКО=4 мм (1,5-9 мм в зависимости от времени года: летом больше, так как больше I, осадки более локальны и кратковременны). Для $\Sigma I_{\text{мес}}$ среднее dev $\leq 10\%$ от измеренной величины (для сумм осадков за несколько месяцев — dev ≤ 5%) при использовании «климатического» варианта методики. Среднее СКО=15-35% от измеренной величины для одного месяца и ~15% для периода в несколько месяцев. Так как расхождения в оценках $\Sigma I_{\rm mec}$ для отдельных метеостанций часто достигает 50% и более от фоновых значений (Gruber, Levizzani, 2008), то получаемые КПМ значения Σ*I* можно считать удовлетворительными для мониторинга режима увлажнения ЕТР.

В прикладных центрах SAF NWC и CM для светлого времени суток рассчитываются PPO (для зон с $I \ge 0,2$ мм/ч в 5 градациях при использовании R_{eff} , COT и типа облачности) и I из кучевообразной и слоисто-кучевообразной облачности. Значения I оцениваются для каждого пиксела с PPO > 0% по R_{eff} , COT и faza, а $\Sigma I_{\text{час}}$ интегрируются по серии спутниковых наблюдений (Fernandez, 2013). Для ситуаций с неопределенными R_{eff} и COT — PPO = 0% и I=0 мм/ч, хотя осадки выпадают и из слоистообразных облаков. При сопоставлении с оценками MPЛ: для I — POD=84–85%, FAR=25–27%, dev=0,2–0,9 мм/ч, CKO=1,9– 4,1 мм/ч; для $\Sigma I_{\text{час}}$ — POD=91–92%, FAR=47%, dev=0,2–0,7 мм/ч, CKO=1,4–2,6 мм/ч. Точность метода зависит от типа облачности и h_o (I ложно усиливается с уменьшением h_o) и хорошо работает только для кучевообразной облачности в светлое время суток над поверхностью без снега и льда, а также в облаках без снега и крупных ледяных кристаллов.

Таким образом, продукты КПМ по осадкам и ОЯП вполне пригодны для оперативного мониторинга для ЕТР и сопоставимы с зарубежными аналогами.

Заключение

Разработанная автором в «НИЦ «Планета» версия комплексной пороговой методики для данных MCУ-MP показала хорошую конкурентоспособность с зарубежными методиками аналогичного назначения: она не уступает им по качеству выходных продуктов и имеет ряд преимуществ:

 облачный анализ, выполненный КПМ, детектирует больше облачных классов, по которым возможна предварительная оценка параметров облачного покрова (W_{max}, h_{вго}, $h_{\rm HFO}$, COD, COT, $R_{\rm eff}$) и степени его «опасности» (вероятность и интенсивность осадков, грозы, града, обледенения);

- КПМ детектирует больше классов faza в круглосуточном режиме независимо от типа подстилающей поверхности;

– значения COD, COT, R_{eff}, W_{max} и SW определяются круглосуточно над любой поверхностью и относятся ко всему облачному слою;

 помимо интенсивности осадков из любой облачности независимо от сезона и времени суток определяется тип осадков, а также вероятность и интенсивность опасных явлений погоды. Дополнительно оцениваются суточные и месячные суммы осадков;

– преимуществом КПМ является большее количество детектируемых параметров облачности, осадков и ОЯП и их классов, а также меньшее количество привлекаемой для этого дополнительной информации.

Качество выходных продуктов КПМ по облачности и осадкам в основном удовлетворяет предъявляемым к ним пользователями требованиям.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 16-05-01097).

Литература

- 1. Волкова Е.В. Детектирование зон обледенения в облачном слое по информации с полярно-орбитального МИСЗ серии NOAA в умеренных широтах в светлое время суток // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Т. 5. № 1. С. 435-440.
- 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., Успенский А.Б. Сравнительный анализ оценок высоты верхней границы облачности по данным радиометра AVHRR MUC3 NOAA и метеорологического радиолокатора // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2009. Т. 6. № 2. С. 104–110.
- 5. Калинин Н.А., Смирнова А.А. Методика расчета водности и водозапаса кучево-дождевой облачности // Вестн. Удмуртского ун-та. Биология. Науки о земле. 2008. Вып. 1. С. 59-72.
- Мазин И.П., Хргиан А.Х. Облака и облачная атмосфера: справочник. Л.: Гидрометиздат, 1989. 647 с. 6.
- Мучник В.М. Физика грозы. Л.: Гидрометиздат, 1974. 352 с.
- 8. Хромов С.П., Мамонтова Л.И. Метеорологический словарь. Л.: Гидрометиздат, 1974. 568 с.
- Шметер С.М. Физика конвективных облаков. Л.: Гидрометиздат, 1972. 232 с.
- Ясногородская М.М. Атлас облаков. Л.: Гидрометиздат, 1978. 268 с.
 Barnard J.C., Long C.N. A simple empirical equation to calculate cloud optical thickness using shortwave broad-band measurements // J. Applied Meteorology and Climatology. 2004. Vol. 43. No. 7. P. 1057–1066.
 Chen R., Wood R., Li Z., Ferraro R., Chang F.-L. Studing the vertical variation of cloud droplet effective radius
- using ship and space-borne remote sensing day // J. Geophysical Research. 2008. Vol. 113. D00A02. 8 p. DOI: 10.1029/2007JD009596.
- Chiu J.C., Marshak A., Huang C.-H., Carnai T., Hogan R.J., Giles D.M., Holben B.N., O'Connor E.J., Knyazikhin Y., Wiscombe W.J. Cloud droplet size and liquid water path retrievals from zenith radiance measurements: examples from the Atmospheric Radiation Measurement Program and the Aerosol Robotic Network // Atmospheric Che-
- mistry and Physics. 2012. Vol. 12. P. 10 313–10 329. DOI: 10.5194/acp-12-10313-2012.
 14. *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. Nov. 17, 2007. 69 p.
- 15. Deneke H., Johnston S., Reuter M., Roebeling R., Tetslaff A., Thomas W., Wolters E. SAF CM scientific report. Validation of CM-SAF cloud products derived from MSG/SEVIRI day. Version 300 products: CFC, CTY, CTH/CTP/CTT, COT, CWP, CPH // SAF/CM/DWD/KNMI/SMHI/SR/CLOUDS-ORR/3. Ver. 1.2. July 3, 2007. 105 p.

- 16. *Dybbroe A., Hornquist S., Lavanant L., Marguinaud P.* Cloud masking for the O&SI SAF global METOP/AVHRR SST product // Proc. 2006 Satellite Conf. Helsinki, Finland. 12–16 June 2006. 8 p.
- 17. EUMETSAT. OCA product verification // EUM/TSS/DOC/13/706263. Ver. 1. May 23, 2013. 42 p.
- Fernandez P. Algoritm theoretical basis document for "Precipitation products from cloud physical properties" (PPh-PGE14: PCPh v.1.0 & CRPh v.1.0) // SAF/NWC/CDOP2/INM/SCI/ATBD/14. Issue 1. Rev. 0. July 15, 2013. 40 p.
- 19. *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.
- 20. *Heymsfield A.J., Matrosov S., Baum B.* Ice water path optical depth relationship for Cirrus and deep stratiform ice cloud layers // J. Applied Meteorology and Climatology. 2003. Vol. 42. No. 10. P. 1369–1390.
- 21. *Hollmann R*. Annual product quality assessment report 2012 // SAF/CM/DWD/AQA/OR2013. Issue 1.1. Oct. 15, 2013. 71 p.
- 22. Hollmann R. CM SAF. Annual product quality assessment report 2014 // SAF/CM/DWD/AQA/OR2015. Issue 1.1. May 29, 2015. 70 p.
- Huang J., Minnis P., Lin B., Yi Y., Fan T.-F., Sun-Mack S., Ayers J.K. Determination of ice-water path in ice-overwater cloud systems using combined MODIS and AMSR-E measurements // Geophysical Research Letters. 2006. Vol. 33. 5 p. L21801. DOI: 10.1029/2006GL027038.
- Ipe A., Bertrand C., Clerbaux N., Dewitte S., Gonzalez L. Validation and homogenization of cloud optical depth and cloud fraction retrievals for GERB/SEVIRI scene identification using Meteosat-7 day // Atmospheric Research. 2004. Vol. 72. P. 17–37. DOI: 10.1016/j.atmosres.2004.03.010.
- 25. *Karlsson K.G.* CM SAF Cloud, albedo, radiation dayset, AVHRR-based, Ed. 1 (CLARA-A1). Cloud Products. Validation Report // SAF/CM/SMHI/VAL/Gac/CLD. Issue 1.2. April 30, 2012. 133 p.
- 26. *Karlsson K.G., Lockhoff M., Devasthale A., Dybbroe A.* CM SAF: Scientific report. Validation of CM-SAF cloud products derived from AVHRR day in the Arctic region // SAF/CM/SMHI/VAL/CFC_CTY_CTO_AVHRR_ARCTIC. Issue 1.1. May 5, 2009. 88 p.
- 27. 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 dayset from 28yr of global AVHRR day // Atmospheric Chemistry and Physics. Discuss. 2013. Vol. 13. P. 935–982.
- 28. *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.
- 29. *Kniffka A., Lockhoff M., Meirink J.F., Stengel M.* CM SAF: validation report. SEVIRI cloud products // SAF/CM/ DWD/VAL/SEV/CLD. Ed. 1. Iss. 1.2. Oct. 16, 2013. 88 p.
- 30. *Meirink J.F., Roebeling R., Wolters E., Deneke H.* CM SAF: algorithm theoretical basis document. Cloud physical products: AVHRR/SEVIRI // SAF/CM/KNMI/ATBD/CPP. Issue 1.1. June 06, 2010. 24 p.
- 31. Pandey P., de Ridder K., Gillotay D., van Lipsig N.P.M. Estimating cloud optical thickness and associated UV irradiance from SEVIRI by implementing a semi-analytical cloud retrieval algorithm // Atmospheric Chemistry and Physics. 2012. Vol. 12. P. 7961–7975. DOI: 10.5194/acp-12-7961–2012.
- 32. *Pincus R., Szczodrak M., Gu J., Austin P.* Uncertainty in cloud optical depth estimates made from satellite radiance measurements // J. Climate. 1995. Vol. 5. P. 1453–1462.
- 33. *Reid J.S., Hobbs P.V., Rangno A.L., Hegg D.A.* Relationships between cloud droplet effective radius, liquid water content, and droplet concentration for warm clouds in Brazil embedded in biomass smoke // J. Geophysical Research. 1999. Vol. 104. No. D6. P. 6145–6153.
- 34. SAF CM. Products validation report summary // SAF/CM/DWD/PVRS/1. Ver. 2.0. June 28, 2005. 41 p.
- 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. Sept. 27, 2011. 18 p.
- 36. Stengel V., Karlsson K.G., Meirink J.F. CM SAF. Product user manual. Clouds. // SAF/CM/DWD/PUM/ CLOUDS. Ver. 1.8. Feb. 22, 2015. 99 p.
- 37. *Thoss A.* Algorithm theoretical basis document for SAF NWC/PPS "Cloud mask" (CM-PGE01 v. 3.0. Pt. 1) // SAF/NWC/CDOP/SMHI-PPS/SCI/ATBD/1. Issue 2.3. Aug. 17, 2010. 48 p.
- Yi L., Thies B., Zhang S., Shi X., Bendix J. Optical thickness and effective radius retrievals of low stratus and fog from MTSAT daytime day as a prerequisite for Yellow sea fog detection // Remote Sensing. 2016. Vol. 8. No. 8. 15 p. DOI: 10.3390/rs8010008.
- 39. Yoo H., Li Z. Evaluation of cloud properties in the NOAA/NCEP global forecast system using multiple satellite products // Climate Dynamics. 2012. 19 p. DOI: 10.1007/s00382-012-1430-0.

Detection and assessment of cloud cover and precipitation parameters using data from MSU-MR radiometer of the polarorbiting Meteor-M No. 2 for the European territory of Russia

E.V. Volkova

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

A multispectral threshold technique, first created for AVHRR/NOAA data, has been developed and tested for automatic classification of MSU-MR/Meteor-M No. 2 data which provides day-and-night detection and assessment of cloud cover parameters (cloud mask, cloud types, cloud top height and temperature, water phase at cloud top, cloud bottom height, cloud thickness, cloud optical depth and thickness, cloud water content, total cloud water content, effective radius) as well as discrimination of precipitation zones (of different precipitation rate and type at ground, daily and monthly precipitation) and severe weather phenomena (hail, thunderstorm, icing) above any ground surface all year round. The validation of output information products, performed with ground-based conventional meteorological observations and climatic estimations as well as with independent satellite-based estimates of cloud cover and precipitation parameters, confirms the feasibility of developed techniques and reasonable accuracy of the output products which meets the demands of the World Meteorological Organization. Thus, the developed technique, being quite concurrent to those implemented in foreign satellite centers, is recommended for cloud monitoring over the European territory of Russia and neighboring countries.

Keywords: MSU-MR, Meteor, cloud mask, cloud top height, cloud type, precipitation zone, precipitation intensity

Accepted: 25.09.2017 DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-5-300-320

References

- 1. Volkova E.V., Detektirovanie zon obledeneniya v oblachnom sloe po informatsii polyarno-orbital'nogo MISZ serii NOAA v umerennykh shirotakh v svetloe vremya sutok (Detection of icing zones in clouds in temperate zone in the daytime using AVHRR/NOAA day), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya zemli iz kosmosa*, 2008, Vol. 5, No. 1, pp. 435–440.
- 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 day 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 day), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya zemli iz kosmosa*, 2013, Vol. 10, No. 3, pp. 66–74.
- Volkova E.V., Uspenskii A.B., Sravnitel'nyi analiz otsenok vysoty verkhnei 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.
- Kalinin N.A., Smirnova A.A., Metodika raschyota vodnosti i vodozapasa kuchevo-dozhdevoi oblachnosti (A method of estimation of cloud water and cloud water content in Cumulonimbus), *Vestnik Udmurtskogo universiteta*. *Biologiya*. Nauki o zemle, 2008, No. 1, pp. 59–72.
- 6. Mazin I.P., Khrgian A.H., *Oblaka i oblachnaya atmosphera* (Clouds and cloud atmosphere), Leningrad: Gidrometizdat, 1989, 647 p.
- 7. Muchnik V.M., *Fizika grozy* (Thunderstorm physics), Leningrad: Gidrometizdat, 1974, 352 p.
- 8. Khromov S.P., Mamontova L.I., *Meteorologicheskii slovar*' (Meteorological dictionary), Leningrad: Gidrometizdat, 1974, 568 p.
- 9. Shmeter S.M., Fizika konvektivnykh oblakov (Physics of convective clouds), Leningrad: Gidrometizdat, 1972, 232 p.
- 10. Yasnogorodskaya M.M., Atlas oblakov (Atlas of clouds), Leningrad: Gidrometizdat, 1978, 268 p.
- 11. Barnard J.C., Long C.N., A simple empirical equation to calculate cloud optical thickness using shortwave broadband measurements, *J. Applied Meteorology and Climatology*, 2004, Vol. 43, No. 7, pp. 1057–1066.
- Chen R., Wood R., Li Z., Ferraro R., Chang F.-L., Studing the vertical variation of cloud droplet effective radius using ship and space-borne remote sensing day, *J. Geophysical Research*, 2008, Vol. 113, D00A02, 8 p. DOI: 10.1029/2007JD009596.
- ChiuJ.C., MarshakA., HuangC.-H., CarnaiT., Hogan R.J., Giles D.M., Holben B.N., O'Connor E.J., Knyazikhin Y., Wiscombe W.J., Cloud droplet size and liquid water path retrievals from zenith radiance measurements: examples from the Atmospheric Radiation Measurement Program and the Aerosol Robotic Network, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2012, Vol. 12, pp. 10313–10329. DOI: 10.5194/acp-12-10313-2012.

- 14. 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.
- Deneke H., Johnston S., Reuter M., Roebeling R., Tetslaff A., Thomas W., Wolters E., SAF CM scientific report. Validation of CM-SAF cloud products derived from MSG/SEVIRI day, Version 300 products: CFC, CTY, CTH/ CTP/CTT, COT, CWP, CPH, SAF/CM/DWD/KNMI/SMHI/SR/CLOUDS-ORR/3, Ver. 1.2, July 3, 2007, 105 p.
- 16. 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.
- 17. EUMETSAT. OCA product verification, EUM/TSS/DOC/13/706263, Ver. 1, May 23, 2013, 42 p.
- Fernandez P., Algoritm theoretical basis document for "Precipitation products from cloud physical properties" (PPh-PGE14: PCPh v.1.0 & CRPh v.1.0), SAF/NWC/CDOP2/INM/SCI/ATBD/14, Issue 1, Rev. 0, July 15, 2013, 40 p.
- 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.
- 20. Heymsfield A.J., Matrosov S., Baum B., Ice water path optical depth relationship for Cirrus and deep stratiform ice cloud layers, *J. Applied Meteorology and Climatology*, 2003, Vol. 42, No. 10, pp. 1369–1390.
- 21. Hollmann R., Annual product quality assessment report 2012, SAF/CM/DWD/AQA/OR2013, Issue 1.1, October 15, 2013, 71 p.
- 22. Hollmann R., CM SAF, Annual product quality assessment report 2014, SAF/CM/DWD/AQA/OR2015, Issue 1.1, May 29, 2015. 70 p.
- Huang J., Minnis P., Lin B., Yi Y., Fan T.-F., Sun-Mack S., Ayers J.K., Determination of ice-water path in iceover-water cloud systems using combined MODIS and AMSR-E measurements, *Geophusical Research Letters*, 2006, Vol. 33, 5 p. L21801. DOI: 10.1029/2006GL027038.
- Ipe A., Bertrand C., Clerbaux N., Dewitte S., Gonzalez L., Validation and homogenization of cloud optical depth and cloud fraction retrievals for GERB/SEVIRI scene identification using Meteosat-7 day, *Atmospheric Research*, 2004, Vol. 72, pp. 17–37. DOI: 10.1016/j.atmosres.2004.03.010.
- 25. Karlsson K.G., *CM SAF Cloud, albedo, radiation dayset, AVHRR-based*, Edition 1 (CLARA-A1). Cloud Products. Validation Report, SAF/CM/SMHI/VAL/Gac/CLD, Issue 1.2, April 30, 2012, 133 p.
- Karlsson K.G., Lockhoff M., Devasthale A., Dybbroe A., CM SAF: scientific report. Validation of CM-SAF cloud products derived from AVHRR day in the Arctic region, SAF/CM/SMHI/VAL/CFC_CTY_CTO_AVHRR_ARC-TIC, Issue 1.1, May 5, 2009, 88 p.
- 27. 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 dayset from 28yr of global AVHRR day, *Atmospheric Chemistry and Physics. Discuss.*, 2013, Vol. 13, pp. 935–982.
- 28. 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.
- Kniffka A., Lockhoff M., Meirink J.F., Stengel M., CM SAF: validation report. SEVIRI cloud products, SAF/CM/ DWD/VAL/SEV/CLD, Edition 1, Issue 1.2, October 16, 2013. 88 p.
- Meirink J.F., Roebeling R., Wolters E., Deneke H., *CM SAF: algorithm theoretical basis document. Cloud physical products: AVHRR/SEVIRI*, SAF/CM/KNMI/ATBD/CPP, Issue 1.1, June 06, 2010, 24 p.
- 31. Pandey P., de Ridder K., Gillotay D., van Lipsig N.P.M., Estimating cloud optical thickness and associated UV irradiance from SEVIRI by implementing a semi-analytical cloud retrieval algorithm, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2012, Vol. 12, pp. 7961–7975. DOI: 10.5194/acp-12-7961-2012.
- 32. Pincus R., Szczodrak M., Gu J., Austin P., Uncertainty in cloud optical depth estimates made from satellite radiance measurements, *J. of Climate*, 1995, Vol. 5, pp. 1453–1462.
- 33. Reid J.S., Hobbs P.V., Rangno A.L., Hegg D.A., Relationships between cloud droplet effective radius, liquid water content, and droplet concentration for warm clouds in Brazil embedded in biomass smoke, *J. of Geophysical Research*, 1999, Vol. 104, No. D6, pp. 6145–6153.
- 34. SAF CM. Products validation report summary, SAF/CM/DWD/PVRS/1, Ver. 2.0, June 28, 2005. 41 p.
- 35. 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.
- Stengel V., Karlsson K.G., Meirink J.F., CM SAF. Product user manual. Clouds, SAF/CM/DWD/PUM/CLOUDS, Ver. 1.8, February 22, 2015, 99 p.
- 37. 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.
- Yi L., Thies B., Zhang S., Shi X., Bendix J., Optical thickness and effective radius retrievals of low stratus and fog from MTSAT daytime day as a prerequisite for Yellow sea fog detection, *Remote Sensing*, 2016, Vol. 8, No. 8, 15 p. DOI: 10.3390/rs8010008.
- 39. Yoo H., Li Z., Evaluation of cloud properties in the NOAA/NCEP global forecast system using multiple satellite products, *Climate Dynamics*, 2012, 19 p. DOI: 10.1007/s00382-012-1430-0.