Определение параметров облачного покрова и осадков по данным радиометра SEVIRI с КА Meteosat-10 для Европейской территории России

Е.В. Волкова

ФГБУ «НИЦ «Планета»

123242, Москва, Большой Предтеченский пер., д.7.

E-mail: quantocosa@bk.ru

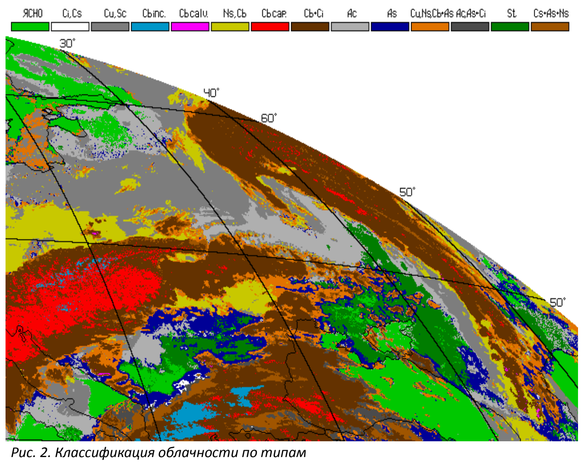

Рис. 2. Классификация облачности по типам

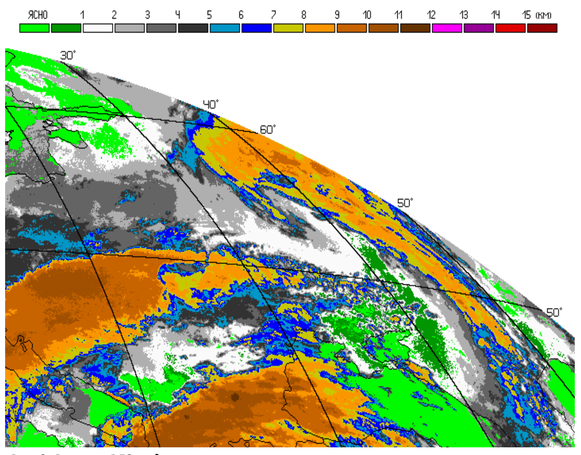

Рис. 3. Высота ВГО над уровнем моря

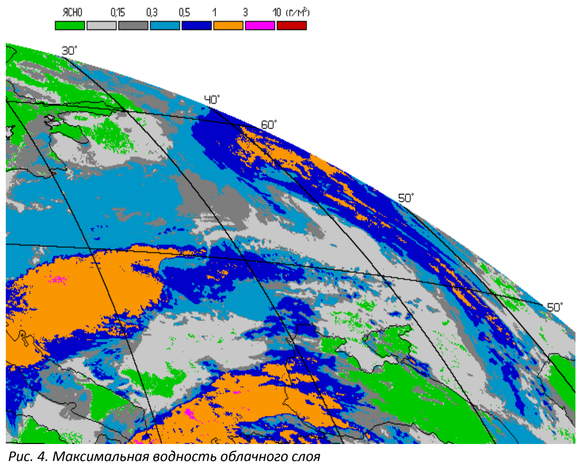

Рис. 4. Максимальная водность облачного слоя

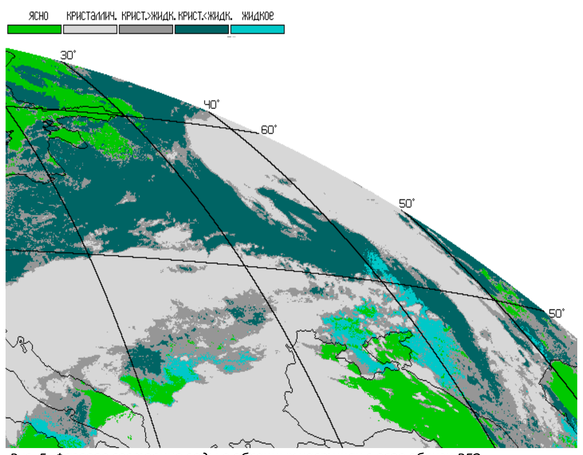

Рис. 5. Фазовое состояние воды в облачных частицах в слое вблизи ВГО

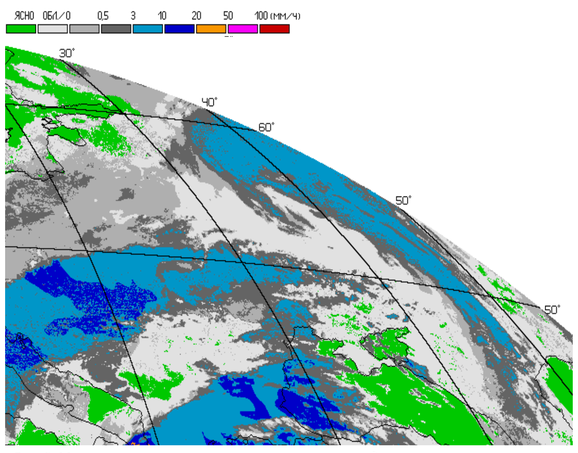

Рис. 6. Максимальная мгновенная интенсивность осадков

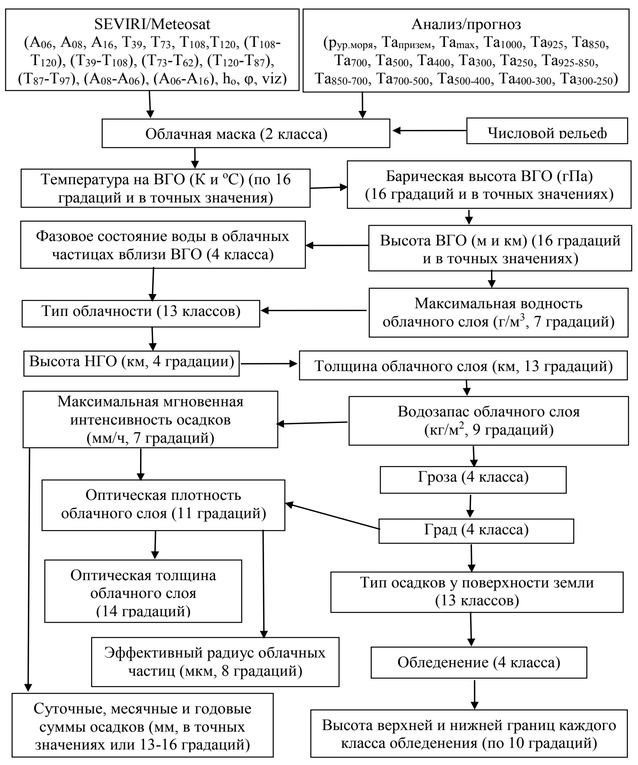

Рис. 1. Схема работы КПМ для данных SEVIRI/Meteosat

Разработанная автором в ФГБУ «НИЦ «Планета»» Комплексная пороговая методика (КПМ) автоматической классификации параметров облачного покрова, осадков и опасных явлений погоды (ОЯП) в круглосуточном режиме по данным радиометра SEVIRI с геостационарного метеоспутника Meteosat-8,9,10 для всего круга обзора (*Волкова, Успенский, 2010*) была модернизирована и специально приспособлена для более точной работы для Европейской территории России (ЕТР) и сопредельных стран.

Классификация в КПМ осуществляется попиксельно пороговым методом. В качестве предикторов КПМ использует измерения SEVIRI/Meteosat-10 в каналах 1-10, а также их разности. Пороговые значения рассчитываются как функции высоты места над уровнем моря, высоты солнца, номера календарного дня, приземной температуры воздуха, угла спутникового визирования, географической широты и др. Дополнительно используются прогностические поля о вертикальном распределении температуры воздуха на стандартных барических уровнях атмосферы, приземной температуре воздуха и атмосферном давлении на уровне моря, а также цифровая карта рельефа. Кроме того, КПМ использует параметры облачности и осадков, полученные на предыдущих этапах классификации. Для расчёта порогового значения в зависимости от предиктора, детектируемого параметра или его класса/градации одновременно может использоваться несколько параметров (см. табл. 1). Выделение классов/градаций происходит в КПМ по нарастающей – от отсутствия явления к его максимальному значению. Пороговое решающее правило состоит из 1-10 процедур. Тест считается пройденным, если пройдены все процедуры в нём. На рис. 1 показана схема работы КПМ, а в табл. 1 – выходные продукты КПМ, их классы/градации и необходимые для классификации предикторные характеристики.

На примере архива синхронных спутниковых и наземных метеонаблюдений за 2011-2016 гг. была проведена валидация полученных с помощью КПМ по информации SEVIRI/Meteosat-10 оценок параметров облачного покрова, осадков и ОЯП для ЕТР данными наземных наблюдений на метеостанциях за количеством общей облачности, высотой нижней границы облачности и погодой в срок наблюдения и в последний час, а также выполнено сопоставление с аналогичными оценками, полученными КПМ по данным AVHRR/NOAA (*Волкова, 2013*) для той же территории, и с климатическими данными. В табл. 2 представлено краткое описание классов облачности, выделяемых КПМ по информации SEVIRI/Meteosat (выборка 2011-2016 гг.).

Результаты валидации показывают, в целом, хорошее качество получаемых выходных продуктов КПМ. Они не уступают по точности зарубежным аналогам и удовлетворяют предъявляемым к ним пользователями требованиям (см. табл. 3), поэтому могут быть рекомендованы к использованию в качестве равноценной замены наземным метеонаблюдениям для мезомасштабного мониторинга облачного покрова и его параметров как в оперативном режиме, так и для климатических исследований.

Проведённые автором исследования показали, что точность классификации может ухудшаться в холодное время года и тёмное время суток, в горных районах (выше 500 м над уровнем моря), при наличии температурных инверсий, очень маленьких вертикальных температурных градиентах или сильном приземном выхолаживании, над небольшими водоёмами или в прибрежной зоне в случаях с большой амплитудой температур на границе суша-вода, а также при больших углах спутникового визирования. На точность классификации влияет качество и точность дополнительной прогностической информации о температуре и давления, в т.ч. пространственное и временное разрешение, а также величина заблаговременности. Ошибки более вероятны в случаях с относительно тонким облачным слоем, на краях облачного массива и для многослойной облачности. Грубых ошибок, когда вместо отсутствия явления или его минимального значения детектируется его максимальное значение, или наоборот, – замечено не было. Ошибочно детектируемая ложная облачность имеет малые значения водности и водозапаса, обычно без осадков или с очень слабыми осадками и всегда без ОЯП.

Оценки параметров облачности, осадков и ОЯП получаются в большинстве случаев (кроме интенсивности осадков и водности – максимальные) средними для площади пиксела спутникового изображения, поэтому в его пределах возможны и другие классы/градации.

Время полной обработки фрагмента спутникового изображения для территории ЕТР и сопредельных стран не превышает 1 мин в зависимости от ПЭВМ, при этом рассчитываются одновременно все параметры облачности, осадков и ОЯП и проводится предварительная подготовка спутниковой и прогностической информации. Периодичность поступления спутниковой информации составляет от 15 мин, т.е. до 96 раз в сутки.

Работа выполнена при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований – грант № 16-05-01097.

Литература

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.

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.

Таблица 1

Детектируемые КПМ параметры облачного покрова, осадков и ОЯП, их классы/градации и необходимые для классификации предикторные характеристики

детектируемый параметр	*обозначение*	*классы/градации*	*предикторы*	*пороговые значения зависят от*
Облачная маска	КОО	облачно, безоблачно (суша, вода, снег/лёд, пыль, дым)	T_{108}, T_{39}, (T_{108}-T_{120}), (T_{39}-T_{108}), (T_{73}-T_{62}), (T_{120}-T_{87}), A_{06}, A_{08}, A_{16}, (A_{08}-A_{06}), $Ta_{призем}$, $Ta_{ур.моря}$	h_o, φ, $Ta_{ур.моря}$, $Ta_{призем}$, (Ta_{700}-Ta_{500}), Ta_{500}, Ta_{400}, viz, h_{ref}, Ta_{max}
Температура ВГО (К, °С)	$T_{ВГО}$	точные значения	(T_{120}-T_{87}), (T_{108}-T_{120}), T_{108}, T_{120}, T_{39}, $Ta_{призем}$, Ta_{max},$Ta_{ур.моря}$	
Высота ВГО (м, гПа)	$h_{ВГО}$, $ph_{ВГО}$	точные значения	$T_{ВГО}$, $p_{ур.моря}$, Ta_{max}, $Ta_{призем}$, h_{ref}	
Фазовое состояние воды в облачных частицах на ВГО	faza	кристаллические, водяные, смешанные: вода>лёд, вода<лёд	T_{39}, (T_{120}-T_{87}), (T_{108}-T_{120}), $h_{ВГО}$, $T_{ВГО}$	data, h_o, $Ta_{ур.моря}$
Максимальная водность облачного слоя (г/м³)	W_{max}	0, 0-0.15, 0.15-0.3, 0.3-0.5, 0.5-1, 1-3, 3-10, >10	T_{108}, (T_{108}-T_{120}), (T_{39}-T_{108}), (T_{120}-T_{87}), (T_{73}-T_{62}) , $h_{ВГО}$, (A_{08}-A_{06}), (A_{06}-A_{16})	Ta_{850}, $Ta_{850-700}$, Ta_{700}, $Ta_{700-500}$, Ta_{500}, $Ta_{500-400}$, Ta_{400}, $Ta_{400-300}$, Ta_{300}, $Ta_{300-250}$, φ, $Ta_{ур.моря}$, Ta_{max}, h_{ref}, h_o, viz
Тип облачности	cltyp	CiCs, CuSc, Cbinc, Cbcalv, NsCb, Cbcap, low+Ci, AcCu, As, low+As, med+Ci, St, Cs+As+Ns	T_{108}, (T_{108}-T_{120}), (T_{73}-T_{62}), (T_{120}-T_{87}), (T_{87}-T_{97}), T_{73}, $h_{ВГО}$, W_{max}, faza	data, h_{ref}, $Ta_{ур.моря}$, Ta_{700}, $Ta_{700-500}$, Ta_{500}, Ta_{400}, Ta_{300}, φ, h_o
Высота НГО (км)	$h_{НГО}$	<1.5, 1.5-3, 3-5, >5	cltyp, W_{max}, T_{108}, (T_{108}-T_{120}), (T_{73}-T_{62}), (T_{120}-T_{87}), $h_{ВГО}$	φ, data, h_{ref}, W_{max}, $h_{ВГО}$, Ta_{500}, $Ta_{ур.моря}$
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	$h_{НГО}$, $h_{ВГО}$, h_{ref}	
Максимальный водозапас (кг/м²)	SW	0, 0-0.5, 0.5-1, 1-2, 2-5, 5-10, 10-25, 25-50, 50-100, >100	cltyp, W_{max}, T_{108}, (T_{108}-T_{120}), (T_{73}-T_{62}), (T_{120}-T_{87}) , (A_{06}-A_{16}), $h_{НГО}$, dH	φ, data, h_{ref}, h_o, $Ta_{ур.моря}$, $Ta_{850-700}$, $Ta_{700-500}$, Ta_{500}, $Ta_{500-400}$, Ta_{400}, Ta_{300}, Ta_{250}
Максимальная мгновенная интенсивность осадков (мм/ч)	I_{max}	0, 0-0.5, 0.5-3, 3-10, 10-20, 20-50, 50-100, >100	(T_{108}-T_{120}), (T_{120}-T_{87}), T_{108}, (A_{06}-A_{16}), $T_{ВГО}$, W_{max}, SW, faza, dH, $h_{ВГО}$, $h_{НГО}$	data, h_o, h_{ref}, $Ta_{ур.моря}$, φ, $h_{НГО}$, viz, Ta_{850}, $Ta_{850-700}$, Ta_{700}, Ta_{500}, $Ta_{500-400}$, $Ta_{400-300}$, Ta_{300}, $Ta_{300-250}$
Гроза	thund	без грозы, слабая, умеренная, сильная гроза	cltyp, $h_{НГО}$, faza, (T_{108}-T_{120}), (T_{120}-T_{87}), (T_{73}-T_{62}), (T_{87}-T_{97}), (A_{06}-A_{16}), T_{108}, W_{max}, SW, $T_{ВГО}$, $h_{ВГО}$	h_o, φ, h_{ref}, $Ta_{ур.моря}$, Ta_{300}, $Ta_{300-250}$, Ta_{250}
Град	hail	без града, град в облаках/слабый, умеренный, сильный град	thund, cltyp, W_{max}, SW, $T_{ВГО}$, T_{108}, (T_{108}-T_{12}), (T_{120}-T_{87}), (A_{06}-A_{16}), $h_{НГО}$, faza, Ta_{700}, $Ta_{700-500}$, $h_{ВГО}$	h_{ref}, $Ta_{ур.моря}$, φ, h_o, Ta_{300}
Тип осадков у поверхности земли	prtyp	без осадков, слабый, умеренный и сильный снег, мокрый снег/снег+дождь, ледяной дождь, морось, слабый, умеренный и сильный дождь, ливень, снежная крупа, град	I_{max}, hail, W_{max}, Ta_{max}, $Ta_{призем}$, $T_{ВГО}$, $h_{ВГО}$, h_{ref}, T_{108}, (T_{108}-T_{12}), Ta_{925}, $Ta_{925-850}$, Ta_{850}, $Ta_{850-700}$, Ta_{700}, $Ta_{700-500}$, Ta_{500}, $Ta_{500-400}$, Ta_{400}	h_{ref}, φ, $Ta_{ур.моря}$, $Ta_{призем}$, I_{max}, hail
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	cltyp, W_{max}, I_{max}, hail, $h_{НГО}$, faza	-
Оптическая толщина облачного слоя	COT	<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	COD, dh, (T_{108}-T_{120}), $Ta_{ур.моря}$	
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, умеренное, сильное	W_{max}, I_{max}, $h_{НГО}$, prtyp, $p_{ур.моря}$, $Ta_{ур.моря}$, $T_{ВГО}$, $Ta_{призем}$, h_{ref}, φ	$ph_{ВГО}$
Высота верхней и нижней границ обледенения (км) каждой интенсивности	ВГ, НГ	<1, 1-2, 2-3, 3-4, 4-5, 5-6, 6-7, 7-8, >8	$ph_{ВГО}$, $h_{НГО}$, $p_{ур.моря}$, $Ta_{ур.моря}$, h_{ref}, φ	-

Таблица 2

Краткое описание классов облачности, выделяемых КПМ по информации SEVIRI/Meteosat (выборка 2011-2016 гг.).

параметры облачности	*класс облачности в КПМ*												
	Ci,Cs	*Cu,Sc*	*Cb inc.*	*Cb calv*	*Ns,Cb*	*Cb cap*	*Cb+Ci*	*Ac,Cu*	*As*	*low+As*	*med+Ci*	*St*	*CsAsNs*
основные формы облачности	Ci, Cs, Cc, As trans.	Cu hum., Cu med., Cu cong., Ac cuf., Sc, St und.	Cb inc. (начало распада)	Cb calv., Cu cong.	Ns, Frnb., Cb hum., St fr., Cu fr.	Cb cap. (макс. развитие)	Cb, Ns, Cu, Sc, Cu cong. + Ci, Cs, As	Ac, Cc, Cu hum., Sc trans., As und., St und.	As, Ac und., St, Ci sp., Cs neb.	Sc, Ns, Cu, Cb, St +As, Ac	Ac, As Cu hum. +Ci, Cs, As	St, As neb., Sc, Cu fr., Ac, Cu hum.	Ci,Cs+As +Ns
$T_{ВГО}$, К (сред., (диапазон))	249 (220-265)	260 (235-295)	214 (195-230)	246 (220-275)	253 (230-285)	223 (205-245)	231 (200-265)	265 (240-295)	255 (235-285)	248 (220-275)	247 (210-265)	266 (220-295)	239 (205-265)
$h_{ВГО}$, км (сред., (диапазон))	7,5 (5,5-12)	2,8 (0,5-6,0)	11,2 (6,9-13,9)	6,2 (4,0-10,5)	4,5 (2,5-7,5)	9,8 (5,8-13,0)	7,9 (5,4-13,1)	2,4 (1,5-5,5)	4,0 (1,6-7,0)	4,8 (1,7-7,2)	7,4 (5,5-13,0)	0,9 (≤3,1)	7,4 (5,5-12,0)
$H_{НГО}$, км (сред., (преобладает))	≥5	≤1,5	≤1,5	≤1,5	≤1,5	≤1,5	≤1,5	≤5 (1,5-3)	любая (3-5)	≤3	1,5-5 (1,5-3)	≤3 (≤1,5)	≤3 (1,5-3)
dH, км (сред., (диапазон))	2,38 (0,1-7)	2,11 (0,1-6)	10,19 (≥7)	5,57 (≥3)	3,80 (1-7)	9,1 (≥5)	7,21 (≥5)	0,57 (0,1-2)	0,92 (0,1-2)	3,26 (0,1-6)	5,01 (≥0,5)	0,34 (0,1-2)	5,72 (≥2)
COD (сред., (диапазон))	2,5 (≤5)	17,9 (10-25)	53,5 (≥40)	34,6 (25-70)	24,2 (15-40)	47,9 (≥40)	37,7 (20-60)	10,6 (5-15)	2,5 (≤10)	18,4 (5-40)	11,8 (5-15)	5,7 (≤10)	24,6 (15-40)
COT (сред., (мин.-макс.))	4,6 (≤20)	26,7 (≤75)	294,3 (≥150)	113,4 (≥50)	57,1 (20-150)	235,5 (≥100)	153,3 (≥50)	7,2 (5-15)	2,5 (≤10)	42,5 (≤150)	38,7 (5-100)	4,5 (≤10)	90,5 (40-250)
R_{eff}, мкм (сред., (диапазон))	34,3 (5-10, ≥35)	10,9 (5-20)	31,7 (≥25)	22,1 (≥5)	16,5 (5-25)	28,9 (≥25)	23,7 (≥10)	5,2 (≤10, ≥30)	11,1 (≤10, ≥35)	14,8 (≤35)	14,5 (≤15, ≥30)	15,0 (5-30)	19,6 (5-30)
W_{max}, г/м³ (ср, (диапазон))	0,08 (≤0,15)	0,32 (0,15-0,5)	4,43 (≥1,0)	0,76 (≥0,5)	0,48 (0,3-1,0)	2,79 (≥1,0)	1,03 (0,3-10,0)	0,08 (≤0,15)	0,06 (≤0,5)	0,43 (0,15-1,0)	0,25 (≤0,3)	0,08 (≤0,3)	0,54 (0,3-1,0)
SW, кг/м² (ср., (диапазон))	≤0,5	0,81 (≤2)	35,19 (≥5)	3,55 (1-50)	1,45 (0,5-5)	21,60 (≥5)	7,74 (1-50)	≤0,5	≤0,5	1,15 (≤5)	0,74 (≤1)	≤0,5	2,33 (0,5-10)
I_{max}, мм/ч (сред., (диапазон))	0	0,4 (≤3)	25,3 (≥3)	6,3 (≥0,5)	2,2 (≤10)	18,5 (≥3)	8,7 (≤50)	0	0	1,7 (≤10)	≤0,5	0	1,4 (≤10)
POP, %	0	60	100	100	92	100	100	0	0	70	41	0	93
prtyp **(преобладает)**	без осадков	**б/ос.,** сн.крупа, **сл.**/ум. сн., сл. д., **морось**	**сил. снег, сил. дож., ливень,** сн.крупа	ум./**с**. сн., сл./**ум**./с. дождь, сн.крупа	б/ос., сл./**ум**./с. сн., **сл./ум**. д., морось, сн.кр.	**сил. снег, сил. дож., лив.**, сн.кр., град	ум./**с**. сн., сл./**ум./с**. дож., сн.кр.	без осадков	без осадков	б/ос., сн.кр., сл./**ум**./с. сн., **морось**, **сл./**ум. д.	без осадков, морось, сл. снег	без осадков	б/ос., сл./**ум**./с. сн., сн.кр., **морось, сл**./ум. д.
faza на ВГО **(преобладает)**	**ice**, i>w	любая (сезон.)	ice	**ice, i>w,** w>i	ice, **i>w, w>i,** wat	ice	**ice,** i>w	любая (сезон.)	ice, **i>w,** w>i	**ice, i>w,** w>i	**ice,** i>w	любая (сезон.)	**ice,** i>w
гроза	-	-	+	+	-	+	+	-	-	-	-	-	-
град в облаках	-	-	+	+	-	+	+	-	-	-	-	-	-
обледенение **(преобладает.)**	б/облед.	б/облед., **слаб.**	умерен., **сил.**	слаб., **умер.**, сил.	б/обл., **сл.,** умерен.	умерен., **сил.**	слаб., **ум.,** сил.	б/облед.	**б/обл.,** слаб.	б/обл., **сл.,** умерен.	б/обл., **слаб.**	**б/обл.,** слаб.	**слаб.,** умерен.

Примечание. ice – кристаллические, i>w – смешанные, кристаллическая фаза преобладает, w>i – смешанные, жидко-капельная фаза преобладает, wat – жидко-капельные, сезон. – в зависимости от времени года; сн. – снег, с. или сил. – сильный, ум. – умеренный, сл. – слабый, сн.кр. – снежная крупа, д. или дож. – дождь, б/ос. – без осадков, лив. - ливень

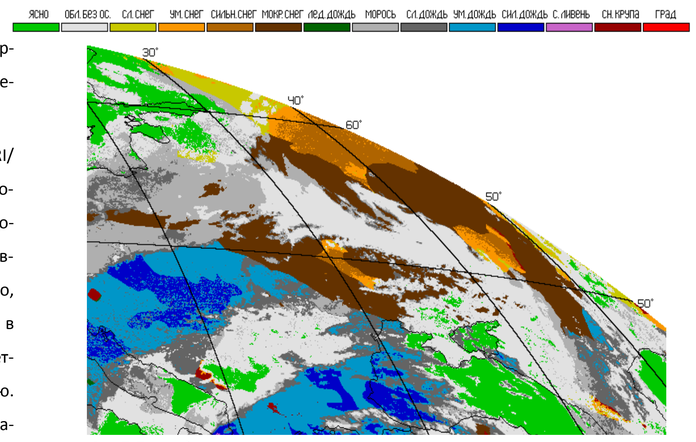

Рис. 7. Тип осадков у поверхности земли

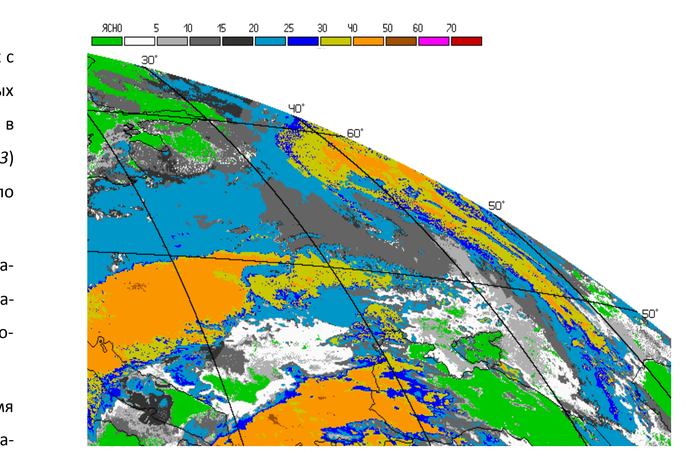

Рис. 8. Оптическая плотность облачного слоя

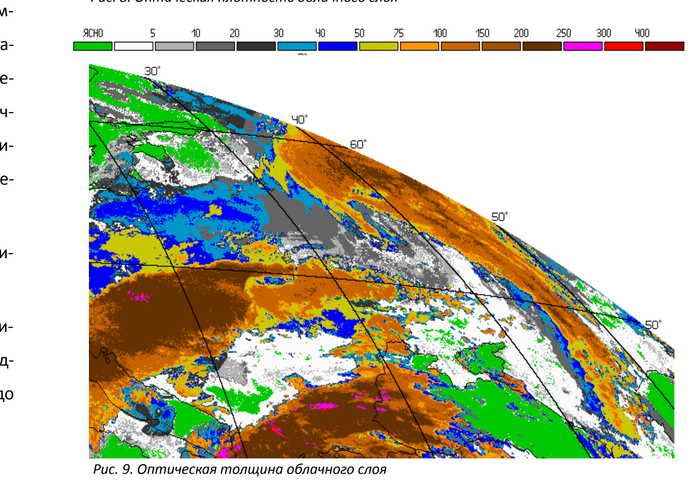

Рис. 9. Оптическая толщина облачного слоя

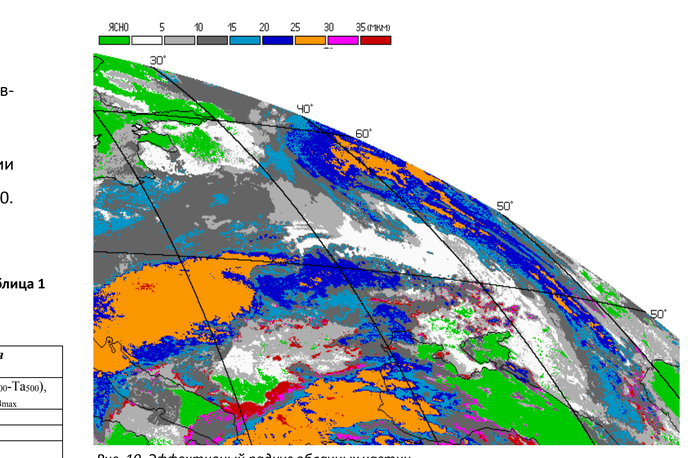

Рис. 10. Эффективный радиус облачных частиц

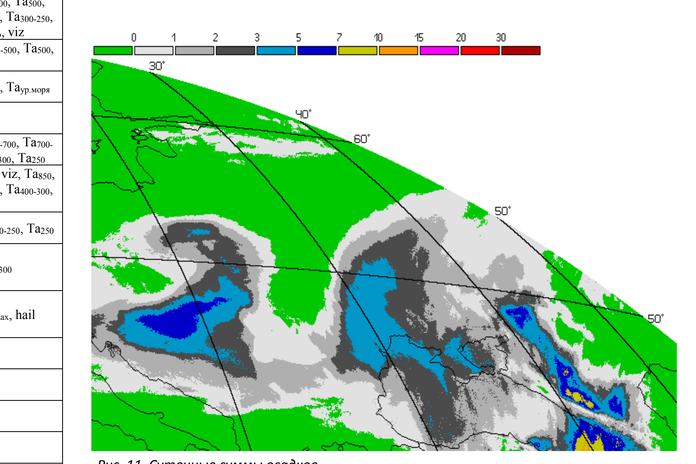

Рис. 11. Суточные суммы осадков

Таблица 3

Точность определения параметров облачного покрова, осадков и ОЯП по данным SEVIRI/Meteosat-10

параметр облачности	*оценка точности*	*требования к точности*	*зарубежные методики****	*КПМ*
КОО	dev, %	±10-15**	±3 (до 30)	±5-15
	dev, окт.	±1**	-	±1
	СКО, %	20-45**	14-17	-
$H_{ВГО}$	dev, м	±500-800**	±500-1500	±500-2000
	СКО, м	1500**	750-3000	-
dH	dev, м	±100-1000*	не определяется	±500-2000
$pH_{ВГО}$	dev, гПа	±45-170**	±40-180	±100
	СКО, гПа	70-160**	110	-
$H_{НГО}$	dev	±1 градация*	не определяется	±1 градация
	HR, %	75-90*		85 (80-92)
faza	dev	±1 класс*	-	±1 класс
	HR, %	75-90*	0-90	80
водность	dev	±1 градация*	LWC	±1-2 градации
	HR, %	75-90*		70-90
водозапас	dev	±1 градация*	LWP, IWP	±1-2 градации
	HR, %	75-90*		70-90
зоны осадков	POD, %	65-75*	85-92	92 (90-95)
	FAR, %	15-35*	25-47	15 (10-20)
тип осадков (3 класса)	POD, %	60-80*	не определяется	15-91
град	POD, %	65-75*	не определяется	5-63
гроза	POD, %		не определяется	5-42
COD	dev	±1 градация*	-	±1-2 градации
COT	dev	±10 % (ВМО) или ±1 градация*	±5-300 %	
Reff	dev	±1 градация*	-	
ΣIсут	dev, мм	0,5-10**	-	±4-15 (сред. за месяц)
ΣIмес	dev, мм	10-25 % от ΣI*	-	±2,5 (климатич. исследования); ±5-30 (оператив. мониторинг)
ΣIгод	dev, %		-	5-16
	СКО, %	25-30 % от ΣI*	-	18-22,5

*Примечание. * - критерии, предложенные автором; ** - требования ВМО и GCOS к информации по данным SEVIRI/Meteosat; *** - получено в рамках проектов EUMETSAT SAF NWC и SAF CM по данным SEVIRI/Meteosat (http://www.eumetsat.int).*