

Автоматизированный программный комплекс оперативного мониторинга параметров облачного покрова, осадков, опасных явлений погоды и подстилающей поверхности в пределах круга обзора радиометра SEVIRI с геостационарных метеоспутников серии MSG

Е.В. Волкова, А.В. Кухарский

ФГБУ «НИЦ «Планета»
123242, Москва, Большой Предтеченский пер., д.7.
E-mail: quantocosa@bk.ru, kukharsky@planet.iitp.ru

Информация об облачности, осадках, опасных явлениях погоды и состоянии подстилающей поверхности необходима во многих сферах человеческой деятельности: в сельском хозяйстве, строительстве, для нужд авиации, прогноза погоды и стихийных бедствий, моделирования климатических изменений и др. Наземная сеть метеонаблюдений, включая наблюдения на метеостанциях, метеорологических радиолокаторов и грозопеленгаторов, размещена по территории Земного шара крайне неравномерно. Поэтому спутниковый мониторинг приобретает всё большее значение. Информация с геостационарных спутников обеспечивает наблюдения с высокой периодичностью (15 мин) за территорией с радиусом $\sim 70^\circ$ (без приполярных областей).

В ФГБУ «НИЦ «Планета» создан универсальный автоматизированный программный комплекс (АПК) «SEVIRIncepfullfraguni» (результат модернизации и объединения АПК «ETR-plus» [3], «SEVIRI-Europe» [4] и «SEVIRI-full» [1]), позволяющий автоматически в круглосуточном режиме дешифровать и классифицировать по косвенным признакам пороговым методом параметры облачного покрова, осадков и опасных явлений погоды (ОЯП), рассчитывать характеристики подстилающей поверхности для полного круга обзора радиометра SEVIRI с геостационарных метеоспутников серии MSG, а также валидировать параметры облачности, осадков и ОЯП данными наземных наблюдений и климатическими оценками и выдавать автоматическое заключение о качестве классификации (см. рис. 1).

В основе АПК лежит оригинальная авторская Комплексная пороговая методика (КПМ) [1], которая использует измерения SEVIRI/Meteosat в каналах 1, 2, 4-10 ($\lambda=0,6, 0,9, 3,9, 6,2, 7,3, 8,7, 9,7, 10,8$ и $12,0$ мкм), а также их разности. Дополнительно к ним – прогностические поля (NCEP GFS, пространственное разрешение $0,5^\circ$, сроки 0, 6, 12 и 18 ч ВСВ, заблаговременность 0 и 6 ч) о вертикальном распределении температуры воздуха в атмосфере (включая температуру воздуха на 17 барических уровнях (T_{ppp}), приземную температуру воздуха ($T_{\text{призем}}$) и температуру подстилающей поверхности ($T_{\text{пп}}$) и атмосферном давлении на уровне моря ($p_{\text{ур. моря}}$), цифровую карту рельефа (gtopo30).

Пороговые значения предикторов рассчитываются для каждого пиксела спутникового изображения с помощью эмпирических авторских функций от высоты места над уровнем моря (h_{ref}), высоты солнца (h_o), номера календарного дня от начала года (datd), $T_{a_{призем}}$, $T_{шт}$, максимальной в атмосферном столбе температуры воздуха ($T_{a_{max}}$) и приведённой к уровню моря ($T_{a_{ур.моря}}$), географической широты (ϕ) и др. (см. табл. 1). В КПМ соблюдается строгий порядок выполнения этапов классификации, т.к. параметры облачности, осадков и ОЯП, полученные на ранних этапах классификации, используются в дальнейшем (см. рис. 2). Выделение классов/градаций происходит по нарастающей – от отсутствия явления к его максимальному значению.

Выходные продукты АПК по облачности, осадкам, ОЯП и подстилающей поверхности получают в оперативном режиме для каждого срока спутникового наблюдения в виде числовых матриц (точные значения или коды классов/градаций) и соответствующих им карт (rsx-файлы) с исходным разрешением спутниковой информации для полного круга обзора (угол спутникового визирования не более $7,7^\circ$) или его части, например, для региона «Европа и Россия», а также для его фрагмента с высоким разрешением на регулярной сетке $0,025^\circ$ ($1,5'$), например, для регионов «ЕТР» (европейская территория России) и «Западная Сибирь». Для характеристик подстилающей поверхности также строятся монтажи для светлого времени суток. Для параметров облачности и осадков дополнительно рассчитываются «климатические» оценки: за период времени (сутки, месяц, год) накапливаются суммы осадков и рассчитываются средние значения метеоявлений, макро- и микрофизических характеристик облачности, а также проводится ежесуточная и ежемесячная валидация точности классификации результатами наземных наблюдений на метеостанциях и климатическими оценками (только для фрагментов спутникового изображения на регулярной сетке). Примеры некоторых выходных продуктов см. на рис. 3-12.

Для обеспечения оперативного получения потребителями информационных продуктов создано программное обеспечение, позволяющее на регулярной основе получать согласованный набор из нескольких наименований продуктов с разной периодичностью (от 15 мин) и просматривать в режиме слайд-шоу непосредственно на мониторе дежурного синоптика для анализа развития метеоявления и составления краткосрочного прогноза.

На примере архива синхронных спутниковых и наземных метеонаблюдений за 2017-2020 гг. была проведена валидация выходных продуктов АПК по облачности и осадкам, полученных по данным SEVIRI/Meteosat-11 и -8 (точки стояния 0° и $41,5^\circ$ в.д.) результатами наземных наблюдений на метеостанциях и климатической информацией [5].

Подавляющее большинство параметров облачности, осадков и ОЯП детектируется с точностью ± 1 класс/градация в 70-95 % случаев и ± 2 класса/градации в 80-100 % случаев (в зависимости от детектируемого параметра, сезона, региона, времени суток и др.). Грубых ошибок выявлено не было. Точность детектирования может немного ухудшаться: при низком положении солнца и в тёмное время суток, в холодный период года, при наличии температурной инверсии или сильного приземного выхолаживания, при наличии снежно-ледового покрова, на границе суша-вода и над водоёмами с большими амплитудами температур относительно суши, с увеличением высоты места над уровнем моря, при больших углах спутникового визирования, с уменьшением линейного размера и интенсивности метеоявления, на краях облачного покрова, в случаях с многослойной, мелкой кучевообразной и оптически тонкой перистой и высокостроистой облачностью. Точность классификации для некоторых метеопараметров достаточно сильно зависит от точности прогностической информации.

Независимая валидация, проведённая в Центрально-Чернозёмном УГМС и Вологодском ЦГМС (с июня 2019 г. по май 2020 г.), показала [2, 5], что средняя за год успешность по детектированию зон осадков, в т.ч. интенсивности и типа осадков, составляет не менее 90%, для зон гроз и града – около 99 %, для типа облачности – не менее 80 %. Различия между суточными и сезонными максимумами и минимумами, а также для разных метеостанций обычно не превышают нескольких процентов. Решением ЦМКП от 6.11.2020 г. технология рекомендована к внедрению в оперативную работу ФГБУ «НИЦ «Планета», а выходная продукция – в оперативную работу Центрально-Чернозёмного УГМС и Вологодского ЦГМС в качестве вспомогательного и консультативного метода.

Таким образом, выходные продукты КПИМ не уступают по точности зарубежным аналогам, получаемым, например, в рамках проектов SAF NWC и SAF CM EUMETSAT (<http://www.eumetsat.int>), и, в основном, удовлетворяют предъявляемым к ним пользователями требованиям, поэтому могут быть предложены к использованию в качестве дополнения к наземным метеонаблюдениям для мезомасштабного и субглобального мониторинга облачного покрова и его параметров как в оперативном режиме, так и для климатических исследований. Время обработки одного срока спутникового наблюдения, включая предварительную подготовку и классификацию, для полного круга обзора не превышает 1 мин.

Литература

1. *Волкова Е.В.* Использование комплексной пороговой методики для климатических исследований параметров облачного покрова, осадков и опасных явлений погоды по данным SEVIRI/METEOSAT-9 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 2. С. 200-206.
2. *Волкова Е.В., Кухарский А.В.* Автоматизированная технология диагноза параметров облачного покрова, осадков и опасных явлений погоды для Европейской территории России по данным радиометра SEVIRI с геостационарных метеоспутников серии Meteosat MSG // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2020. № 4 (378). С. 43-62. doi 10.37162/2618-9631-2020-4-43-62.
3. *Волкова Е.В., Кухарский А.В.* Специализированный программный комплекс получения и валидации спутниковых оценок параметров облачности, осадков, подстилающей поверхности и приземного слоя воздуха для Европейской территории России // Материалы 17й Всероссийской открытой конференции "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса", 11-15 ноября 2019 г., ИКИ РАН, Москва, 2019. С. 161. doi 10.21046/17DZZconf-2019a.
4. *Волкова Е.В., Кухарский А.В.* Специализированный программный комплекс получения оценок параметров облачности и осадков по данным радиометра SEVIRI с геостационарного метеоспутника Meteosat (0° в.д.) для европейской территории России // Информационные технологии в дистанционном зондировании Земли – RORSE 2018 (Электронный сборник статей 16й конференции, 12-16 ноября 2018 г., Москва, Россия). С. 248-255. Doi 10.21046/rorse2018.248.
5. *Волкова Е.В., Кухарский А.В., Санникова Г.В., Павлов И.Н.* Валидация автоматизированной технологии диагноза параметров облачного покрова, осадков и опасных явлений погоды по данным радиометра SEVIRI с геостационарных метеоспутников серии Meteosat MSG // Информационный сборник. результаты испытаний новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. 2021. № 48. С. 72-88.

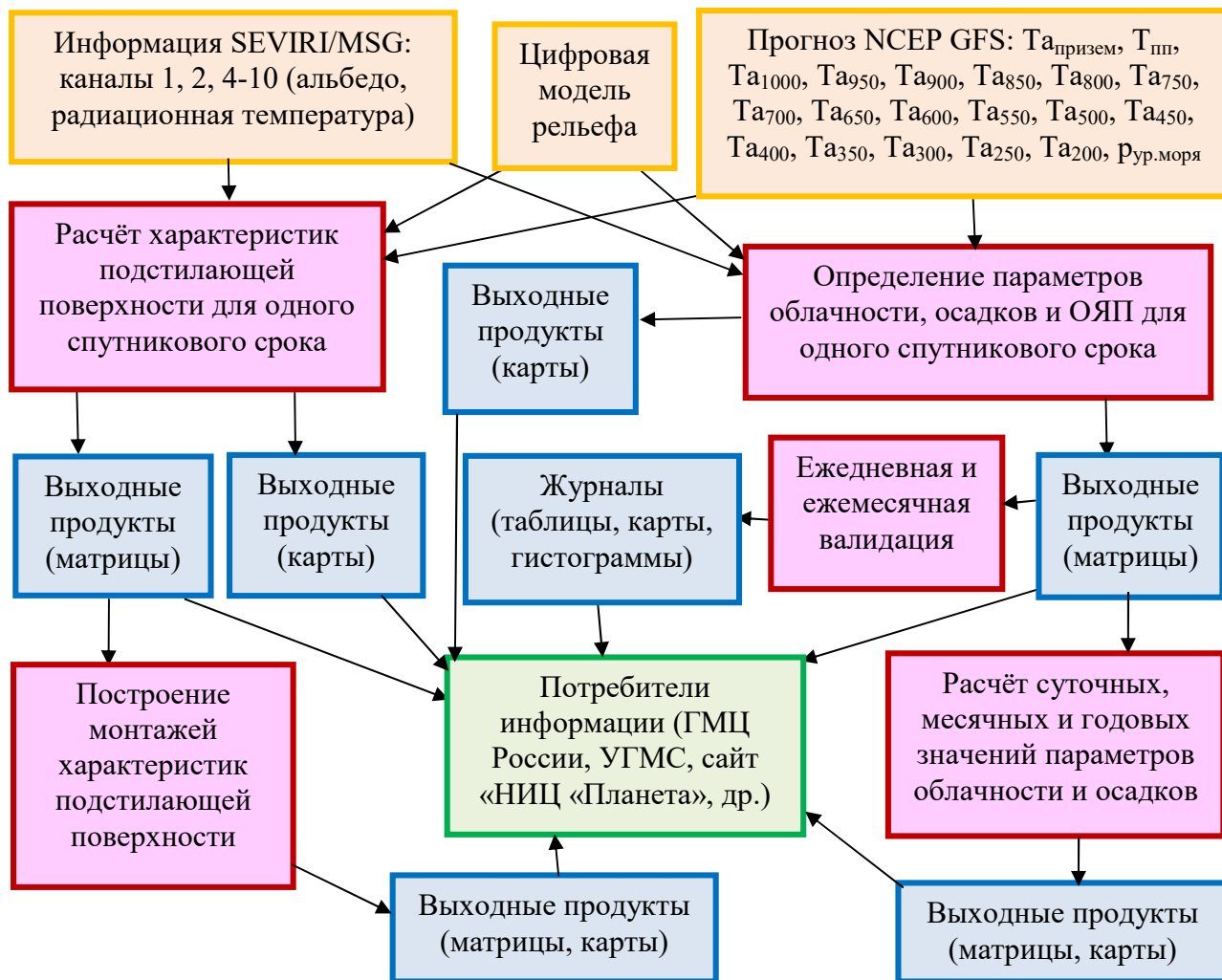


Рис. 1. Технологическая схема работы АПК «SEVIRIncepfullfraguni»

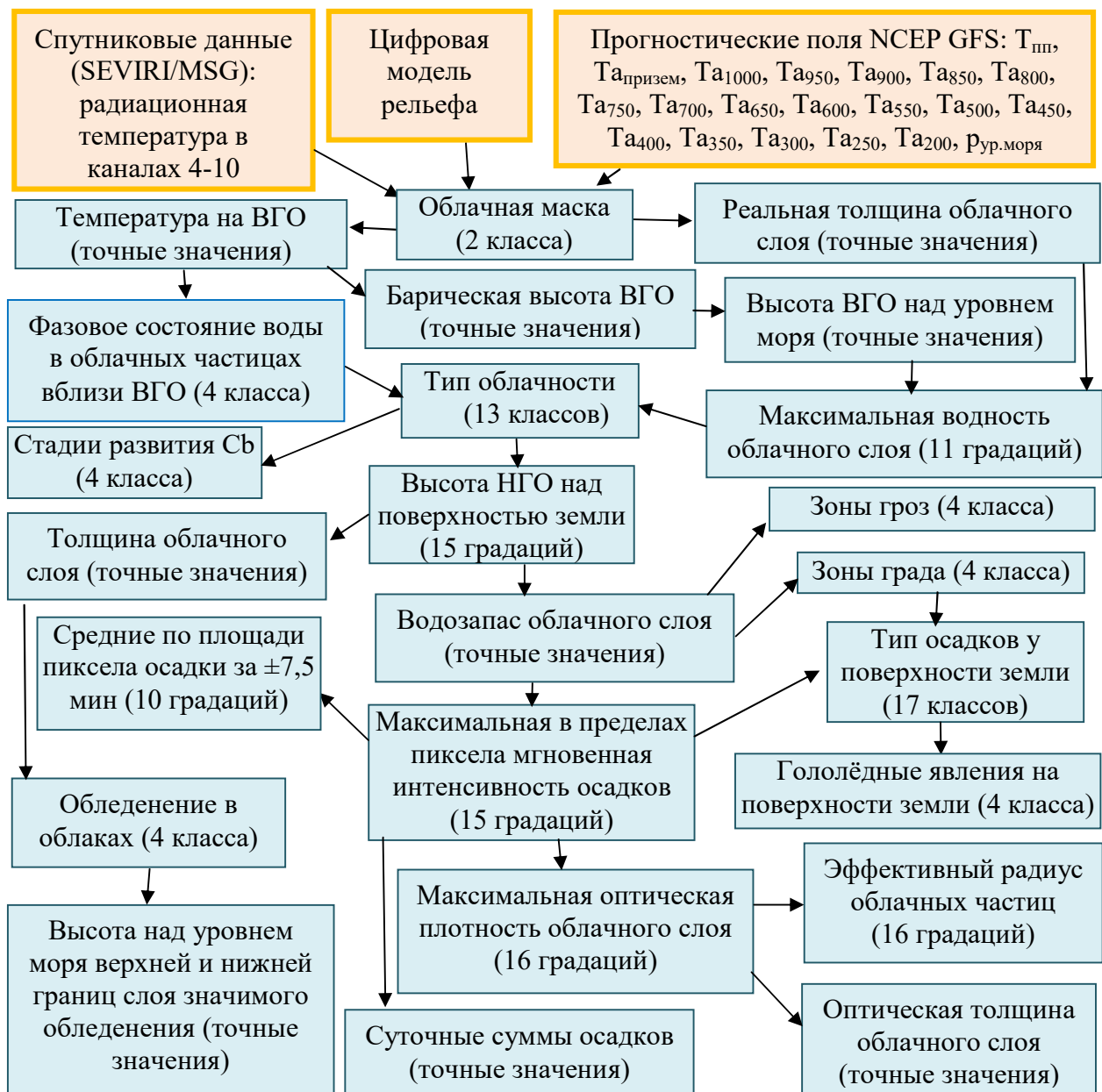


Рис. 2. Технологическая схема работы КПМ при детектировании и классификации параметров облачного покрова, осадков и ОЯП

Таблица. Детектируемые КППМ по данным SEVIRI/Meteosat параметры облачного покрова, осадков и ОЯП, их классы/градации и необходимые для классификации предикторные характеристики АПК «SEVIRIncepfulluni»

Параметр (ед. измер.)	Обозначение	Классы/градации	Предикторы
Облачная маска	КОО	облачно, безоблачно	$T_{108}, (T_{39}-T_{108}), (T_{120}-T_{87}), (T_{108}-T_{120}), (T_{73}-T_{62}), h_{ref}, T_{пп}, Ta_{призем}, Ta_{ур.моря}, h_o$
Температура ВГО (К, °С)	$T_{ВГО}$	точные значения или градации	$T_{108}, T_{120}, (T_{108}-T_{120}), (T_{39}-T_{108}), h_{ref}, Ta_{ур.моря}, h_o$
Барическая высота ВГО (гПа)	$ph_{ВГО}$	точные значения или градации	$T_{ВГО}, p_{ур.моря}, Ta_{max}, h_{ref}, \varphi$
Высота ВГО над уровнем моря (м, км)	$h_{ВГО}$	точные значения или градации	$ph_{ВГО}, p_{ур.моря}, h_{ref}, \varphi, T_{пп}, Ta_{призем}$
Реальная толщина облачного слоя (м, км)	$dHcl$	точные значения или градации	$T_{108}, T_{120}, p_{ур.моря}, h_{ref}, \varphi, Ta_{max}, T_{пп}, Ta_{призем}$
Фазовое состояние воды в облачных частицах на ВГО	faza	кристаллические, водяные, смешанные: жидк.>крист., жидк.<крист.	$T_{108}, (T_{108}-T_{120}), (T_{39}-T_{108}), (T_{120}-T_{87}), T_{ВГО}, Ta_{ур.моря}, h_o$
Максимальная водность облачного слоя (г/м ³)	W_{max}	0-0,1, 0,1-0,2, 0,2-0,3 0,3-0,4, 0,4-0,5, 0,5-0,7, 0,7-1, 1-3, 3-5, 5-10, >10	$T_{108}, (T_{39}-T_{108}), (T_{120}-T_{87}), (T_{108}-T_{120}), (T_{73}-T_{62}), h_{ВГО}, h_{ref}, dHcl, T_{пп}, Ta_{призем}, Ta_{ур.моря}, h_o, Ta_{850}, Ta_{750}, Ta_{600}, Ta_{450}, Ta_{400}, Ta_{350}, Ta_{300}, Ta_{250}$
Тип облачности	cltyp	CiCs, CuSc, Cbinc, Cbcalv, NsCb, Cbcap, Cb+Ci, AcCu, As, CuNsCb+As, AcAs+Ci, St, Cs+As+Ns	$T_{108}, (T_{108}-T_{120}), (T_{120}-T_{87}), (T_{87}-T_{97}), (T_{73}-T_{62}), h_{ВГО}, h_{ref}, dHcl, T_{пп}, Ta_{призем}, Ta_{ур.моря}, h_o, \varphi, faza, W_{max}$
Стадии развития Сб	Cb	без Сб, небольшие Сб, максимальное развитие Сб, начало распада Сб	$cltyp, W_{max}, Ta_{ур.моря}, h_o, (T_{108}-T_{120}), (T_{39}-T_{108}), (T_{87}-T_{97}), (T_{73}-T_{62})$
Высота НГО над поверхностью земли (км)	$h_{НГО}$	<0,5, 0,5-1, 1-1,5, 1,5-2, 2-2,5, 2,5-3, 3-3,5, 3,5-4, 4-4,5, 4,5-5, 5-5,5, 5,5-6, 6-6,5, 6,5-7, >7	$cltyp, T_{108}, (T_{108}-T_{120}), W_{max}, h_{ВГО}, h_{ref}, dHcl, T_{пп}, Ta_{призем}, Ta_{ур.моря}$
Толщина облачного слоя (км)	dH	точные значения или градации	$cltyp, h_{ВГО}, h_{ref}, dHcl, h_{НГО}$
Водозапас (кг/м ²)	SW	точные значения или градации	$W_{max}, dHcl$
Град	hail	без града, град в облаках/слабый, умеренный, сильный град	$faza, cltyp, W_{max}, SW, h_{ВГО}, h_{ref}, h_o, \varphi, Ta_{ур.моря}, T_{108}, (T_{108}-T_{120}), (T_{39}-T_{108}), (T_{87}-T_{97}), (T_{73}-T_{62}), datd$
Гроза	thund	без грозы, слабая, умеренная, сильная гроза	$faza, cltyp, W_{max}, SW, h_{ВГО}, h_{ref}, h_o, \varphi, Ta_{ур.моря}, T_{108}, (T_{87}-T_{97}), (T_{73}-T_{62}), datd$
Максимальная мгновенная интенсивность осадков (мм/ч)	I_{max}	0, <0,5, 0,5-1, 1-2, 2-3, 3-5, 5-7,5, 7,5-10, 10-15, 15-25, 25-35, 35-50, 50-75, 75-100, >100	$faza, cltyp, W_{max}, SW, h_{ВГО}, h_{ref}, h_o, \varphi, Ta_{ур.моря}, datd, T_{ВГО}, T_{пп}, Ta_{призем}, dHcl, h_{НГО}$
Средняя за 15 мин интенсивность осадков (мм)	I_{cp15}	0, 0-0,5, 0,5-1, 1-2, 2-3, 3-4, 4-6, 6-9, 9-12,5, >12,5	I_{max}

Тип осадков у поверхности земли	prtyp	без осадков, слаб., умерен. и сильн. снег, слаб./умер. и умер./сильн. мокрый снег/снег+дождь, слаб./умер. и умер./сильн. ледяной дождь, морось, слаб., умерен. и сильн. дождь, сильн. ливень, слаб./умер. и умер./сильн. снежная крупа, слаб./умер. и умер./сильн. град у земли	I_{max} , hail, $h_{ВГО}$, h_{ref} , $T_{пп}$, $T_{a_{призем}}$, $T_{ВГО}$, dHcl, $T_{a_{900}}$, $T_{a_{850}}$, $T_{a_{800}}$, $T_{a_{750}}$, $T_{a_{700}}$, $T_{a_{650}}$, $T_{a_{600}}$, $T_{a_{550}}$, $T_{a_{500}}$, $T_{a_{450}}$, $T_{a_{400}}$
Гололёд/гололедица на поверхности земли	slip	без гололёда, слабый, умеренный, сильный гололёд	prtyp, I_{max}
Обледенение	icing	без обледенения, слабое, умеренное, сильное обледенение	W_{max} , $T_{ВГО}$, dH, $h_{ВГО}$
Высота над уровнем моря (км) верхней и нижней границ слоя значимого обледенения	ВГ, НГ	точные значения или градации	icing, $p_{ур.моря}$, $T_{a_{ур.моря}}$, φ , h_{ref}
Оптическая плотность облачного слоя	COD	<5, 5-10, 10-15, 15-20, 20-25, 25-30, 30-35, 35-40, 40-45, 45-50, 50-55, 55-60, 60-65-, 65-70, 70-75, >75	T_{108} , W_{max} , I_{max} , cltyp, $T_{a_{ур.моря}}$, $T_{пп}$, $T_{a_{призем}}$
Оптическая толщина облачного слоя	COT	точные значения или градации	COD, dHcl
Эффективный радиус облачных частиц (мкм)	R_{eff}	<2,5, 2,5-5, 5-7,5, 7,5-10, 10-12,5, 12,5-15, 15-17,5, 17,5-20, 20-22,5, 22,5-25, 25-27,5, 27,5-30, 30-32,5, 32,5-35, 35-37,5 >37,5	I_{max} , prtyp, faza, COD, $h_{НГО}$
Суточные суммы осадков (мм)	$\Sigma I_{сут}$	точные значения или градации	I_{max} , datd
Месячные суммы осадков (мм)	$\Sigma I_{мес}$	точные значения или градации	$\Sigma I_{сут}$
Годовые суммы осадков (мм)	$\Sigma I_{год}$	точные значения или градации	$\Sigma I_{год}$
Индекс вегетации	NDVI	точные значения или градации	A_{06} , A_{09}
Степень проективного покрытия растительностью	b	точные значения или градации	NDVI
Излучательная способность подстилающей поверхности	e	точные значения или градации	NDVI или b
Листовой индекс	LAI	точные значения или градации	NDVI

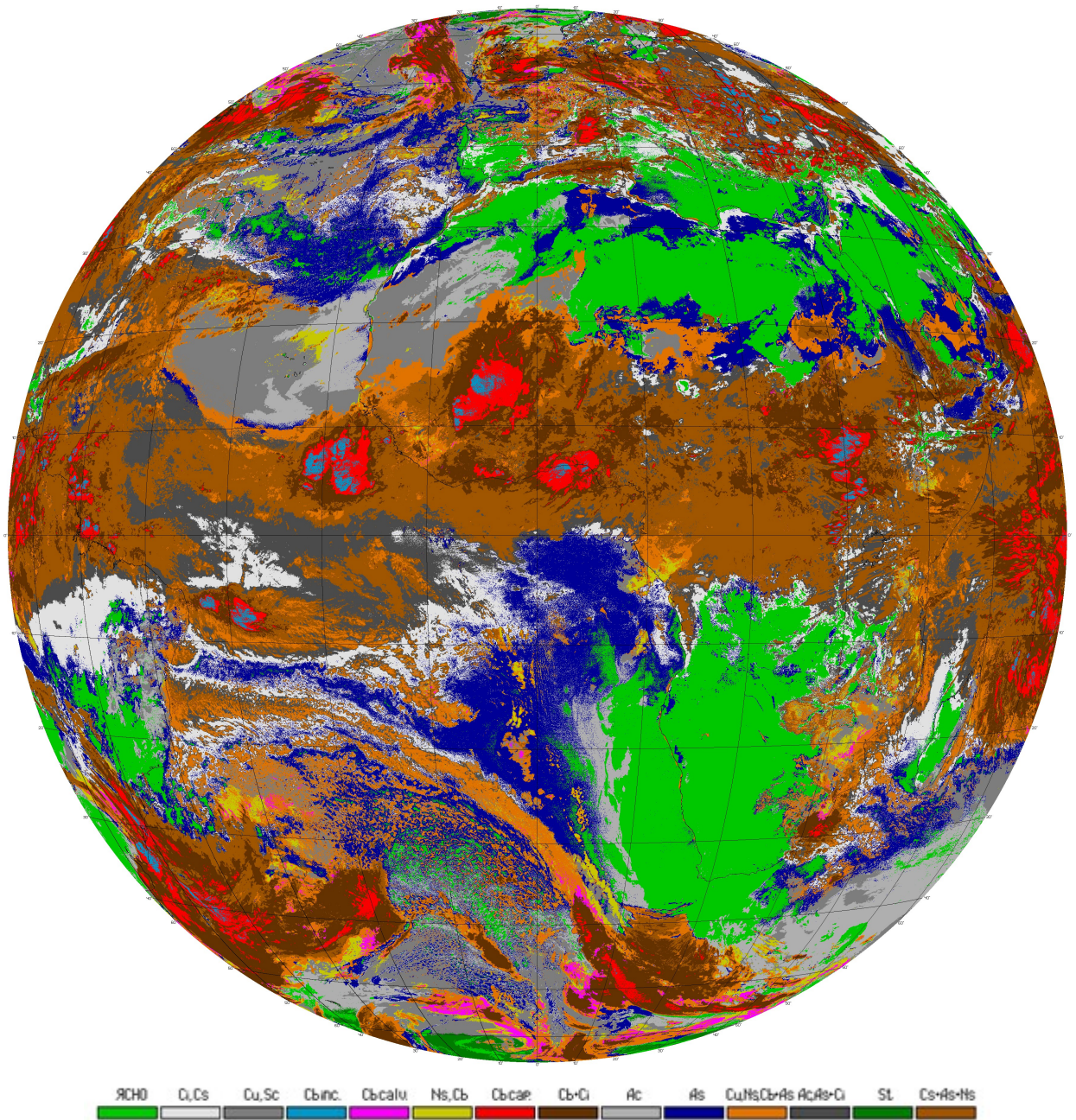


Рис. 3. Классификация облачности по типам (облачный анализ ВМО) (SEVIRI/Meteosat-11, 18.06.2020, 11:45 ВСВ)

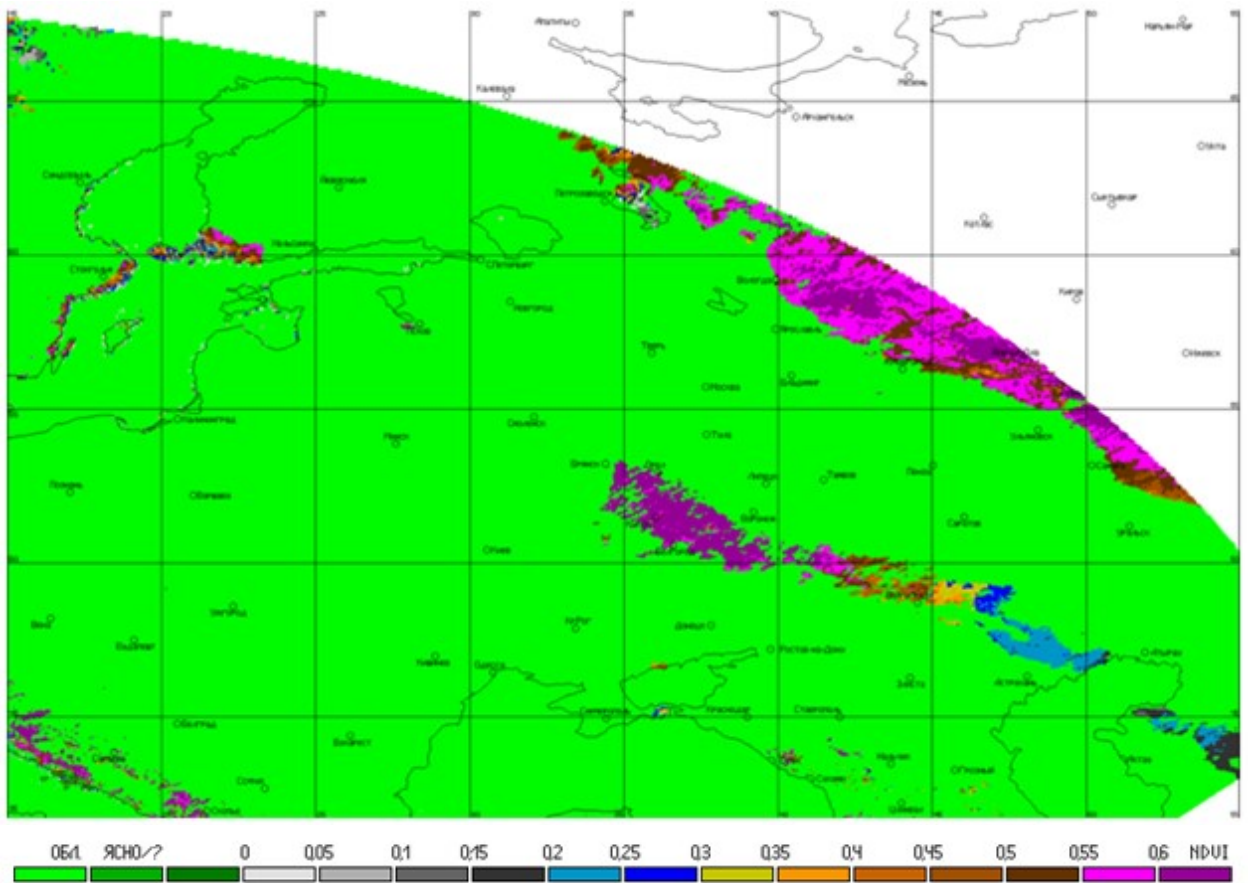


Рис. 4. Индекс вегетации (NDVI), монтаж для светлого времени суток (SEVIRI/Meteosat-11, 18.06.2020)

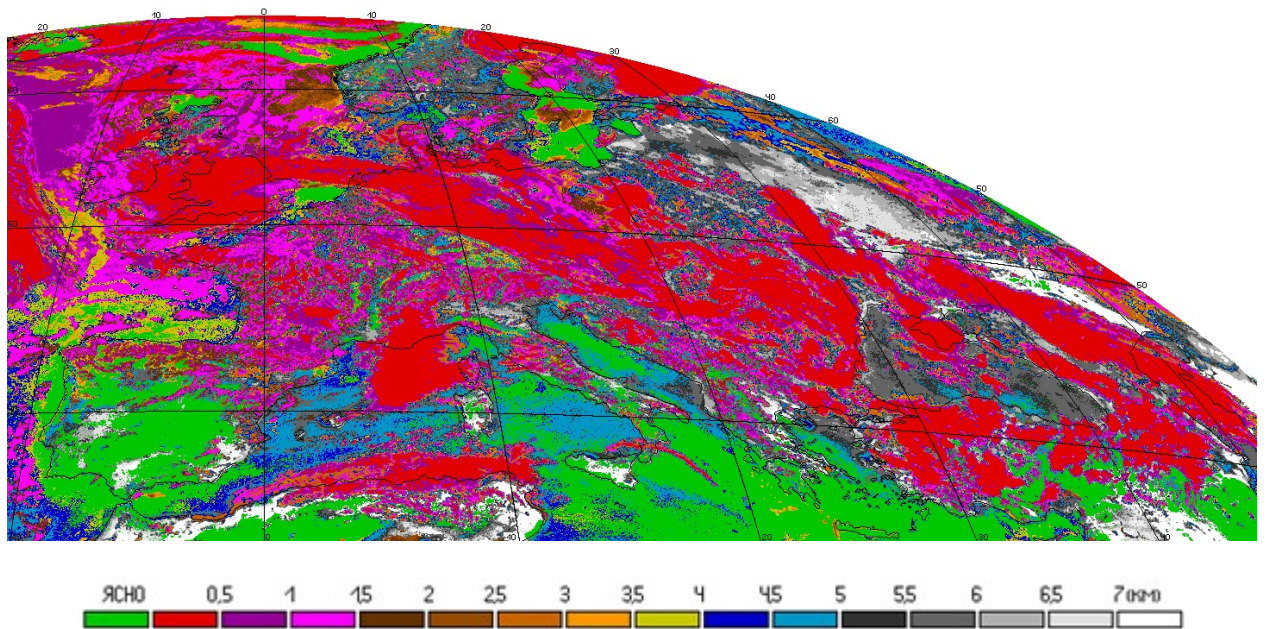


Рис. 5. Высота нижней границы облачности над поверхностью земли (SEVIRI/Meteosat-11, 18.06.2020, 11:45 ВСУ)

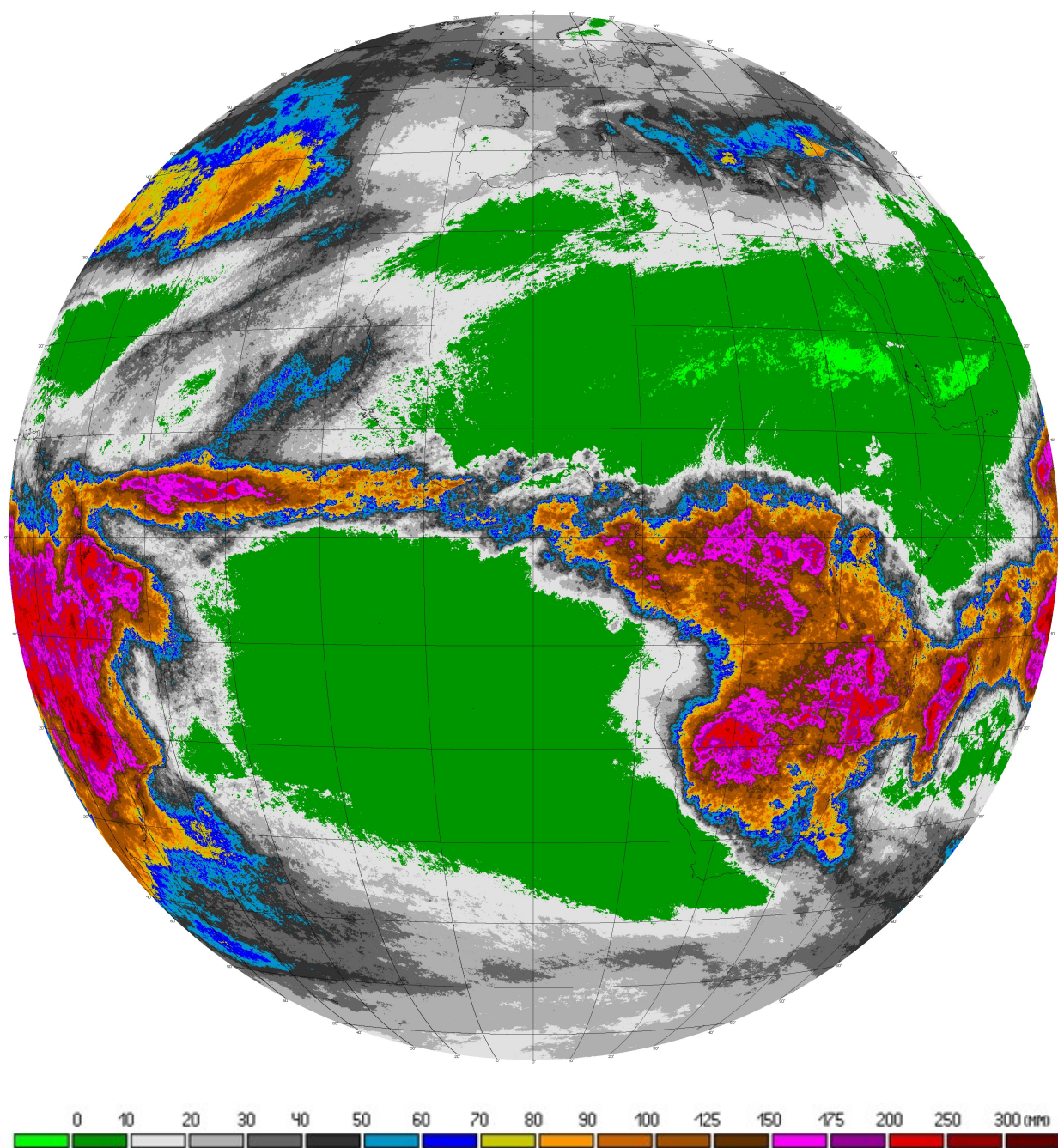


Рис. 6. Месячные суммы осадков (SEVIRI/Meteosat-11, январь 2021 г.)

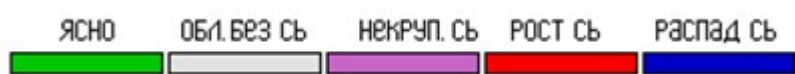
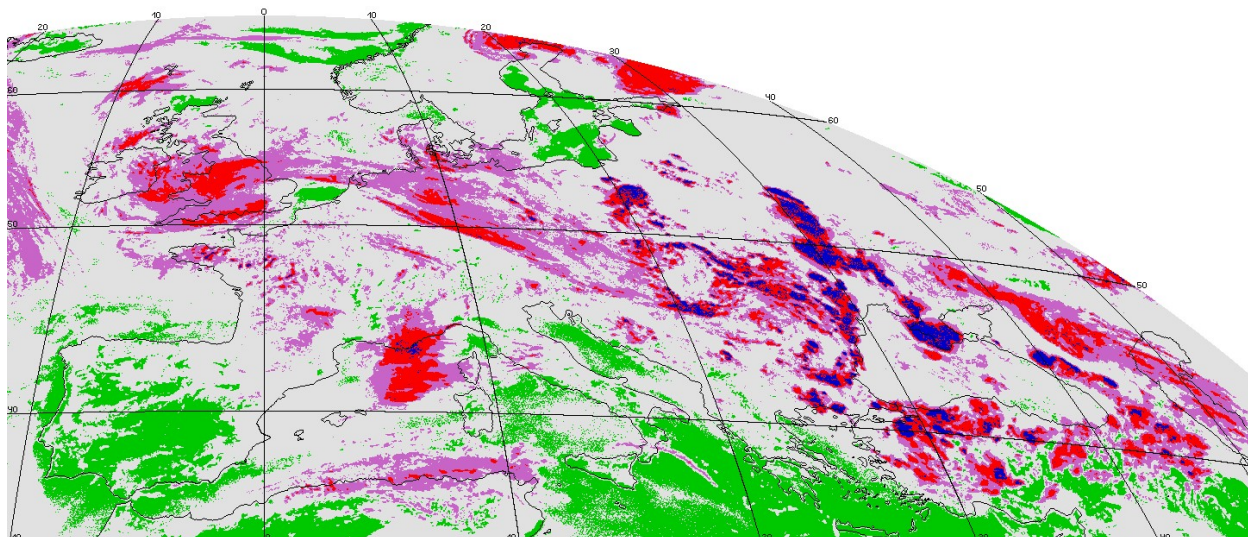


Рис. 7. Стадии развития (степень опасности) Сб
(SEVIRI/Meteosat-11, 18.06.2020, 11:45 ВСВ)

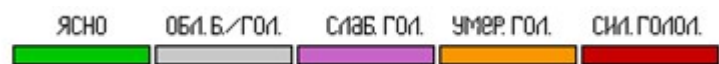
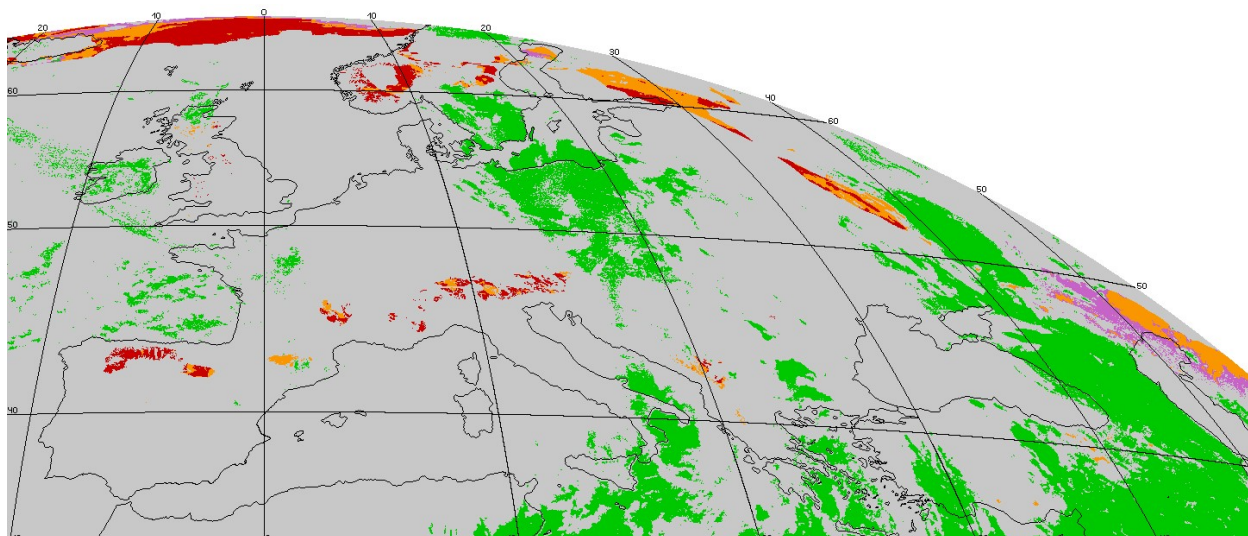


Рис. 8. Голлёд/голледица (SEVIRI/Meteosat-11, 20.12.2019, 11:45 ВСВ)

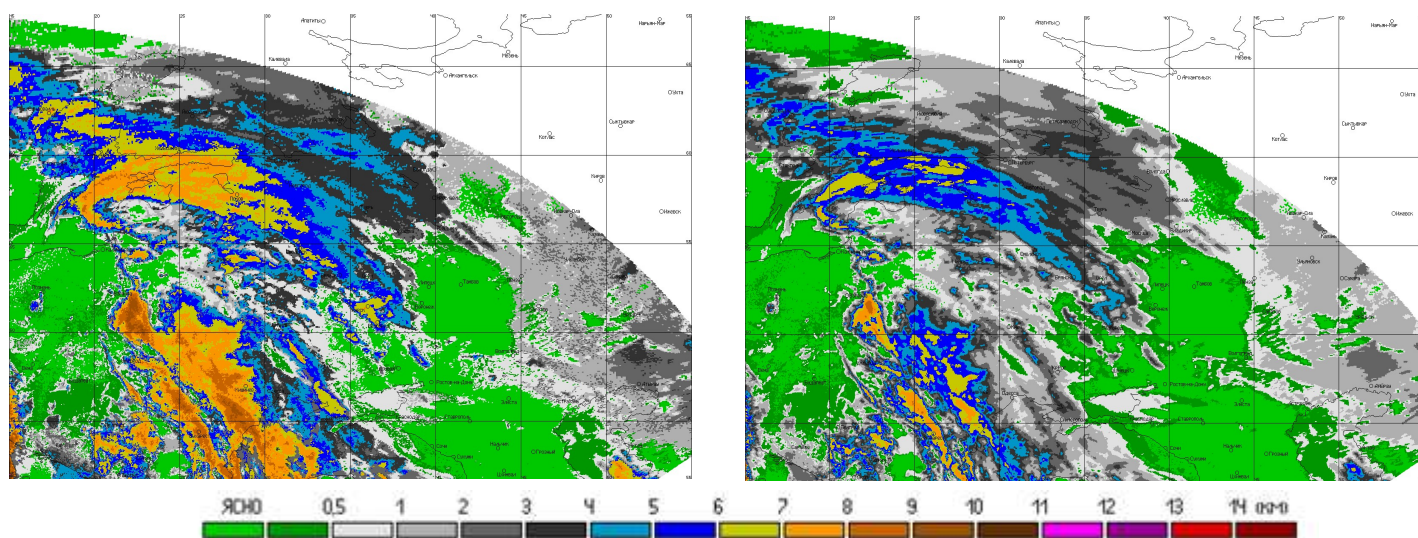


Рис. 9. Общая (слева) и реальная (справа) толщины облачного слоя (SEVIRI/Meteosat-11, 20.12.2019, 11:45 ВСВ). Примечание. Общая толщина – это разница между основанием облака и высотой ВГО, реальная толщина – это общая толщина без безоблачных прослоек

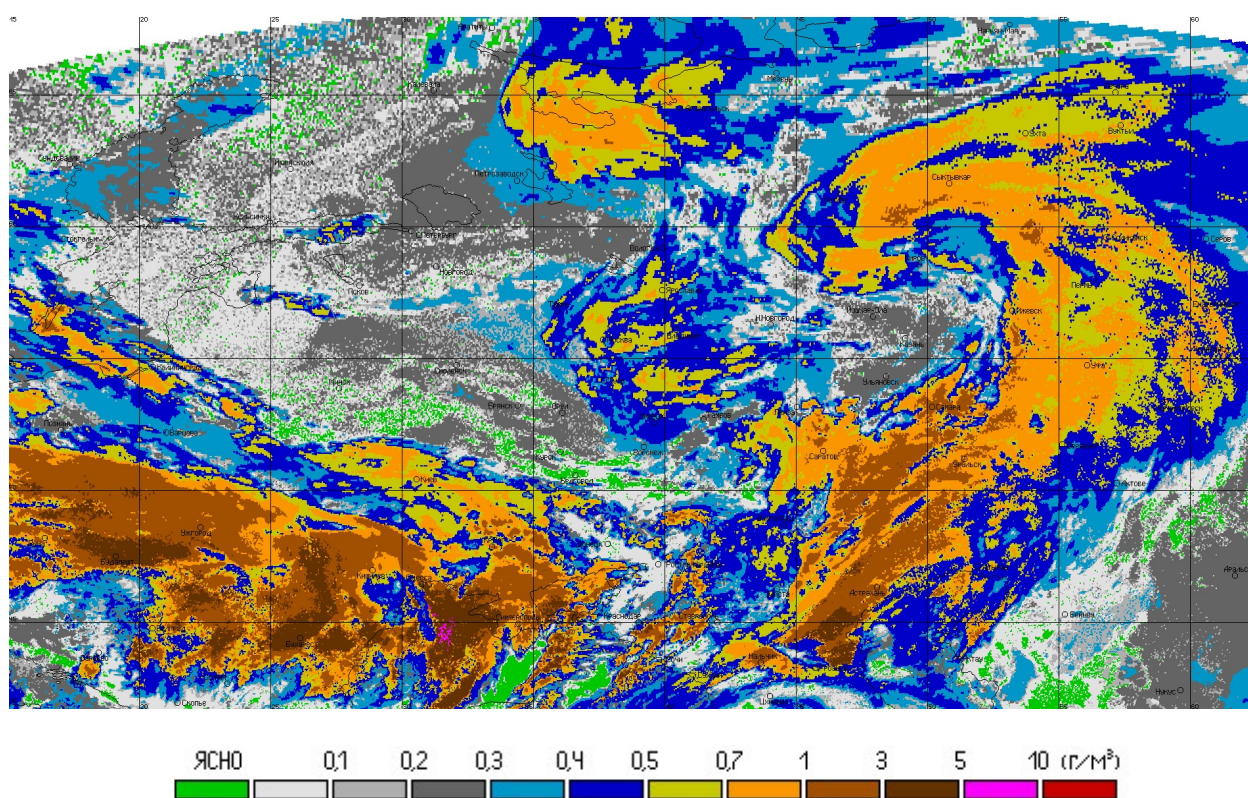


Рис. 10. Максимальная влажность облачного слоя (SEVIRI/Meteosat-8, 3.02.2020, 11:45 ВСВ)

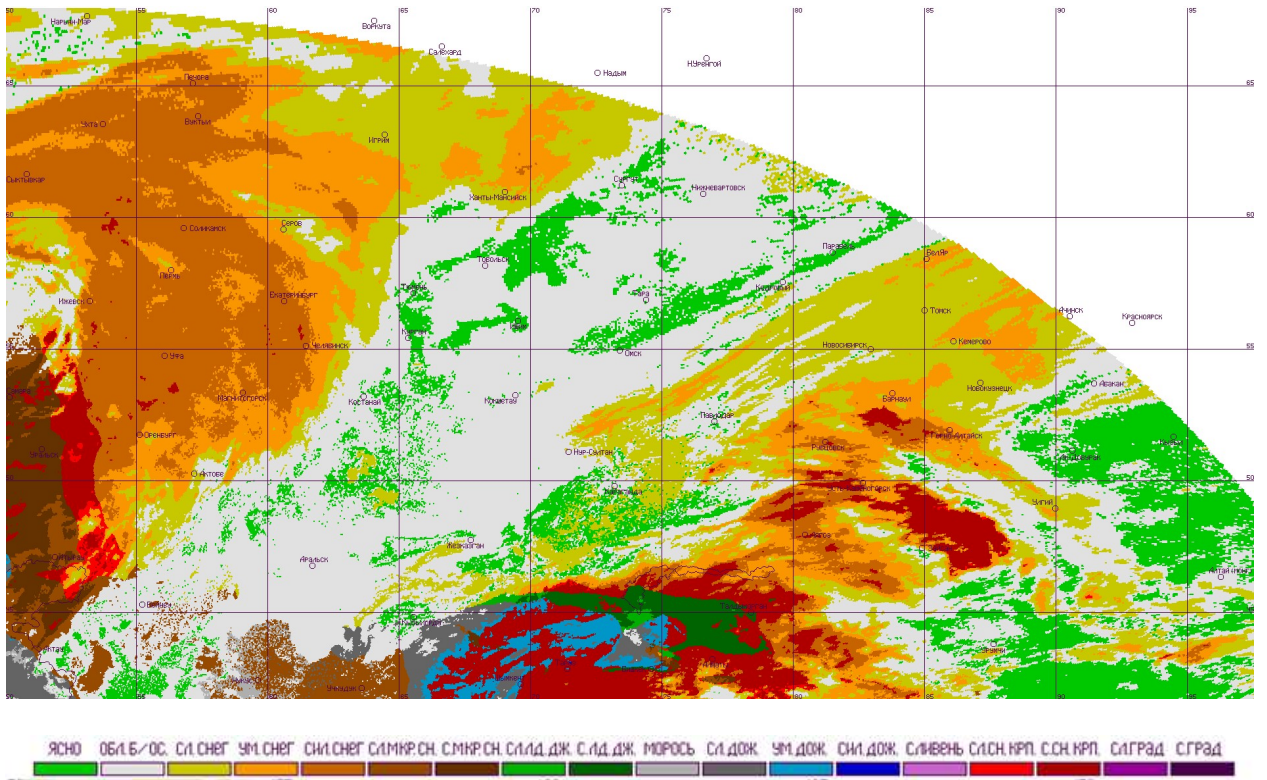


Рис. 11. Тип осадков у поверхности земли (SEVIRI/Meteosat-8, 3.02.2020, 11:45 ВСВ)

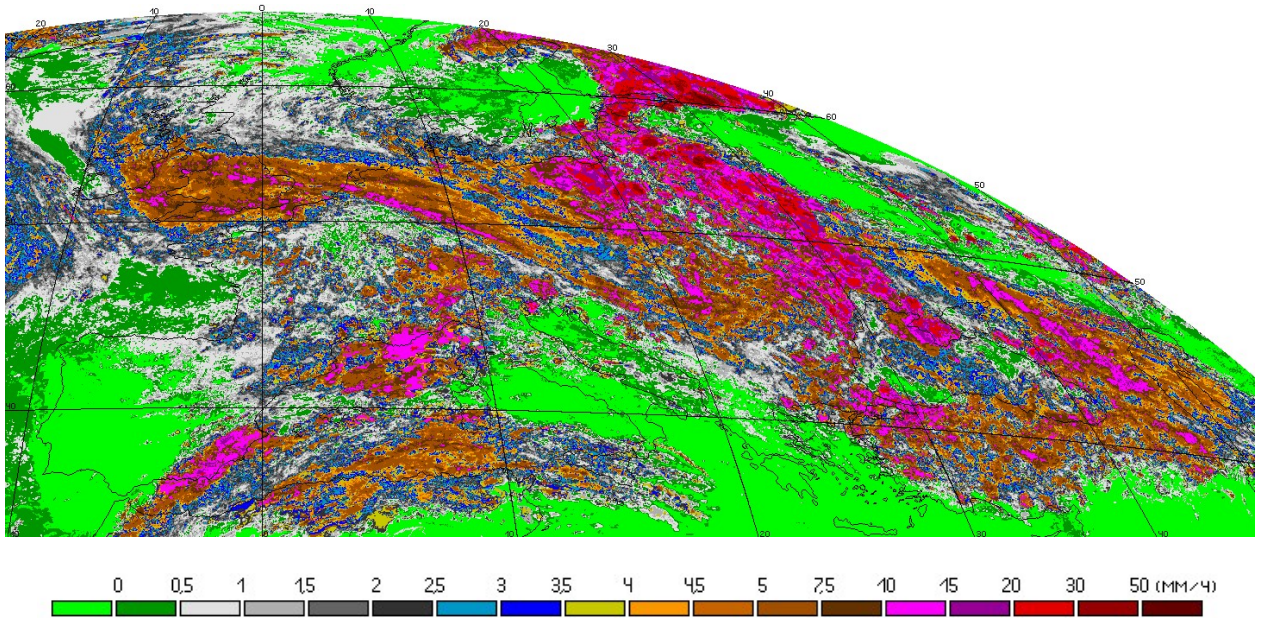


Рис. 12. Средняя за сутки интенсивность осадков (только во время их выпадения) (SEVIRI/Meteosat-11, 18.06.2020)