

Оперативный мониторинг параметров облачного покрова, осадков и опасных явлений погоды по данным МСУ-ГС-ВЭ КА Арктика-М

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

Оперативная спутниковая информация об облачности, осадках и опасных явлениях погоды необходима во многих сферах человеческой деятельности, особенно в районах с редкой наземной наблюдательной сетью. Информация с геостационарных спутников имеет высокую периодичность (15 мин), однако ограничена низкими широтами (менее $\sim 70^\circ$ широты, т.е. без приполярных областей). Особенную актуальность в последнее время приобретает ещё и «импортозамещение», т.е. использование данных с российских спутников.

В феврале 2021 г. был запущен российский высокоэллиптический гидрометеорологический КА «Арктика-М» №1. Его высота в апогее составляет ~ 40000 км, в перигее – ~ 1000 км. Наклонение орбиты $\sim 63^\circ$, период обращения 12 ч (из них время наблюдения территории России в квазигеостационарном виде ~ 6 ч) [1]. В числе прочих на его борту установлен прибор МСУ-ГС-ВЭ (многозональное сканирующее устройство – геостационарное, модернизированное для высокоэллиптических орбит), позволяющее проводить съёмку в пределах своего круга обзора с периодичностью 15 мин в 10ти спектральных каналах с пространственным разрешением в надире ~ 4 км для «температурных» каналов (каналы 4-10, $\lambda = 3,75, 6,2, 8,0, 8,7, 9,7, 10,7$ и $11,9$ мкм) и ~ 1 км для «альбедных» каналов (каналы 1-3, $\lambda = 0,58, 0,73$ и $0,85$ мкм), т.е. по сути прибор МСУ-ГС-ВЭ заменяет собой прибор SEVIRI КА MSG для арктического региона. Два раза в сутки КА «Арктика-М» №1 «зависает» поочередно над территорией Европы и над Тихим океаном на ~ 6 ч каждый раз и позволяет проводить мониторинг облачности для всей территории России и Арктики, включая Северный полюс.

В ФГБУ «НИЦ «Планета» на основе автоматизированного программного комплекса (АПК) «SEVIRIncepFULLuniFRAG» [2, 3] был создан и внедрен в тестовую эксплуатацию АПК «ARKcloudclas» для оперативного круглосуточного мониторинга над территорией России и Арктикой макро- и микрофизических характеристик облачного покрова, зон осадков и опасных явлений погоды (ОЯП) по данным спутникового прибора МСУ-ГС-ВЭ КА «Арктика-М».

В основе АПК лежит оригинальная авторская Комплексная пороговая методика (КПМ) дешифрирования и классифицирования по косвенным признакам макро- и микрофизических параметров облачности, зон осадков и ОЯП по данным измерений радиационной температуры МСУ-ГС-ВЭ/Арктика-М в каналах 4-10 ($\lambda = 3,75$ (T_{38}), $6,35$ (T_{64}), $8,0$ (T_{80}), $8,7$ (T_{87}), $9,7$ (T_{97}), $10,7$ (T_{107}) и $11,85$ (T_{119}) мкм) прибора МСУ-ГС-ВЭ, в т.ч. их разности ($(T_{107}-T_{119})$, $(T_{38}-T_{107})$, $(T_{97}-T_{87})$, $(T_{64}-T_{80})$ и $(T_{80}-T_{107})$) (см. табл. 1). Дополнительно используются прогностические поля (NCEP GFS, сетка $0,5^\circ$, 4 раза в сутки) о вертикальном распределении температуры воздуха в атмосфере и атмосферном давлении на уровне моря, цифровая модель рельефа (gtoro30 (<http://eros.usgs.gov>)), а также параметры облачности и осадков, полученные на предыдущих этапах классификации. Пороговые значения предикторов

рассчитываются для каждого пиксела спутникового изображения как функции высоты места над уровнем моря, высоты солнца, приземной температуры воздуха и приведённой к уровню моря, угла спутникового визирования, географической широты и др. Оригинальные авторские пороговые решения получены эмпирическим путём с использованием климатической информации об облачности и осадках и учитывают климатические особенности облаков и метеоявлений для данного региона, а также сезонность, зональность и суточный ход значений. В КПМ соблюдается строгий порядок классификации (см. рис. 1), т.к. параметры облачности и осадков, полученные на начальных этапах классификации, используются в дальнейшем. Выделение классов/градаций происходит по нарастающей – от отсутствия явления к его максимальному значению. Тест считается пройденным, если выполнены все условия в нём.

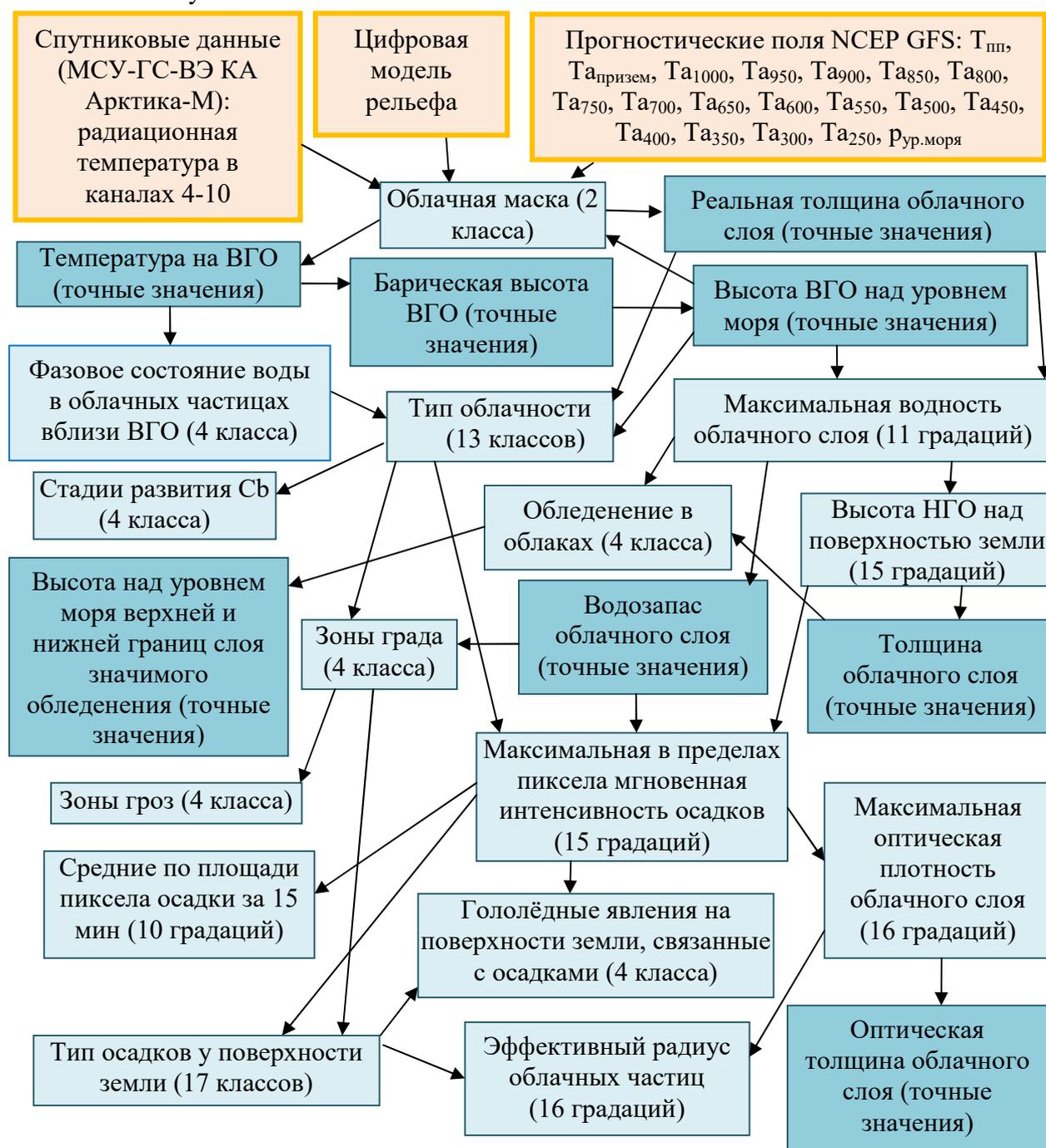


Рисунок 1. Технологическая схема работы КПМ для «срочных» спутниковых наблюдений

Для каждого срока спутникового наблюдения определяются: облачная маска, типы облачности, стадии развития кучево-дождевой облачности, максимальная водность и водозапас облачного слоя, температура верхней границы облачности (ВГО), высота ВГО над уровнем моря, барическая высота ВГО, высота нижней границы облачности над подстилающей поверхностью, фазовое состояние воды в облачных частицах вблизи ВГО, общая и реальная толщины облачного слоя, оптические плотность и толщина облачного слоя, эффективный радиус облачных частиц, максимальная в пределах пиксела мгновенная и средняя за 15 мин по площади пиксела интенсивности осадков, тип осадков у поверхности земли, зоны гроз, града, гололёдных явлений на поверхности земли и обледенения в облаках разной вероятности и интенсивности, высота над уровнем моря верхней и нижней границ слоя значимого обледенения.

Выходные продукты АПК по облачности, осадкам и ОЯП получают в оперативном режиме для каждого срока спутникового наблюдения в виде числовых матриц (в точных значениях или кодах классов/градаций) и соответствующих им растровых карт: для полного круга обзора с исходным разрешением или для территории России и Арктики в двух картографических проекциях: косой азимутальной ортографической (масштаб ~4 км) и нормальной цилиндрической равнопромежуточной (шаг 1,5' (0,025°)). Примеры некоторых выходных продуктов см. на рис. 2-9.

В процессе работы АПК «ARKcloudclas» для каждого срока спутникового наблюдения в автоматическом режиме:

- считывает необходимые ему для работы данные из соответствующих баз данных, включая спутниковую и прогностическую информацию, а также числовой рельеф и осуществляет их предварительную подготовку;

- для полного круга обзора прибора попиксельно по косвенным признакам дешифрирует и классифицирует пороговым методом (в т.ч. рассчитывает по стандартным и оригинальным авторским эмпирическим формулам) спутниковую информацию об облачности, осадках и ОЯП;

- переводит результаты классификации в две картографические проекции (косую азимутальную ортографическую (регион «Россия+СП» (Россия, включая северный полюс и сопредельные страны): ~37,5° с.ш. - ~90° с.ш. и ~10° з.д. - ~180° в.д., масштаб ~4 км) и нормальную цилиндрическую равнопромежуточную (регион «Россия»: 37,5-85° с.ш. и 15° в.д. - 165° з.д. с шагом 1,5' (0,025°) между пикселями) и записывает выходные продукты о параметрах облачного покрова, осадках и ОЯП для двух вариантов карт, а также в исходной проекции с исходным разрешением в файлы: числовые bin-матрицы и соответствующие им rsx-карты.

Для обеспечения оперативного получения потребителями информационных продуктов создано программное обеспечение (web-сервис), 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. Время обработки одного срока спутникового наблюдения, включая предварительную подготовку, классификацию и запись в файлы, не превышает 0,5 мин.

Выборочная визуальная валидация выходных продуктов АПК «ARKcloudclas» результатами аналогичной классификации АПК «SEVIRIncepFULLuni» по данным прибора SEVIRI KA Meteosat-11 и Meteosat-8 для территории России показала, что получаемые оценки параметров облачности, осадков и ОЯП по данным двух различных спутниковых

приборов (МСУ-ГС-ВЭ и SEVIRI) получают близкими друг к другу. Начата подготовка к проведению авторской валидации для одного полного года (2022 г.).

Литература

1. *Асмус В.В., Милехин О.Е., Крамарева Л.С., Хайлов М.Н., Ширшаков А.Е., Шумаков И.А.* Первая в мире высокоэллиптическая гидрометеорологическая космическая система «Арктика-М» // Метеорология и гидрология. 2021. № 12. С. 11-26.

2. *Волкова Е.В., Кухарский А.В.* 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 // Материалы 19й Международной конференции "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса". Электронный сборник материалов конференции. ИКИ РАН, Москва, 2021. С. 159. doi 10.21046/19DZZconf-2021a. ISBN 978-5-00015-008-5.

3. *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.

Таблица 1. Детектируемые КИМ по данным МСУ-ГС-ВЭ КА «Арктика-М» параметры облачного покрова, осадков и ОЯП, их классы/градации и необходимые для классификации предикторные характеристики (сохранён порядок классификации в КИМ)

Параметр (ед. измер.)	Обозначение	Классы/градации	Предикторы
Облачная маска	clmask	облачно, безоблачно	($T_{38}-T_{107}$), ($T_{80}-T_{107}$), ($T_{107}-T_{119}$), ($T_{64}-T_{80}$), T_{107} , h_{ref} , $T_{пп}$, h_o , $T_{a_{призем}}$, $T_{a_{ур.моря}}$
Температура ВГО (К, °С)	$T_{ВГО}$	точные значения	T_{107} , T_{119} , ($T_{107}-T_{119}$), ($T_{80}-T_{107}$), $T_{a_{ур.моря}}$
Барическая высота ВГО (гПа)	$ph_{ВГО}$	точные значения	$T_{ВГО}$, $p_{ур.моря}$, $T_{a_{max}}$, h_{ref} , φ
Высота ВГО над уровнем моря (м, км)	$h_{ВГО}$	точные значения	$ph_{ВГО}$, $p_{ур.моря}$, h_{ref} , φ , $T_{a_{max}}$
Реальная толщина облачного слоя (м, км)	dHcl	точные значения	T_{107} , $p_{ур.моря}$, h_{ref} , φ , $T_{a_{max}}$, $T_{пп}$, $T_{a_{призем}}$
Фазовое состояние воды в облачных частицах на ВГО	faza	кристаллические, водяные, смешанные: жидк.>крист., жидк.<крист.	($T_{38}-T_{107}$), h_o , $T_{ВГО}$, $T_{a_{max}}$, $T_{a_{ур.моря}}$
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	($T_{38}-T_{107}$), ($T_{80}-T_{107}$), ($T_{107}-T_{119}$), ($T_{64}-T_{80}$), T_{107} , h_o , $h_{ВГО}$, h_{ref} , dHcl, $T_{пп}$, $T_{a_{призем}}$, $T_{a_{ур.моря}}$, $T_{a_{850}}$, $T_{a_{700}}$, $T_{a_{550}}$, $T_{a_{450}}$, $T_{a_{350}}$, $T_{a_{300}}$, $T_{a_{250}}$
Тип облачности	cltyp	CiCs, CuSc, Cbinc, Cbcalv, NsCb, Cbcap, Cb+Ci, AcCu, As, CuNsCb+As, AcAs+Ci, St, Cs+As+Ns	($T_{38}-T_{107}$), ($T_{80}-T_{107}$), ($T_{107}-T_{119}$), ($T_{64}-T_{80}$), $h_{ВГО}$, h_{ref} , dHcl, $T_{a_{ур.моря}}$, h_o , faza
Стадии развития Сб	Cb	без Сб, небольшие Сб, максимальное развитие Сб, начало распада Сб	cltyp, ($T_{107}-T_{119}$), $T_{a_{ур.моря}}$, $h_{ВГО}$, h_{ref} , dHcl
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, ($T_{107}-T_{119}$), T_{107} , W_{max} , $h_{ВГО}$, h_{ref} , dHcl, $T_{пп}$, $T_{a_{призем}}$, $T_{a_{ур.моря}}$
Толщина облачного слоя (км)	dH	точные значения	cltyp, $h_{ВГО}$, h_{ref} , dHcl, $h_{НГО}$
Водозапас ($кг/м^2$)	SW	точные значения	W_{max} , dHcl
Град	hail	без града, град в облаках/слабый, умеренный, сильный град	faza, cltyp, W_{max} , SW, dHcl, $T_{ВГО}$, $T_{a_{ур.моря}}$, φ , ($T_{97}-T_{87}$), T_{107} , ($T_{64}-T_{80}$)
Гроза	thund	без грозы, слабая, умеренная, сильная гроза	W_{max} , SW, dHcl, φ , $T_{a_{ур.моря}}$, ($T_{97}-T_{87}$), T_{107} , ($T_{64}-T_{80}$)
Максимальная в пределах пиксела 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} , $h_{НГО}$, $T_{a_{ур.моря}}$, $T_{ВГО}$, $T_{пп}$, $T_{a_{призем}}$, dHcl

Средние по площади пиксела осадки за 15 мин (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_{a900} , T_{a850} , T_{a800} , T_{a750} , T_{a700} , T_{a650} , T_{a600} , T_{a550} , T_{a500} , T_{a450} , T_{a400}
Гололёд/гололедица на поверхности земли, связанные с выпадением осадков	slip	без гололёда, слабый, умеренный, сильный гололёд	prtyp, I_{max}
Обледенение	icing	без обледенения, слабое, умеренное, сильное обледенение	W_{max} , $T_{ВГО}$, dH , $h_{ВГО}$, $p_{ур.моря}$, $T_{a_{ур.моря}}$, φ , h_{ref}
Высота над уровнем моря (км) верхней и нижней границ слоя значимого обледенения	ВГ, НГ	точные значения	
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	W_{max} , I_{max} , cltyp, $T_{a_{ур.моря}}$, $dHcl$
Оптическая толщина облачного слоя	COT	точные значения	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	prtyp, faza, COD

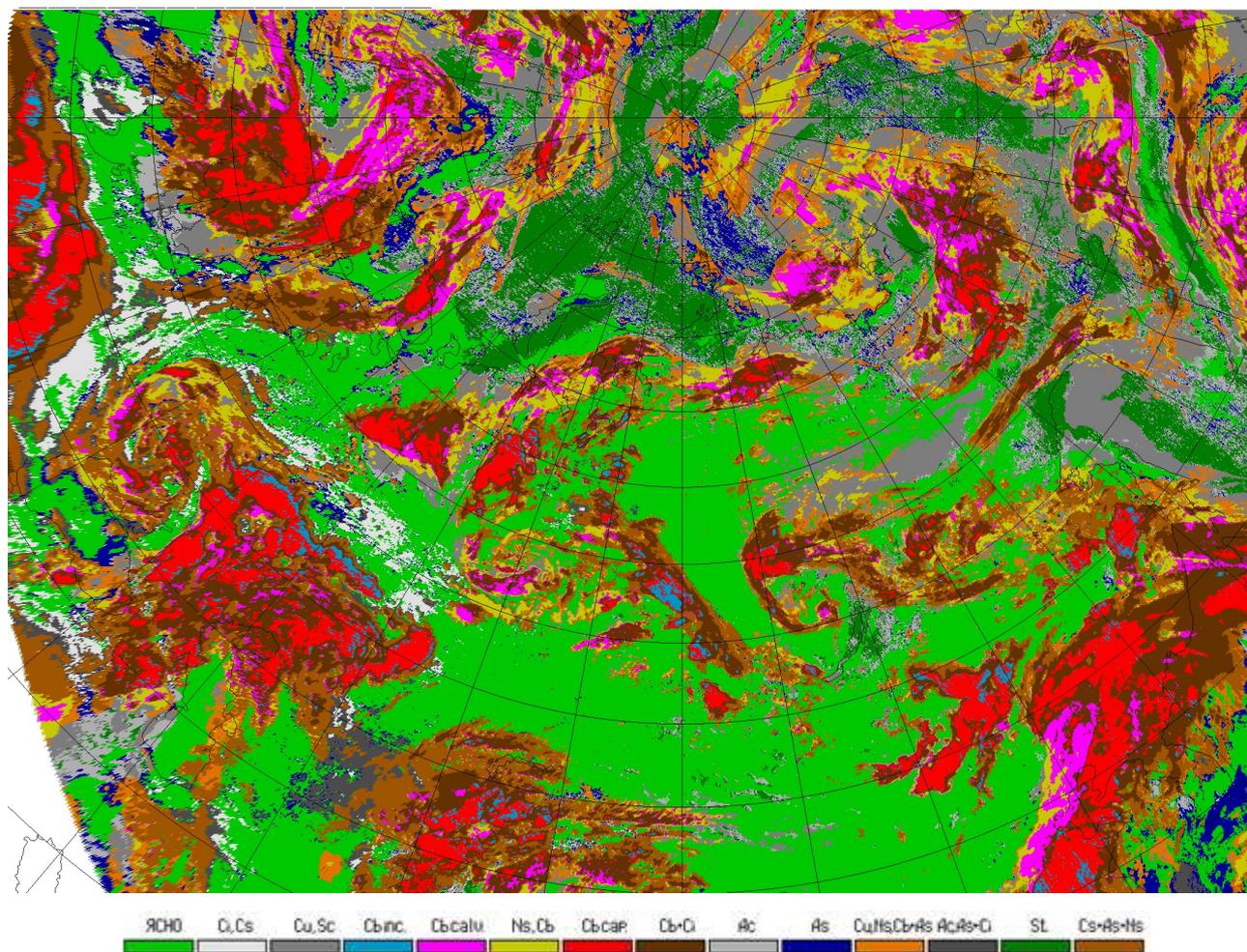


Рис. 2. Тип облачности (22.06.2022, 15:00 ВСВ)

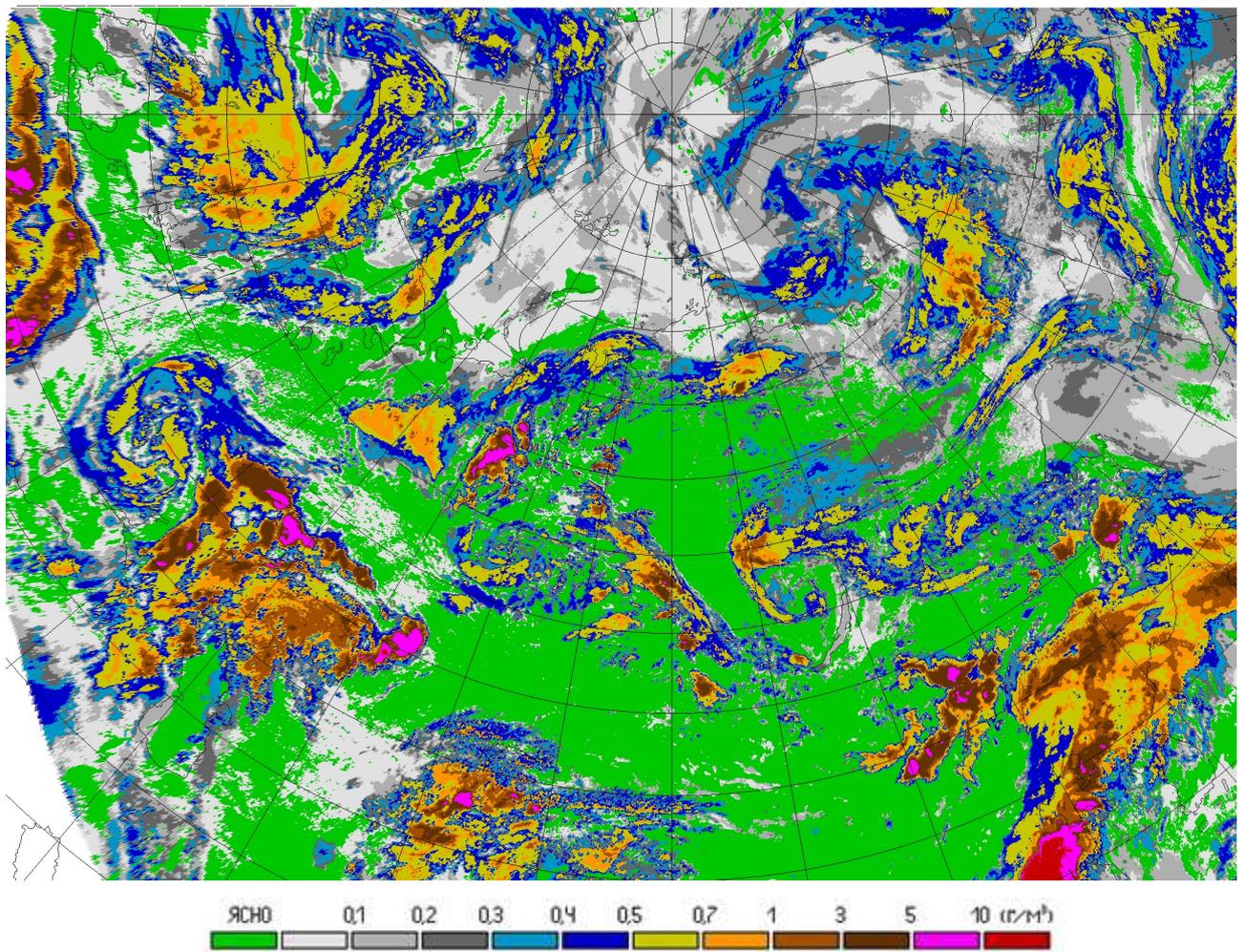


Рис. 3. Максимальная влажность облачного слоя (22.06.2022, 15:00 ВСВ)

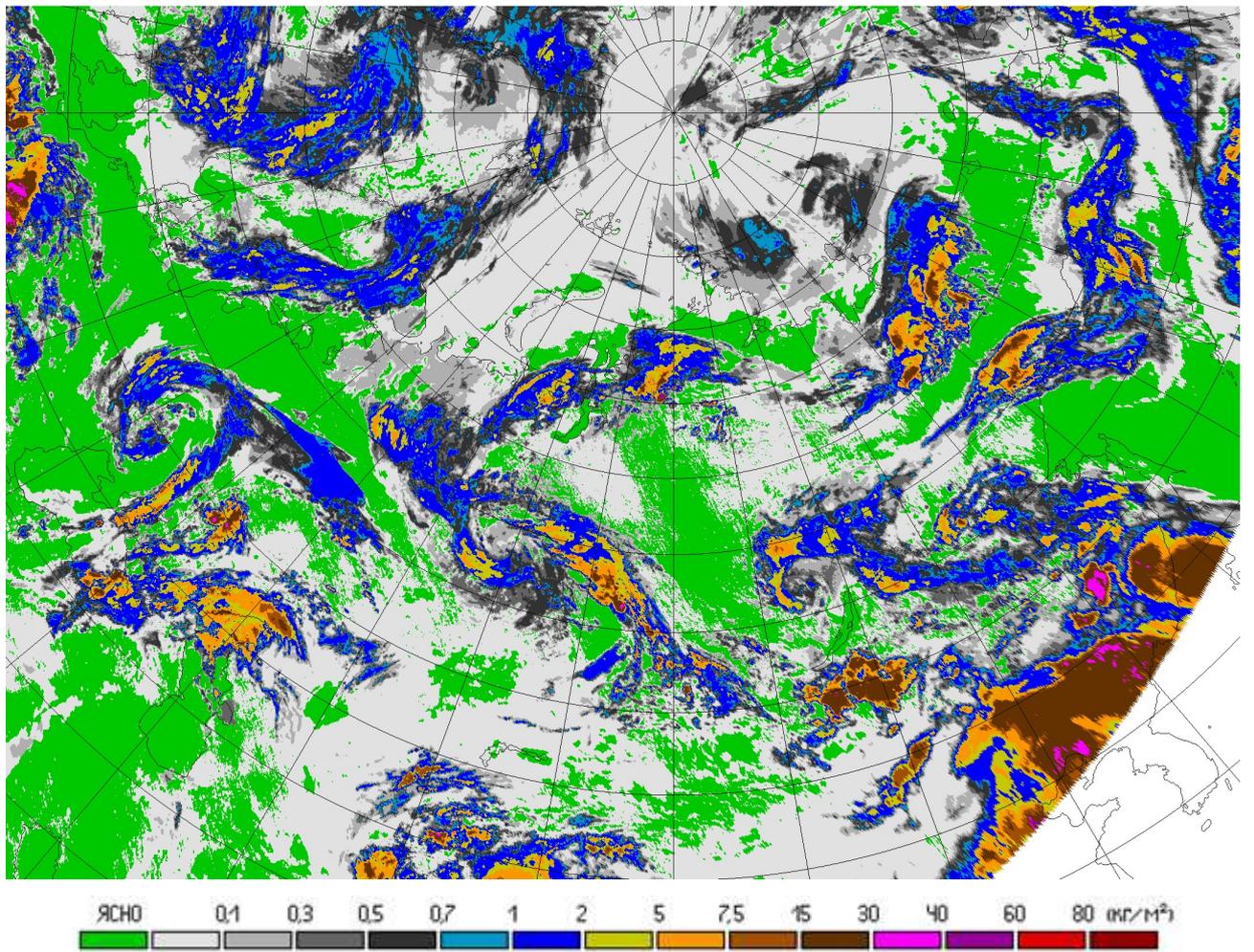


Рис. 4. Водозапас облачного слоя (22.06.2022, 6:00 ВСУ)

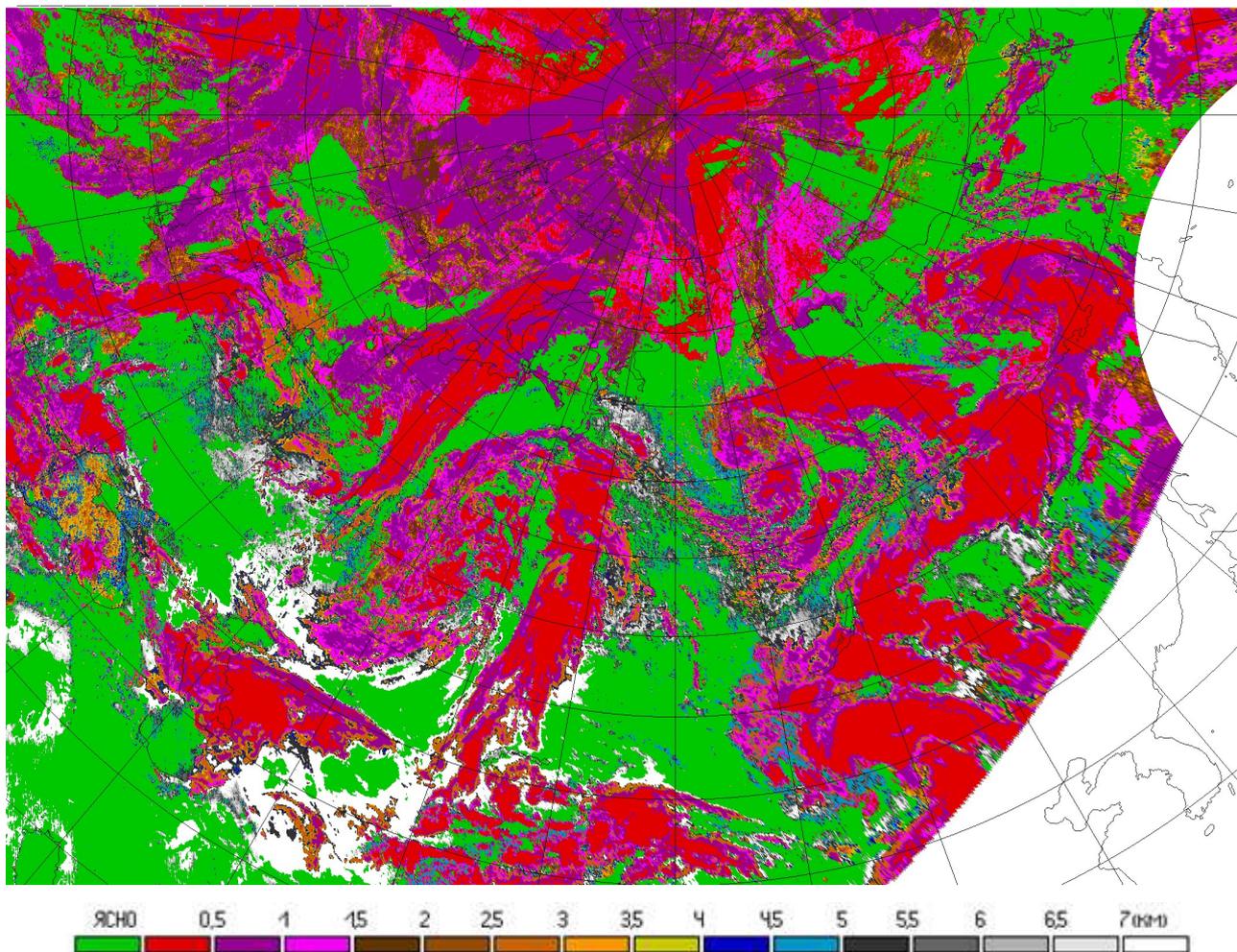


Рис. 5. Высота НГО над поверхностью земли (10.06.2022, 8:00 ВСВ)

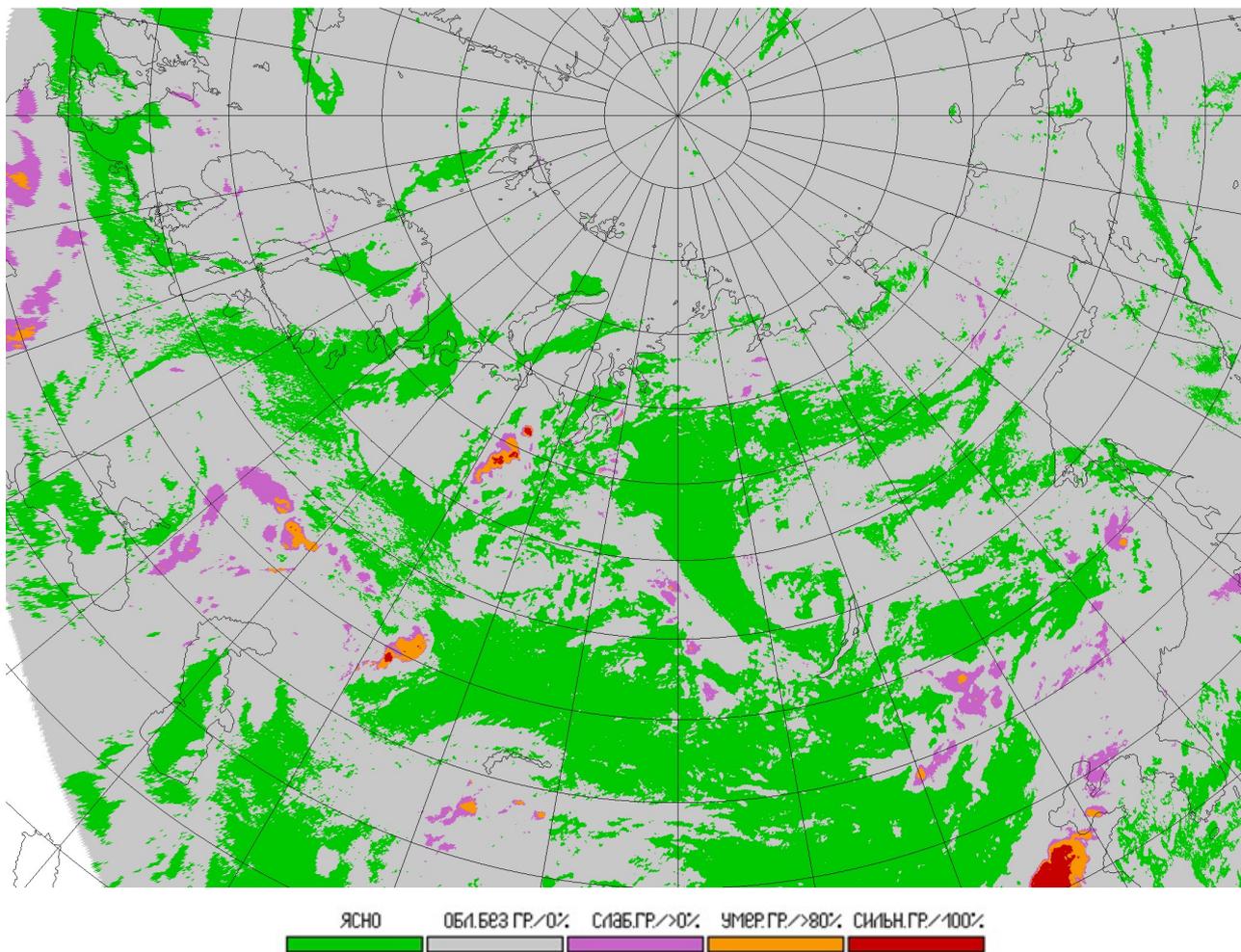


Рис. 6. Гроза (22.06.2022, 15:00 ВСВ)

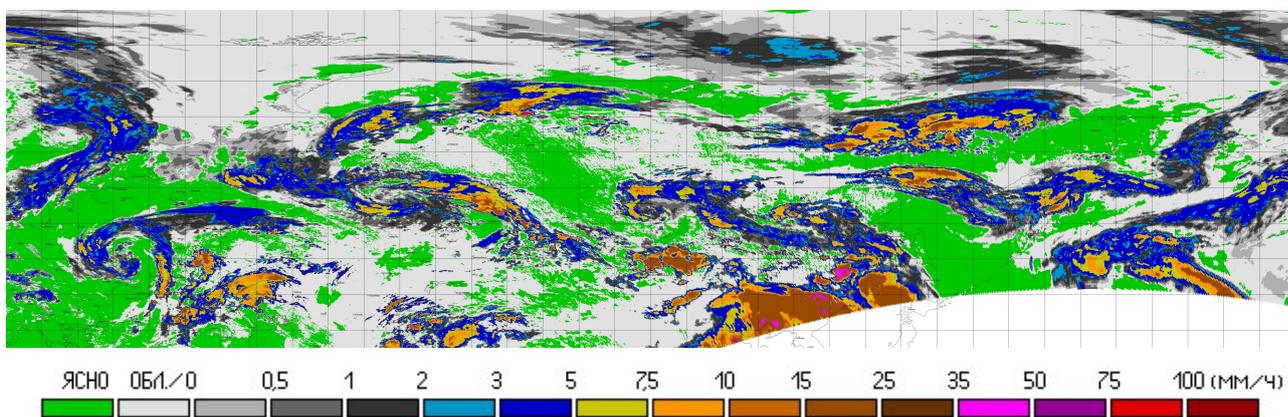


Рис. 7. Интенсивность осадков (22.06.2022, 6:00 ВСВ)

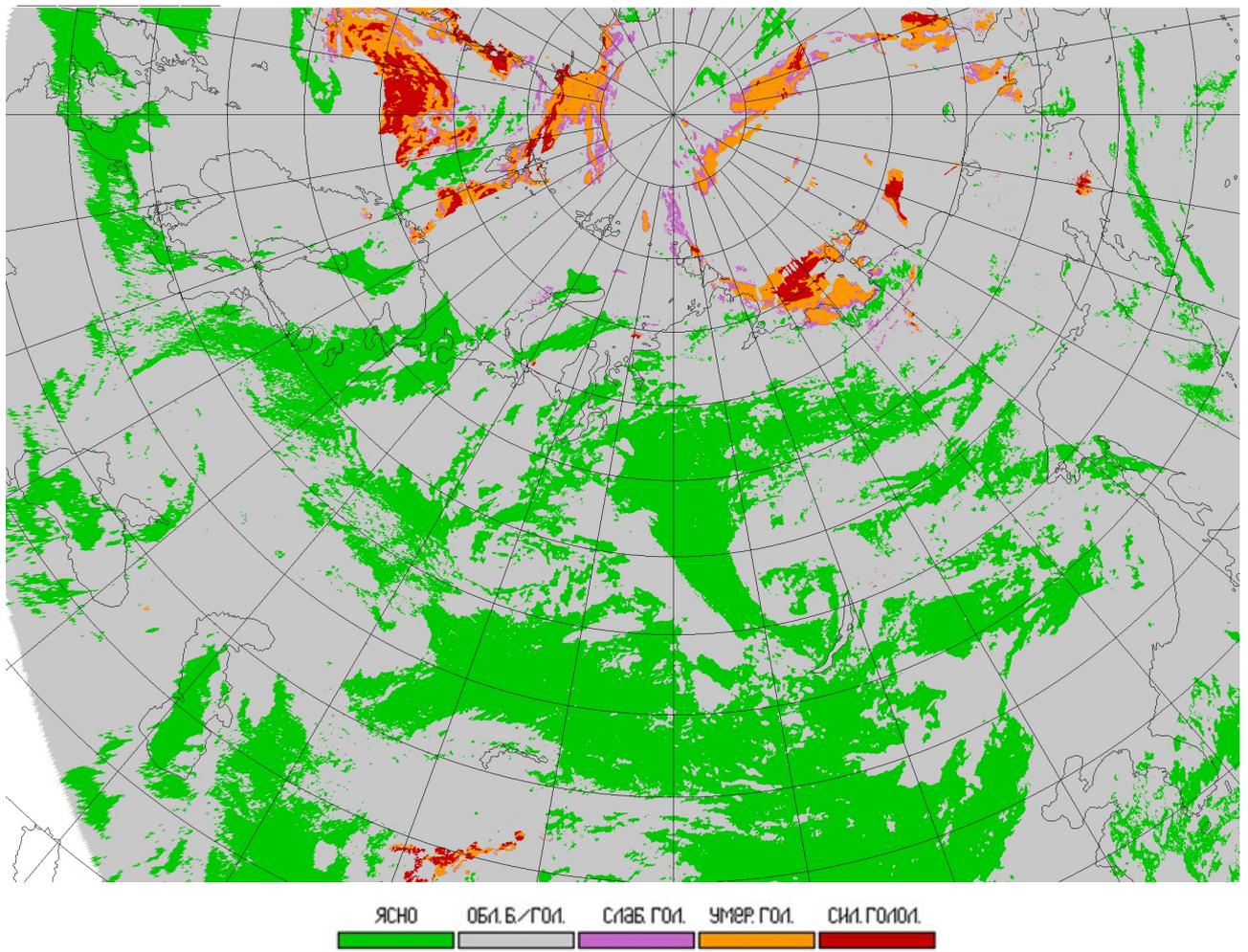


Рис. 9. Осадки, связанные с гололёдными явлениями (22.06.2022, 15:00 ВСВ)