

Оперативный мониторинг характеристик облачного покрова, осадков и опасных явлений погоды по данным МСУ-ГС КА Электро-Л №4

Волкова Е. В., Кухарский А. В.

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

Оперативная информация высокой периодичности с геостационарного российского космического аппарата (КА) Электро-Л №4 (точка стояния $165,8^\circ$ в.д.) позволяет наблюдать за облачностью, осадками и опасными явлениями погоды над регионом субглобального масштаба с очень редкой наземной наблюдательной сетью, однако очень важным с точки зрения судоходства, рыболовства, авиaperелётов и др. КА Электро-Л №4 был запущен в феврале 2023 г. На его борту установлен прибор МСУ-ГС (многозональное сканирующее устройство – геостационарное), позволяющий проводить съёмку с периодичностью 15 мин в 10ти спектральных каналах с пространственным разрешением в надире ~ 4 км для инфракрасного диапазона (каналы 4-10, $\lambda = 3,75, 6,2, 8,0, 8,7, 9,7, 10,7$ и $11,9$ мкм) и ~ 1 км для видимого диапазона (каналы 1-3, $\lambda = 0,58, 0,73$ и $0,85$ мкм).

В ФГБУ ЕЦ «НИЦ «Планета» на основе автоматизированного программного комплекса (АПК) «АРКТИКАнсер» [1] был создан и подготовлен к внедрению в оперативную эксплуатацию АПК «ELEKTRO4нсер» для круглосуточного мониторинга над акваторией Тихого океана, Австралией, российским Дальним Востоком и юго-восточной Азией (см. рис. 1) макро- и микрофизических характеристик облачного покрова, зон осадков и опасных явлений погоды (ОЯП) по данным МСУ-ГС КА Электро-Л №4 (угол спутникового визирования не более 8° , т.е. территория с радиусом $71,5^\circ$ вокруг точки стояния КА).

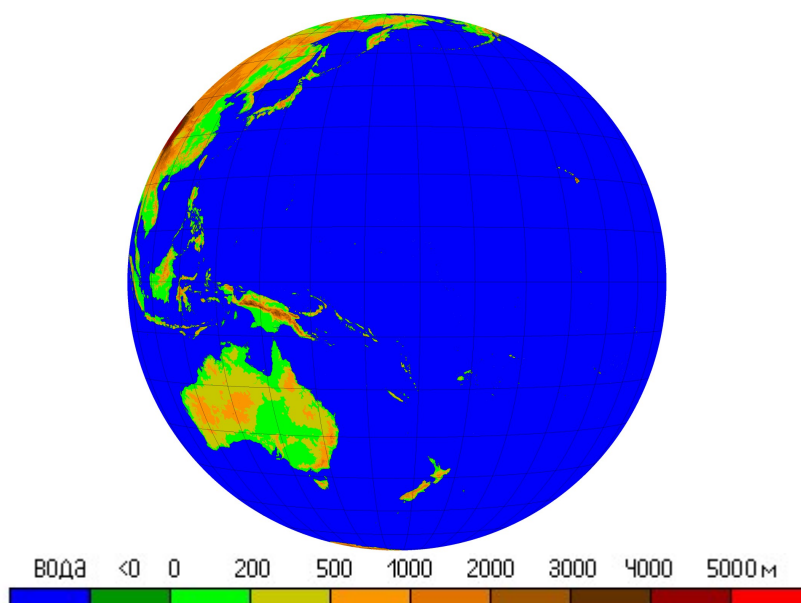


Рис. 1. Высота места (м) над уровнем моря для полного круга обзора с исходным разрешением спутникового изображения прибора МСУ-ГС/Электро-Л №4 (поперечная азимутальная проекция виртуального спутника).

Методическая основа АПК – 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 в каналах 4-10 МСУ-ГС (T_λ). Дополнительно используются прогностические поля (NCEP GFS, сетка $0,5^\circ$, сроки 0, 6, 12 и 18 ч UTC) о вертикальном распределении температуры воздуха в атмосфере (T_{ppp}) и атмосферном давлении на уровне моря ($p_{ур.м}$), цифровая модель рельефа (gtopo30 (<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 (h_{ref}), географической широты (ϕ), высоты солнца (h_o), температуры подстилающей поверхности ($T_{пп}$), приземного воздуха ($T_{призем}$), приведённой к уровню моря ($T_{ур.м}$), максимальной в атмосферном столбе (T_{max}) и др. Они получены эмпирическим путём и учитывают климатические особенности облачности и метеоявлений для рассматриваемой территории, а также сезонность, зональность и суточный ход значений их характеристик. В КПМ соблюдается строгий порядок классификации, так как параметры облачности и осадков, полученные на начальных этапах классификации, используются в дальнейшем (см. рис. 2 и табл. 1). Выделение классов/градаций происходит по нарастающей – от отсутствия явления к его максимальному значению. Тест считается пройденным, если выполнены все условия в нём. Изначально все пикселы считаются безоблачными – осуществляется поиск облачных пикселов. Частично занятые облачностью или осадками пикселы считаются соответствующе облачными или с осадками. Существует 2 варианта представления карт: безоблачные условия показаны зелёным или белым цветом.

Для каждого срока спутникового наблюдения дешифрируется: облачная маска, а затем облачность классифицируется по типам (ВМО и для авиации), максимальной влажности и водозапаса облачного слоя, температуре верхней границы облаков (ВГО), высоте ВГО над уровнем моря, барической высоте ВГО, высоте нижней границы облачности над подстилающей поверхностью, фазовому состоянию воды в облачных частицах вблизи ВГО, толщине облачного слоя, оптической плотности и толщине облачного слоя, эффективному радиусу облачных частиц, максимальной в пределах пиксела мгновенной и средней за 15 мин по площади пиксела интенсивности осадков, типу осадков у поверхности земли, зонам гроз, града, гололёдных явлений на поверхности земли и обледенения в облаках разной вероятности и интенсивности, высоте над уровнем моря верхней и нижней границ слоя значимого обледенения. Дополнительно строятся карты низкой облачности и её вероятности, стадий развития мощных кучево-дождевых облаков и фронтальной облачности с конвективными явлениями, а также сумм осадков, выпавших в среднем по пикселу между сроками спутниковых наблюдений. Также рассчитываются накопленные и средние за период времени (сутки, месяц и год) характеристики облачности, осадков и ОЯП.

Кроме того, выполняется автоматическая валидация «срочных» и «климатических» выходных продуктов по облачности, осадкам и ОЯП (ежедневно и ежемесячно) путём сравнения с результатами наземных наблюдений на метеостанциях и климатическими оценками; по результатам валидации автоматически формируется заключение о качестве выходных продуктов в среднем по территории и за период времени (сутки или месяц) (см. рис. 3).



Рисунок 2. Технологическая схема работы КИМ в составе АПК «ELEKTRO4nсер»

Таблица 1. Детектируемые КПМ по данным МСУ-ГС/Электро-Л №4 параметры облачного покрова, осадков, ОЯП и подстилающей поверхности, их классы/градации и необходимые для классификации предикторные характеристики

Параметр (ед. измер.)	Обозначение	Классы/градации	Предикторы
Облачная маска	clmask	облачно, безоблачно	($T_{38}-T_{107}$), ($T_{80}-T_{107}$), T_{107} ($T_{107}-T_{119}$), ($T_{64}-T_{80}$), h_{ref} , $T_{пп}$, h_o , $T_{a_{призем}}$, $T_{a_{ур.м}}$
Температура ВГО (К, °С)	$T_{ВГО}$	точные значения	T_{107} , ($T_{107}-T_{119}$), ($T_{80}-T_{107}$), T_{119} , $T_{a_{ур.м}}$
Барическая высота ВГО (гПа)	$ph_{ВГО}$	точные значения	$T_{ВГО}$, $p_{ур.м}$, $T_{a_{max}}$, h_{ref} , ϕ
Высота ВГО над уровнем моря (м, км)	$h_{ВГО}$	точные значения	$ph_{ВГО}$, $p_{ур.м}$, h_{ref} , ϕ , $T_{a_{max}}$
Реальная толщина облачного слоя (м, км)	dHcl	точные значения	T_{107} , $p_{ур.м}$, 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 , $T_{ВГО}$, $T_{a_{max}}$, $T_{a_{ур.м}}$
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} , ($T_{38}-T_{119}$), ($T_{64}-T_{80}$), h_o , $T_{пп}$, $h_{ВГО}$, dHcl, $T_{a_{ур.м}}$, $T_{a_{призем}}$, h_{ref} , $T_{a_{850}}$, $T_{a_{700}}$, $T_{a_{550}}$, $T_{a_{450}}$, $T_{a_{400}}$, $T_{a_{350}}$, $T_{a_{300}}$, $T_{a_{250}}$
Тип облачности ВМО	cltyp	CiCs, CuSc, Cbinc, Cbcalv, NsCb, Cbcar, Cb+Ci, AcCu, As, CuNsCb+As, AcAs+Ci, St, Cs+As+Ns	($T_{38}-T_{107}$), ($T_{80}-T_{107}$), $h_{ВГО}$, ($T_{107}-T_{119}$), ($T_{64}-T_{80}$), h_{ref} , dHcl, W_{max} , h_o , $T_{a_{ур.м}}$, faza
Стадии развития Cb	sCb	без Cb, небольшие Cb, максимальное развитие Cb, начало распада Cb	cltyp, ($T_{107}-T_{119}$), $T_{a_{ур.м}}$, $h_{ВГО}$, 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, ($T_{107}-T_{119}$), $T_{пп}$, T_{107} , W_{max} , $h_{ВГО}$, h_{ref} , dHcl, $T_{a_{призем}}$, $T_{a_{ур.м}}$
Вероятность низкой облачности	P _{low}	P~0%, P<50%, P≥50%, Cb(P<50%), Cb(P≥50%), St(<50%), St(P≥50%)	cltyp, sCb, $h_{НГО}$
Низкая облачность	low	$h_{НГО}>1$ км, $h_{НГО}\leq 1$ км, Cb($h_{НГО}\leq 500$ м), St($h_{НГО}\leq 500$ м)	cltyp, sCb, $h_{НГО}$
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} , $T_{a_{ур.м}}$, SW, dHcl, ϕ , $T_{ВГО}$, T_{107} , ($T_{97}-T_{87}$), ($T_{64}-T_{80}$)
Гроза	thund	без грозы, слабая, умеренная, сильная гроза	W_{max} , SW, dHcl, T_{107} , $T_{a_{ур.м}}$, ϕ , ($T_{97}-T_{87}$), ($T_{64}-T_{80}$)
Максимальная в пределах пиксела мгновенная интенсив- ность 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} , $h_{НГО}$, $T_{a_{ур.м}}$, $T_{ВГО}$, $T_{пп}$, $T_{a_{призем}}$, dHcl
Тип облачности для авиации	cltypa	St, CiCs, тонк.+Ci, AsAs+, Ac, CuSc, Ns, NsSc+As, Ns+As+Cs, Cu2Cbcalv, Cb+Ci, Cbcar, Cbinc	cltyp, I_{max}

Среднее по площади пиксела за $\pm 7,5$ мин количество выпавших 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}
Средняя по площади пиксела интенсивность осадков (мм/ч)	I_{cp}	0, <0,5, 0,5-1, 1-2, 2-3, 3-4, 4-5, 5-7,5, 7,5-10, 10-15, 15-20, 20-35, 35-50, >50	I_{max}
Фронтальная и внутримассовая облачность с конвективными явлениями	front	облачно, многослойная/Cb, $I > 1$ мм/ч, $I > 5$ мм/ч, $I > 10$ мм/ч, $I > 25$ мм/ч, $I > 50$ мм/ч	cltyp, I_{max} , hail, thund
Тип осадков у поверхности земли	prtyp	без осадков, сл., ум. и сил. снег, сл./ум. и ум./сил. мокр. снег, сл./ум. и ум./сил. лед./замерз. дождь, морось, сл., ум. и сил. дождь, сил. ливень, сл./ум. и ум./сил. снеж. крупа, сл./ум. и ум./сил. град у земли	I_{max} , hail, h_{BFO} , h_{ref} , $T_{пп}$, $T_{a_{призем}}$, T_{BFO} , 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, связанные с выпадением осадков	slip	без гололёда, слабый, умеренный, сильный гололёд	prtyp, I_{max}
Обледенение в облаках	icing	без обледенения, слабое, умеренное, сильное обледенение	
Высота над уровнем моря (км) верхней и нижней границ слоя обледенения каждой интенсивности	BГ, НГ	точные значения	W_{max} , T_{BFO} , dH, h_{BFO} , $p_{ур.м.}$, $T_{a_{ур.м.}}$, φ , h_{ref}
Максимальная 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_{107} , T_{BFO} , $T_{a_{ур.м.}}$, 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
Суточные суммы осадков (мм)	$\Sigma I_{сут}$	точные значения или градации	I_{max} , datd
Месячные суммы осадков (мм)	$\Sigma I_{мес}$	точные значения	$\Sigma I_{сут}$
Годовые суммы осадков (мм)	$\Sigma I_{год}$	точные значения	$\Sigma I_{мес}$
Покрывание пиксела облачностью (%)	CFC	точные значения	clmask

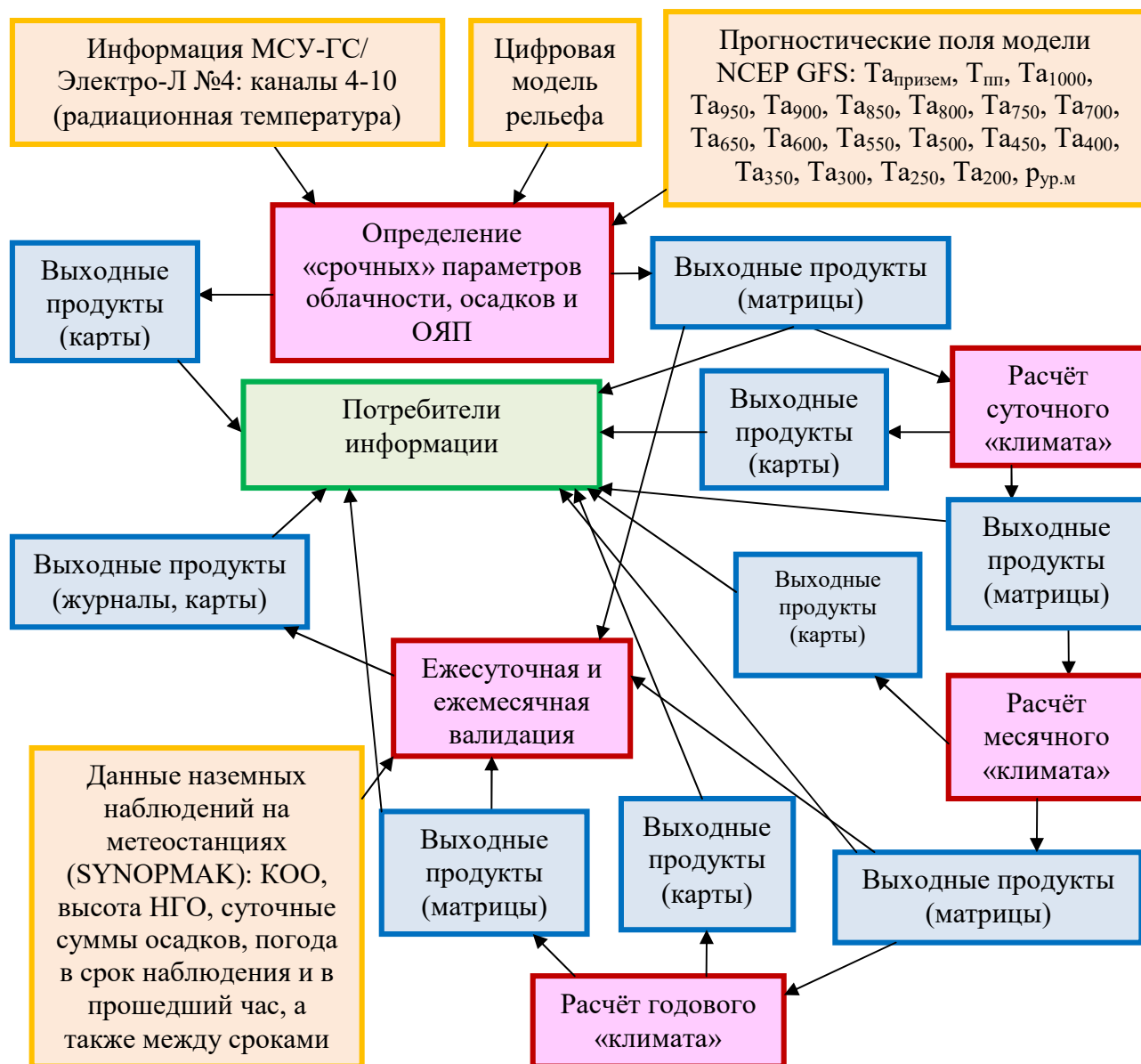


Рисунок 3. Технологическая схема работы АПК «ELEKTRO4ncер»

При расчёте суточных сумм осадков по серии спутниковых наблюдений вычисляется средняя за сутки интенсивность осадков (включая случаи без осадков (т.е. $I \geq 0$ мм/ч)), а затем умножается на коэффициент-константу. Месячные и годовые суммы осадков получаются простым суммированием соответственно суточных и месячных сумм осадков (для месячных сумм осадков предусмотрена коррекция значений в случае пропуска нескольких дней). Для расчёта средних за сутки, месяц и год значений характеристик облачности и осадков (19 параметров: водность и водозапас облачного слоя, толщина и реальная толщина облачного слоя, температура, высота над уровнем моря и барическая высота ВГО, температура ВГО, высота НГО, высота верхней и нижней границ слоя слабого, умеренного и сильного обледенения, оптические плотность и толщина облачного слоя, эффективный радиус облачных частиц и интенсивность осадков только для случаев с осадками) используются соответственно «срочные», суточные и месячные значения соответствующих параметров облачности и осадков (рассчитывается среднее арифметическое за период времени). При расчёте суточных значений CFC (Cloud Fraction Cover) определяется

степень покрытия облачностью пиксела в течение суток (количество облачных пикселей делится на количество спутниковых наблюдений в течение суток), а для расчёта средних за месяц и год значений CFC используются соответственно суточные и месячные значения (рассчитывается среднее арифметическое за период времени).

Выходные продукты АПК по облачности, осадкам и ОЯП получаются в оперативном режиме для каждого срока спутникового наблюдения в виде числовых бинарных матриц (в точных значениях или кодах классов/градаций) и соответствующих им растровых карт: для полного круга обзора МСУ-ГС или его фрагмента с исходным разрешением или для любой картографической проекции, заданной регулярной сеткой (нормальная равнопромежуточная цилиндрическая, например, масштаб 1,5' (0,025°)) или матрицей географических координат (например, косая азимутальная стереографическая, масштаб ~4 км). Время обработки одного срока спутникового наблюдения, включая предварительную подготовку, классификацию и запись в файлы, не превышает 0,5 мин. Примеры выходных продуктов см. на рис. 4-7.

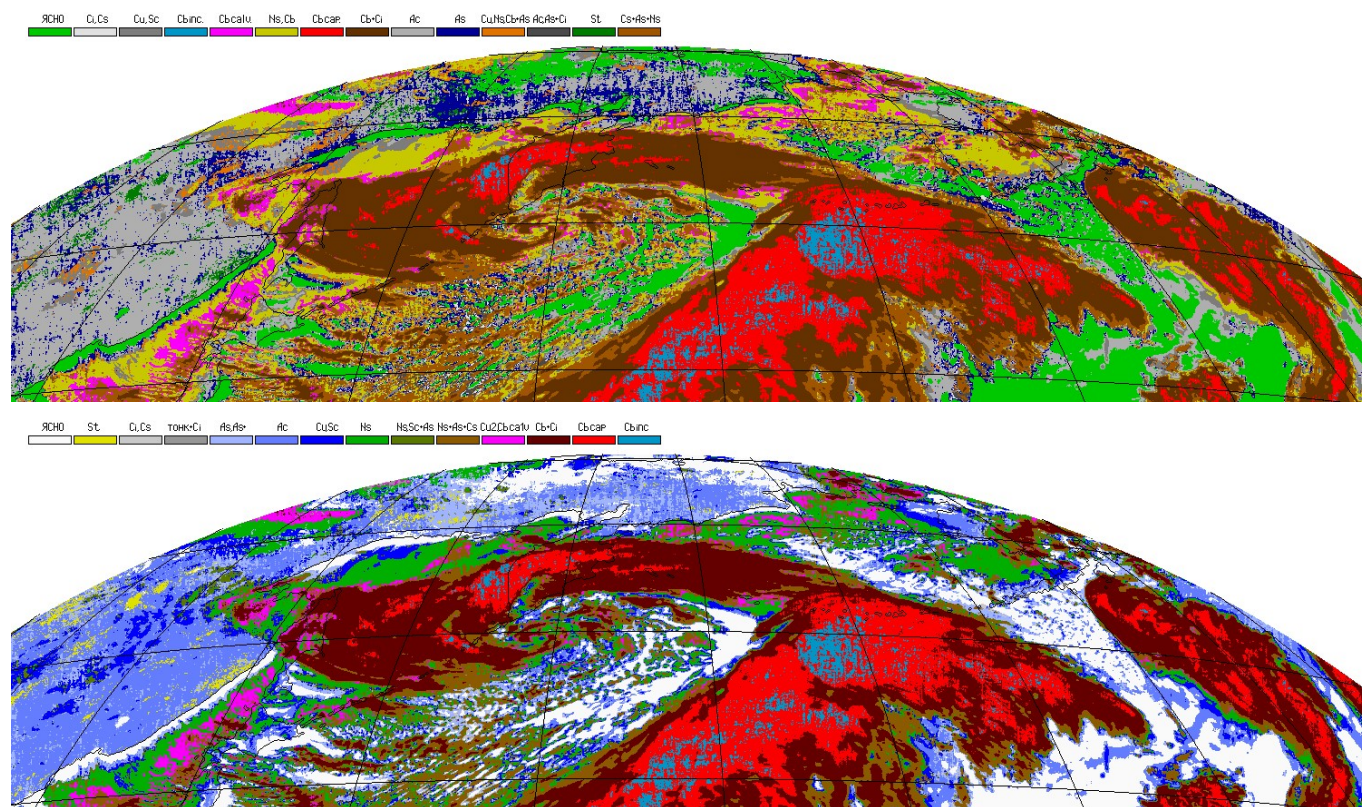


Рис. 4. Облачный анализ ВМО (вверху) и для авиации (внизу) (18.12.2023, 00:00 UTC, поперечная азимутальная проекция виртуального спутника)

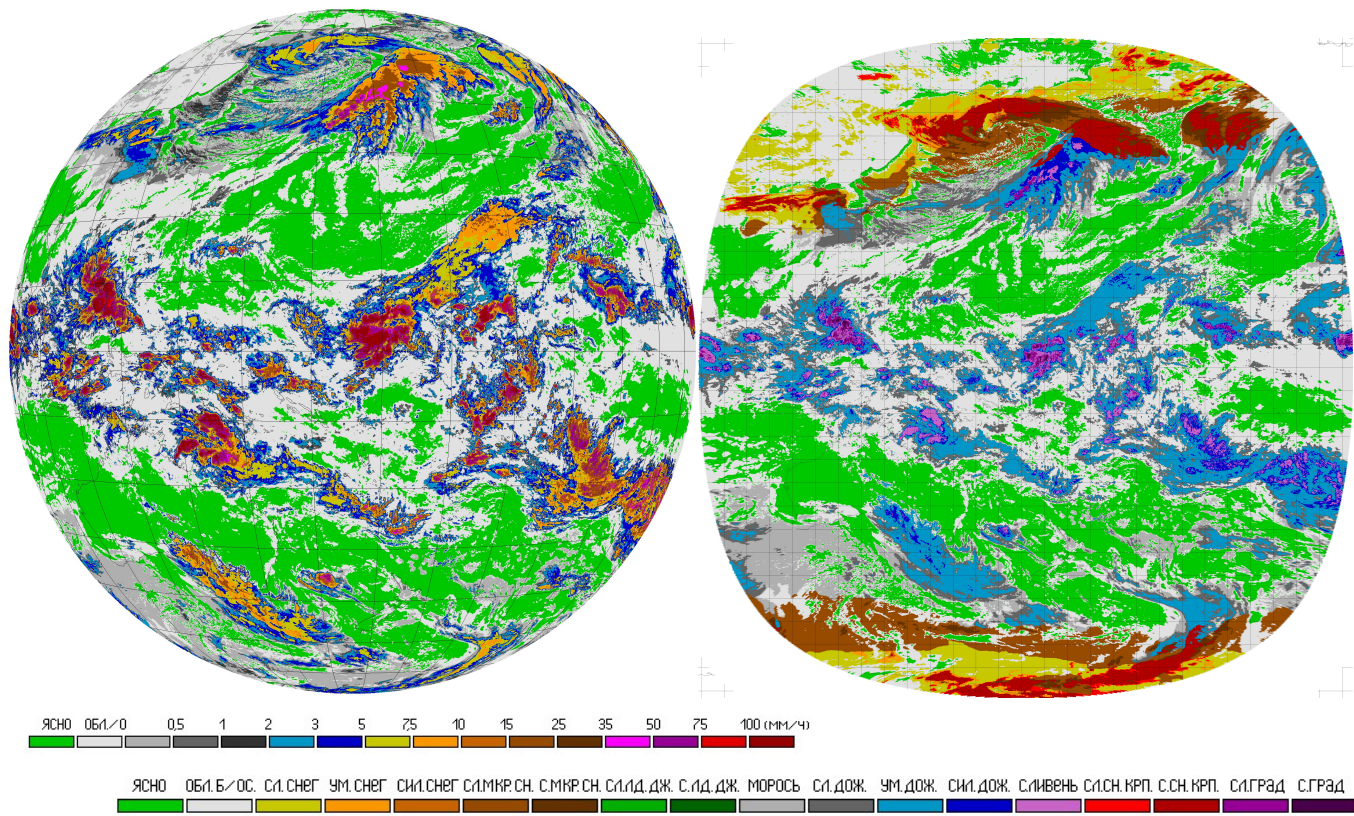


Рис. 5. Максимальная мгновенная интенсивность осадков (поперечная азимутальная проекция виртуального спутника) (справа) и тип осадков у поверхности земли (нормальная цилиндрическая равнопромежуточная проекция) (слева) (18.12.2023, 00:00 UTC)

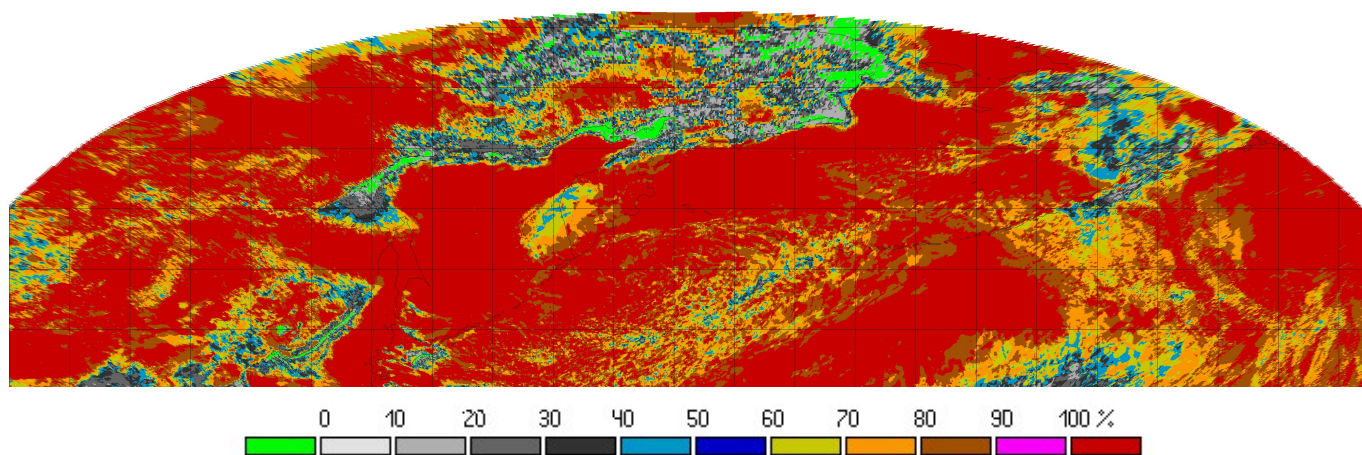


Рис. 6. Среднее за сутки покрытие пиксела облачностью (CFC – Cloud Fraction Cover) (1 января 2023 г., поперечная азимутальная проекция виртуального спутника)

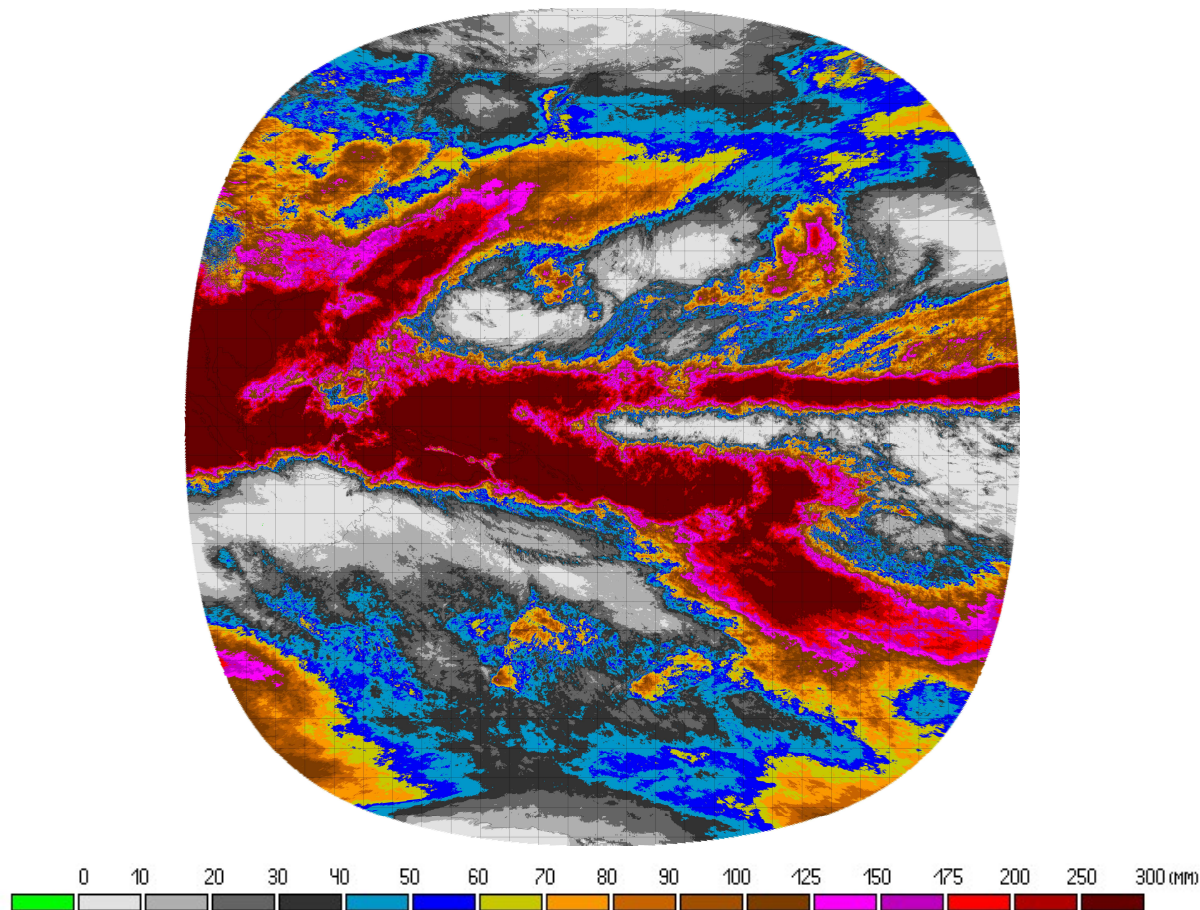


Рис. 7. Месячные суммы осадков (май 2024 г., нормальная цилиндрическая равнопромежуточная проекция)

Таблица 2. Результаты автоматической валидации выходных продуктов АПК «ELEKTRO4нсер» по данным МСУ-ГС/«Электро-Л» №4 данными наземных наблюдений на метеостанциях (январь-июль 2024 г., регион 40,0-71,5° с.ш., 94,3-180,0° в.д.)

метеопараметр	характеристика точности	вся выборка	для отд. месяцев
облачная маска	HR(2 класса: ясно, обл.), %	86	80-92
зоны осадков	HR(2 класса: (ос., б/ос.), %	73	65-77
интенсивность осадков	POD (I<1 мм/ч), %	32	19-47
	POD (I=1-3 мм/ч), %	36	32-41
	POD (I=3-10 мм/ч), %	45	39-51
	POD (I>10 мм/ч), %	25	18-34
	HR(4 класса), %	36	27-44
тип осадков	POD (снег), %	49	46-74
	POD (дождь), %	85	75-89
	POD (смешан.), %	19	18-43
высота НГО	HR (2 класса: <1,5 км, ≥1,5 км), %	43	37-50
зоны гроз	HR(2 класса: гроза, без грозы), %	96	93-98
зоны града	HR(2 класса: град в обл., обл.без гр.), %	92	90-93

Примечание. HR (Hit Rate) – точность классификации, POD (Probability of Detection) – вероятность правильного распознавания относительно наземных наблюдений

Авторская валидация на материале архива синхронных спутниковых и наземных наблюдений на метеостанциях за январь-июль 2024 г. показала удовлетворительное качество выходных информационных продуктов, которые оказались близкими по качеству аналогичным оценкам по данным SEVIRI/Meteosat и МСУ-ГС-ВЭ/Арктика-М. В соответствии с результатами

валидации выходные продукты могут быть рекомендованы к оперативному использованию в качестве дополнения к наземным метеонаблюдениям для мониторинга облачного покрова и его параметров.

Основные результаты валидации представлены в табл. 2. В целом, спутниковые наблюдения переоценивают облачность и зоны осадков по сравнению с наземными наблюдениями из-за больших размеров пиксела, так как к классу «облачно» и «осадки» причисляется весь пиксел, хотя в реальности в его пределах возможны «просветы». Отдельные классы характеристик облачности, осадков и ОЯП точнее всего определяются в те периоды года, когда они наиболее часто встречаются. Относительно невысокие оценки точности могут быть связаны с проблемой адекватного совмещения спутниковой и наземной информации при больших углах спутникового визирования (регион валидации расположен на краю зоны обзора МСУ-ГС). Более низкая точность классификации зон сильных осадков и смешанных осадков также связана с их высокой локальностью и кратковременностью, а также субъективностью наземных оценок.

Литература

Волкова Е.В., Кухарский А.В. Мониторинг характеристик облачного покрова, осадков и опасных явлений погоды по данным МСУ-ГС-ВЭ КА Арктика-М для территории России и Арктики // Сборник трудов Международного Симпозиума «Атмосферная радиация и динамика» (МСАРД-2023), Санкт-Петербург, 21-24 июня 2023 г., Санкт-Петербург: ООО «Издательство ВВМ», 298 стр., с. 10-14, ISBN 978-5-9651-1353-8.