

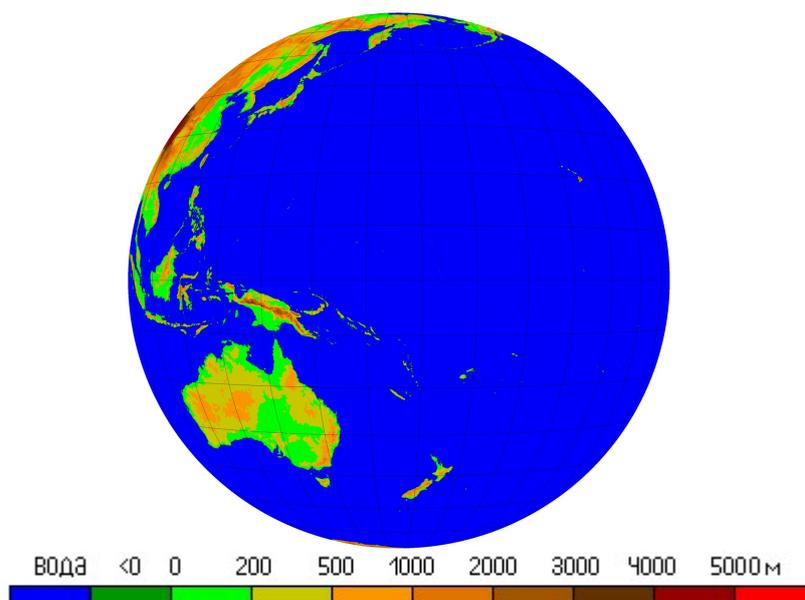
# Оперативный мониторинг характеристик облачного покрова, осадков и опасных явлений погоды по данным МСУ-ГС КА Электро-Л №4

Волкова Е. В., Кухарский А. В.

ФГБУ «НИЦ «Планета»,  
123242, Москва, Б. Предтеченский пер., д.7  
E-mail: [quantocosa@bk.ru](mailto:quantocosa@bk.ru), [kukharsky@planet.iitp.ru](mailto: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  $\sim 4$  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  $\sim 1$  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  $8^\circ$ , 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 ( $T_\lambda$ ). Дополнительно используются прогностические поля (NCEP GFS, сетка 0,5°, 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 ( $\phi$ ), 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).

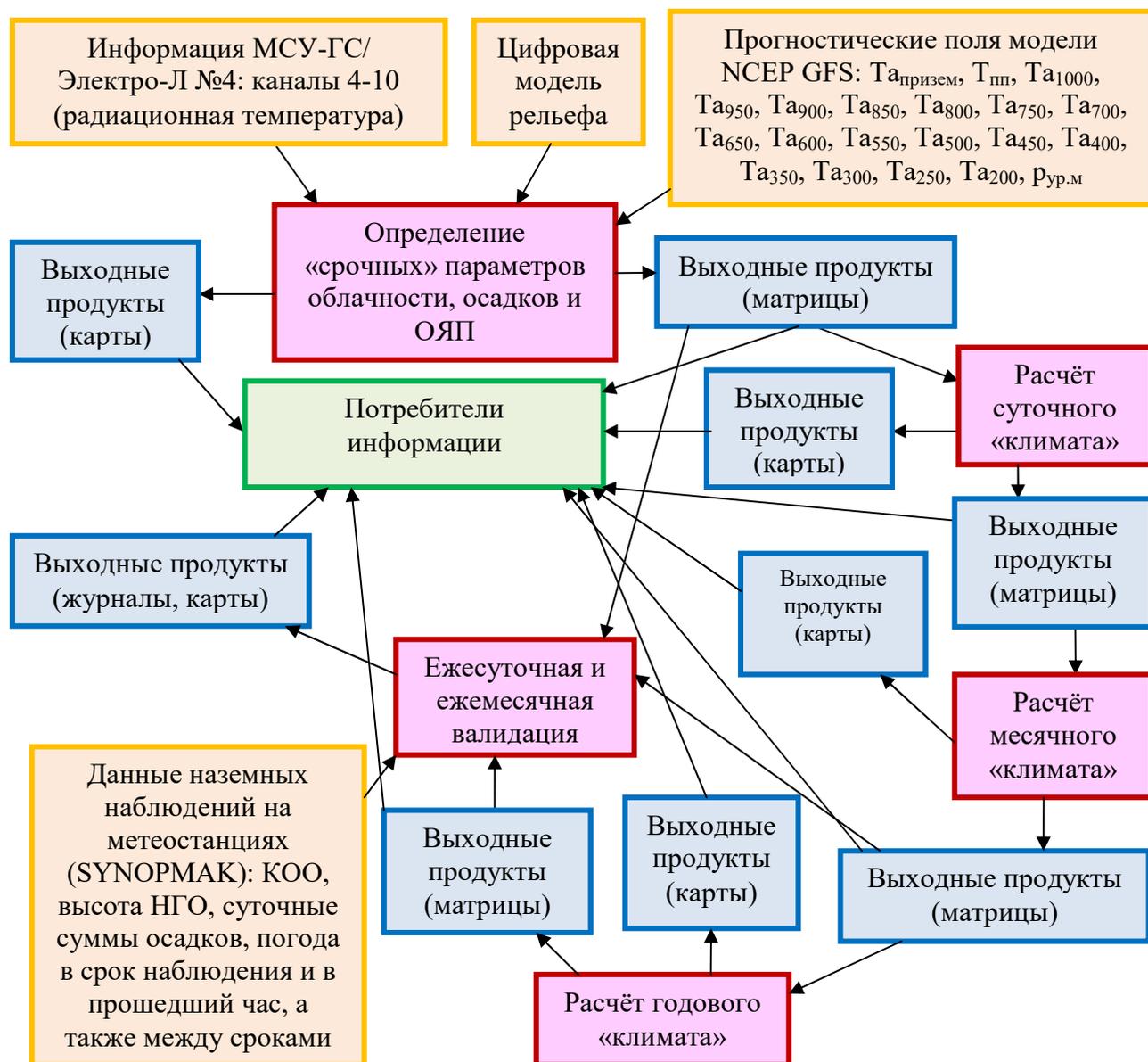


Рисунок 2. Технологическая схема работы КИМ в составе АПК «ELEKTRO4nсер»

**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**

<b>Параметр (ед. измер.)</b>	<b>Обозначение</b>	<b>Классы/градации</b>	<b>Предикторы</b>
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	$T_{ВГО}$ , $p_{ур.м}$ , $T_{a_{max}}$ , $h_{ref}$ , $\phi$
Высота ВГО над уровнем моря (м, км)	$h_{ВГО}$	точные значения	$ph_{ВГО}$ , $p_{ур.м}$ , $h_{ref}$ , $\phi$ , $T_{a_{max}}$
Реальная толщина облачного слоя (м, км)	dHcl	точные значения	$T_{107}$ , $p_{ур.м}$ , $h_{ref}$ , $\phi$ , $T_{a_{max}}$ , $T_{пп}$ , $T_{a_{призем}}$
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 <sup>3</sup> )	$W_{max}$	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 <sub>low</sub>	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 <sup>2</sup> )	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, $\phi$ , $T_{ВГО}$ , $T_{107}$ , ( $T_{97}-T_{87}$ ), ( $T_{64}-T_{80}$ )
Гроза	thund	без грозы, слабая, умеренная, сильная гроза	$W_{max}$ , SW, dHcl, $T_{107}$ , $T_{a_{ур.м}}$ , $\phi$ , ( $T_{97}-T_{87}$ ), ( $T_{64}-T_{80}$ )
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, $h_{BFO}$ , $p_{ур.м.}$ , $T_{a_{ур.м.}}$ , $\varphi$ , $h_{ref}$
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

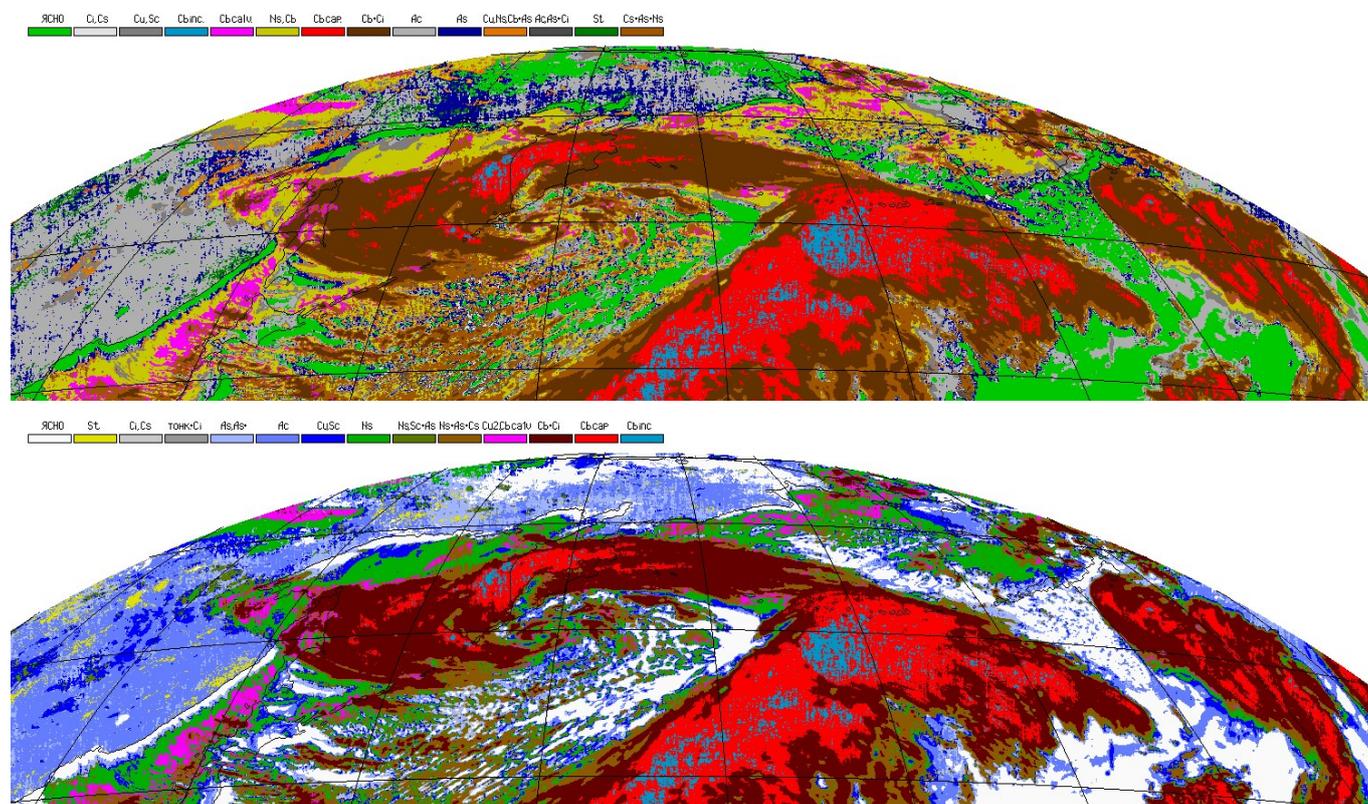


*Рисунок 3. Технологическая схема работы АПК «ELEKTRO4ncер»*

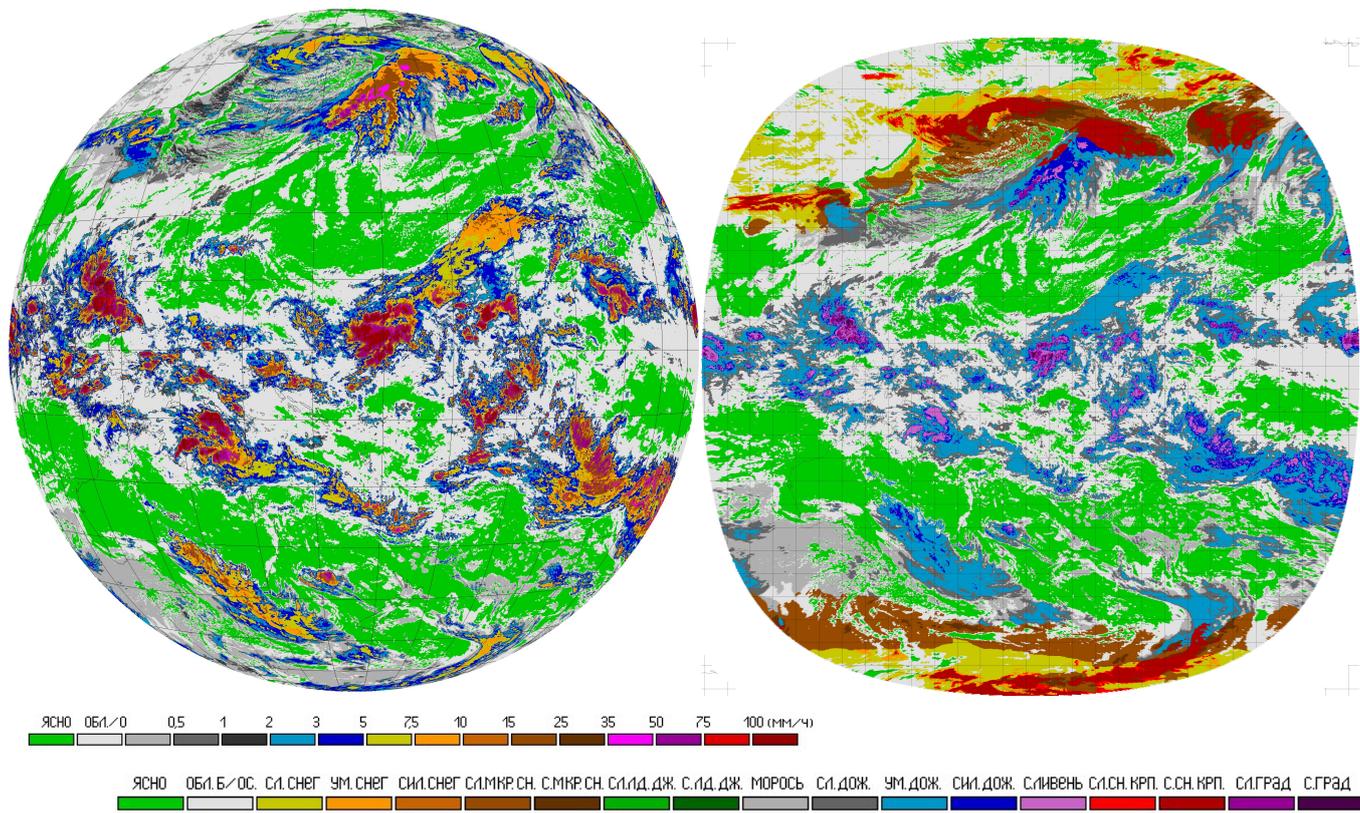
При расчёте суточных сумм осадков по серии спутниковых наблюдений вычисляется средняя за сутки интенсивность осадков (включая случаи без осадков (т.е.  $I \geq 0$  мм/ч)), а затем умножается на коэффициент-константу. Месячные и годовые суммы осадков получаются простым суммированием соответственно суточных 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).

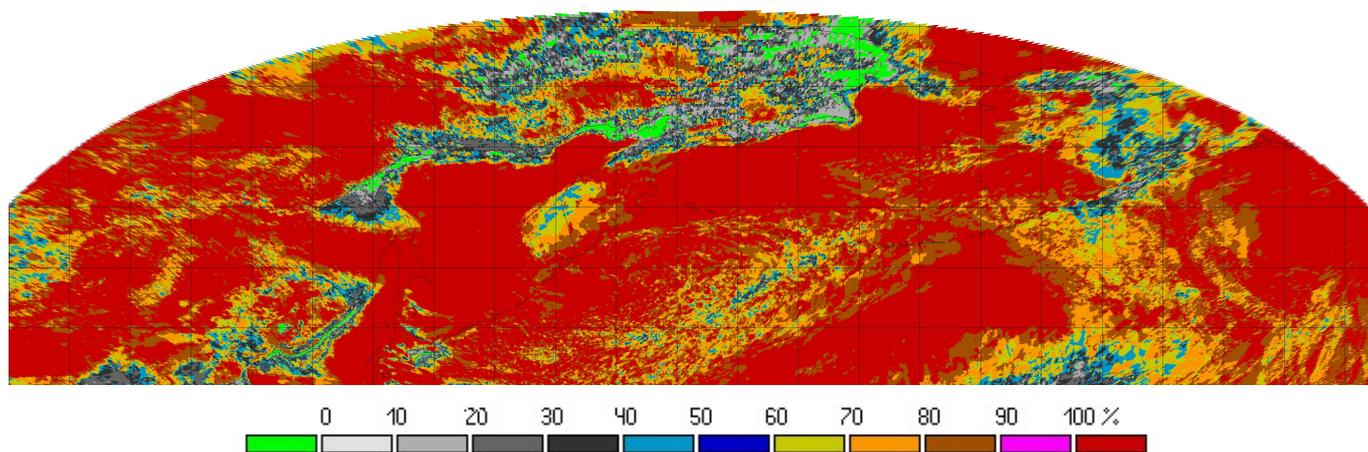
Выходные продукты АПК по облачности, осадкам и ОЯП получаются в оперативном режиме для каждого срока спутникового наблюдения в виде числовых бинарных матриц (в точных значениях или кодах классов/градаций) и соответствующих им растровых карт: для полного круга обзора МСУ-ГС или его фрагмента с исходным 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.



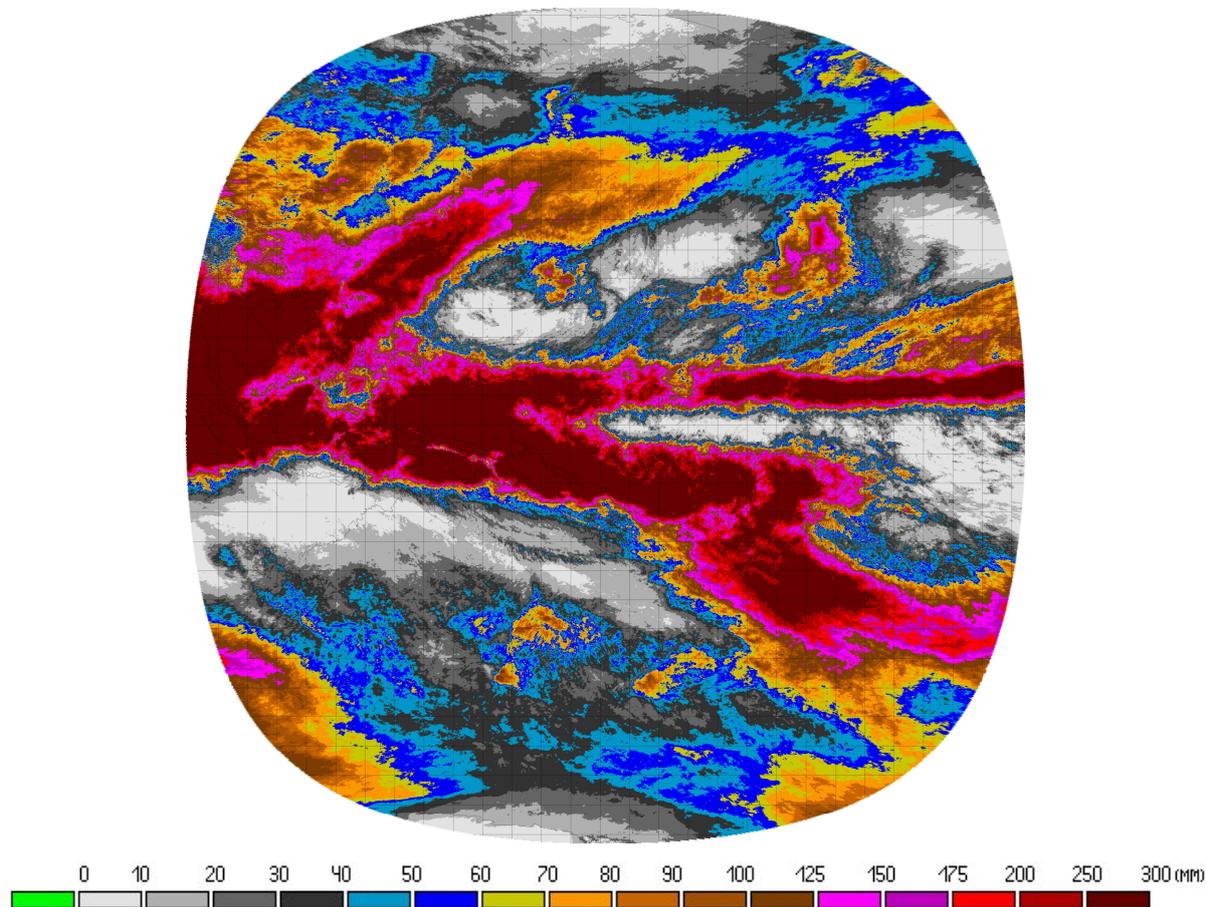
**Рис. 4.** Облачный анализ ВМО (вверху) и для авиации (внизу) (18.12.2023, 00:00 UTC, поперечная азимутальная проекция виртуального спутника)



**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.)

<b>метеопараметр</b>	<b>характеристика точности</b>	<b>вся выборка</b>	<b>для отд. месяцев</b>
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.