

Сравнительный анализ оценок параметров облачного покрова, полученных по данным разных спутниковых приборов для Европейской территории России

Волкова Е.В.

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

В «НИЦ «Планета» разработана Комплексная пороговая методика (КПМ) попиксельной классификации спутниковой информации по косвенным признакам и на её основе создан автоматизированный программный комплекс (АПК) «ETR-plus» (Волкова, Кухарский, 2019) для мониторинга параметров облачного покрова, осадков и опасных явлений погоды (ОЯП) над европейской территорией России (ЕТР). АПК использует данные измерений альbedo и радиационной температуры различных спутниковых приборов (AVHRR/NOAA-18,-19 (каналы 1-5), МСУ-МР/Метеор-М №2 (каналы 4-6) и SEVIRI/Meteosat-11 и -8 (точки стояния 0 и 41,5° в.д., каналы 1-10)) и прогностическую информацию различных моделей (Exeter (UK) с пространственным разрешением 2,5° за 0 и 12 ч VCB или NCEP GFS (USA) с пространственным разрешением 0,5° за 0, 6, 12 и 18 ч VCB), а также цифровую карту рельефа (gtoro30).

Выходные продукты получаются в виде карт и числовых матриц для региона «ЕТР» (47-63° с.ш. и 20-50° в.д.) с пространственным разрешением 1' (0,01667°) по широте и 1,5' (0,025°) по долготе: облачная маска, типы облачности, температура верхней границы облачности (ВГО) (Твго), барическая высота ВГО (pНвго), высота ВГО над уровнем моря (Нвго), высота нижней границы облачности (НГО) (Ннго), толщина облачного слоя (dН), оптические плотность (COD – cloud optical depth) и толщина (COT – cloud optical thickness) облачного слоя, максимальная (Wmax) и суммарная (SW) водность облачного слоя, эффективный радиус облачных частиц (Rэф), фазовое состояние воды в облачных частицах на ВГО (faza), интенсивность осадков (I), тип осадков у поверхности земли, суточные, месячные и годовые суммы осадков ($\Sigma I_{\text{сут}}$, $\Sigma I_{\text{мес}}$, $\Sigma I_{\text{год}}$), зоны гроз, града и обледенения, в т.ч. разной интенсивности. Наборы предикторных характеристик и пороговые формулы к ним, порядок классификации, формулы расчета Нвго и $\Sigma I_{\text{сут}}$, а также количество выделяемых классов/градаций и их границы для некоторых выходных продуктов сильно разнятся в разных версиях КПМ в зависимости от вида спутниковой и прогностической информации.

Данная работа посвящена валидации и сравнению между собой оценок параметров облачного покрова, осадков и ОЯП, полученных пятью разными способами:

- 1) данные AVHRR/NOAA и анализ/прогноз Exeter («avhrrEx»);
- 2) данные МСУ-МР/Метеор-М №2 и анализ/прогноз Exeter («msumrEx»);
- 3) данные SEVIRI/Meteosat-11 (0° в.д.) и анализ/прогноз Exeter («sevirioex»);
- 4) данные SEVIRI/Meteosat-11 (0° в.д.) и прогноз NCEP GFS («sevirioncep»)%
- 5) данные SEVIRI/Meteosat-8 (41,5° в.д.) и анализ/прогноз Exeter («sevirio415ex»).

Между собой сравнивались версии КПМ: avhrrEx и msumrEx, avhrrEx и sevirioex, sevirioex и sevirioncep, sevirioex и sevirio415ex.

Цель работы – оценить качество выходных продуктов по облачности, осадкам и ОЯП, полученных разными версиями КПМ, сравнив их с аналогичными наземными наблюдениями на метеостанциях и климатическими оценками, а также выявить схожесть и различия получаемых продуктов, сравнив результаты оценок разными вариантами КПМ между собой, с целью выработки рекомендаций для пользователей.

При проведении количественной валидации спутниковых оценок наземными метеонаблюдениями (телеграммы АСООИ из БД Гидрометцентра России: наблюдения за количеством общей облачности (КОО), Ннго, $\Sigma_{\text{сут}}$, погодой в срок наблюдения и в последний час, а также между сроками) «вырезался» фрагмент спутникового изображения с центром в метеостанции и рассчитывались значения статистик: dev (отклонение спутниковых оценок от наземных), СКО (среднее квадратичное отклонение), HR (Hit Rate – суммарная вероятность правильного детектирования, в т.ч. с допустимой ошибкой ($\text{err} \leq A$), всех классов/градаций относительно всей выборки), POD (Probability of Detection – вероятность правильного детектирования класса/градации относительно всех пикселей этого класса/градации из контрольной выборки), POO (Probability of Occurrence – вероятность события класса/градации относительно всех пикселей этого класса/градации из валидируемой выборки). Разница по времени между спутниковыми и наземными наблюдениями (dt) не превышала ± 20 мин.

При валидации спутниковых продуктов климатическими оценками строились графики и гистограммы распределения повторяемостей значений валидируемых метеопараметров по градациям/классам, рассчитывались средние «по региону» значения, строились зонально-осреднённый и годовой ход среднемесячных значений и др., а затем сравнивались с климатическими оценками для ЕТР для соответствующих периодов времени и типа облачности

При сравнении выходных продуктов, полученных разными вариантами КПМ, друг на друга «накладывались» два классифицированных спутниковых изображения для близких сроков спутниковых наблюдений ($dt \leq \pm 10$ мин) и рассчитывались значения dev и $|dev|$ (абсолютное отклонение) – отклонение оценок по «второму» варианту КПМ от оценок по «первому» варианту КПМ (из сравниваемой пары). Также рассчитывались значения HR для всех пар пикселей по обеим версиям КПМ. Перед сопоставлением выходные продукты (выделяемые ими градации/классы) двух сравниваемых вариантов КПМ приводились в соответствие друг другу.

При валидации выходных продуктов КПМ для данных AVHRR/NOAA и МСУ-МР/Метеор использовались все сроки спутниковых наблюдений, а для данных SEVIRI/Meteosat 8 основных сроков (2:45, 5:45, 8:45, 11:45, 14:45, 17:45, 20:45 и 23:45 ВСВ) для региона «ЕТР» с 1 января по 31 декабря 2019 г.

Основные выводы из работы

Проведённые сравнение и валидация наземными метеонаблюдениями и климатическими оценками выходных продуктов по облачности и осадкам, полученных разными версиями КПМ, в т.ч. с использованием разных видов спутниковой и дополнительной информации, показал следующее (см. табл. 1-3 и рис. 1-14):

- результаты классификаций параметров облачного покрова по спутниковым данным с полярно-орбитальных (п/о) и геостационарных (г/с) КА несмотря на общую схожесть существенно отличаются друг от друга из-за разного пространственного разрешения спутниковой информации, смещения положения облака относительно реального в зависимости от Нвго и угла спутникового визирования (viz) (для г/с информации), разного угла обзора одного и того же облака и др.;

- точность классификаций по данным SEVIRI немного выше при использовании в качестве дополнительной информации данных численного анализа или прогноза Exeter по сравнению с прогнозом NCEP при прочих равных условиях;

- результаты классификаций КПМ (при прочих равных условиях), полученные по информации SEVIRI/Meteosat с разными точками стояния, очень близки между собой, но не являются абсолютно идентичными из-за разных углов обзора одного и того же облака, разных размеров пиксела и др.;

- точность классификации КПМ по данным МСУ-МР/Метеор заметно уступает точности классификации КПМ по данным AVHRR/NOAA из-за технических различий приборов и др. причин (см. также *Волкова и др., 2020*);

- ближе всего результаты классификации, полученные разными версиями КППМ, в холодный период года (когда преобладают облака слоистообразных форм большой протяженности с относительно небольшими значениями и небольшим диапазоном изменчивости макро- и микрофизических параметров облачности и осадков), а сильнее всего различаются летом (когда преобладают кучевообразные облака относительно небольшие по площади и быстро изменяющиеся во времени (растут/распадаются), а их параметры имеют очень большой диапазон изменчивости значений);

- оценки КОО по спутниковым данным с п/о КА могут использоваться как равноценная замена наземным наблюдениям на метеостанциях, т.к. имеют высокое пространственное разрешение и достаточно высокую точность по сравнению с наземными метеонаблюдениями (см. табл. 3), а по информации SEVIRI облачный покров серьёзно переоценен из-за грубого пространственного разрешения (сливаются просветы в облаках, а единичные облака увеличиваются в размере из-за проблемы частично заполненных облачностью пикселей) (см. рис. 1 и 8);

- несмотря на, в целом, более высокую точность классификации (из-за более высокого пространственного разрешения и меньших значений v_{iz}) спутниковая информация с п/о КА имеет очень низкое временное разрешение (малое количество (4-6) и нерегулярность пролётов в течение суток) и поэтому не может использоваться ни для оперативного мониторинга, ни для климатических исследований, в отличие от информации SEVIRI с более низкими пространственным разрешением и точностными характеристиками выходных продуктов, но с более высоким и, самое главное, регулярным временным разрешением;

- спутниковые оценки $\Sigma I_{сут}$ по данным с г/с КА получаются сильно сглаженными (минимальные значения выше, а максимальные ниже) из-за грубого пространственного разрешения) по сравнению с оценками $\Sigma I_{сут}$ по данным AVHRR/NOAA и с наземными измерениями на метеостанциях;

- значения $\Sigma I_{сут}$ по данным SEVIRI и прогноза NCEP сильно переоценены и не пригодны для климатического мониторинга и оценок $\Sigma I_{мес}$ и $\Sigma I_{год}$, однако допустимы к использованию для оперативного мониторинга $\Sigma I_{сут}$, т.к. значения получаются ближе к реальным максимумам;

- спутниковые оценки сумм осадков за большие периоды времени (месяц, год) способны стать реальной альтернативой наземным измерениям на метеостанциях для мониторинга среднего увлажнения больших территорий: хорошо видна общая тенденция

увлажнения территории (преобладающие максимальные и минимальные значения сумм осадков и их местоположение);

- спутниковые оценки сумм осадков совершенно непригодны для автоматического попиксельного сопоставления с данными наземных наблюдений на метеостанциях и точечного мониторинга «по пункту» из-за пространственного сдвига спутниковых измерений относительно реальных, а также из-за разных пространственных масштабов спутниковых (площадных) и наземных (точечных) наблюдений.

Литература

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 // Сборник тезисов Семнадцатой Всероссийской открытой конференции "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса". Москва, ИКИ РАН, 11-15 ноября 2019 г. С. 161. doi 10.21046/17DZZconf-2019a.

Волкова Е.В., Косторная А.А., Амикишиева Р.А. Определение параметров облачного покрова системами автоматической обработки спутниковых данных // Географический вестник = Geographical bulletin. 2020. № 3(54). С. 124-134. doi 10.17072/2079-2020-3-124-134.

Таблица 1. Средние по региону «ЕТР» значения параметров облачности, осадков и ОЯП по оценкам разных вариантов КПМ (вся выборка 2019 г.)

параметр облачности	версия КПМ				
	<i>AVHRRex</i>	<i>MSUMRex</i>	<i>SEV0ex</i>	<i>SEV0nc</i>	<i>SEV4I5ex</i>
КОО, окт	5,4	6,0	6,5	6,1	6,4
ТВго, К	253	251	247	249	247
рНвго, гПа	580	572	530	546	531
Нвго, км	4,61	4,61	5,22	5,10	5,17
dH, км	3,24	3,06	4,09	3,95	4,04
Wmax, г/м ³	0,49	0,53	0,70	0,57	0,68
SW, кг/м ²	0,56	1,55	4,14	1,02	3,96
COD	23,9	25,1	25,4	20,3	25,5
COT	59,2	60,8	77,0	63,5	75,1
Rэф, мкм	14,8	16,3	17,1	13,5	17,1
I, мм/ч	3,53	4,32	6,43	4,40	6,22
Σсут, мм	1,54	1,59	1,79	2,64	1,70
Σмес, мм	45,9	44,3	54,0	79,2	48,2
ΣГод, мм	550	532	648	951	578

Таблица 2. Сопоставление значений параметров облачности, осадков и ОЯП по оценкам разных вариантов КИМ (вся выборка 2019 г., регион «ЕТР»)

параметр облачности	характеристики точности	сравниваемые версии КИМ			
		<i>avhrrEx- msumrEx</i>	<i>avhrrEx- sev0ex</i>	<i>sev0ex- sev0nc</i>	<i>sev0ex- sev415ex</i>
пар сроков		233	360	2818	2707
обл. маска	HR, %	77,3	69,2	82,7	89,7
ТВго, К	<i>dev</i>	1,3	4,2	-1,9	0,0
	$ dev $	5,5	12,5	1,6	1,5
	HR($err \leq 2,5$ К), %	29,4	14,4	40,7	49,3
	HR($err \leq 5$ К), %	56,5	27,7	70,5	77,1
рНвго, гПа	<i>dev</i>	20,6	44,5	-27,0	0,8
	$ dev $	64,5	138,5	17,3	16,1
	HR, %	27,0	13,7	38,0	46,0
	HR($err \leq 1$ град.), %	71,0	37,4	86,2	88,5
Нвго, км	<i>dev</i>	-0,20	-0,52	0,26	0,01
	$ dev $	0,84	1,87	0,22	0,23
	HR($err \leq 0,5$ км), %	37,7	18,8	51,0	60,7
	HR($err \leq 1$ км), %	69,0	35,7	84,9	86,6
Ннго, км	HR, %	77,6	69,2	73,1	80,5
	HR($err \leq 1$ град.), %	94,9	94,9	95,7	96,8
dH, км	<i>dev</i>	-0,05	-0,83	0,27	0,04
	$ dev $	1,00	2,14	0,45	0,34
	HR($err \leq 0,25$ км), %	33,2	15,7	36,4	45,8
	HR($err \leq 1,5$ км), %	80,3	44,1	79,2	85,7
Wmax, г/м ³	<i>dev</i>	-0,12	-0,49	0,17	0,03
	$ dev $	0,31	0,56	0,19	0,17
	HR, %	40,3	24,4	44,1	65,5
	HR($err \leq 1$ град.), %	82,7	64,1	87,3	94,6
SW, кг/м ²	<i>dev</i>	-1,34	-3,94	3,57	0,18
	$ dev $	1,42	3,84	2,00	1,26
	HR, %	23,1	14,5	10,7	59,2
	HR($err \leq 1$ град.), %	67,6	37,2	49,7	93,1
faza	HR, %	54,6	44,2	64,9	84,2
	HR($err \leq 1$ град.), %	95,6	86,8	98,1	99,9
COD	<i>dev</i>	-2,26	-2,24	5,99	0,52
	$ dev $	6,91	12,10	3,34	2,59
	HR($err \leq 2,5$), %	31,6	16,7	27,2	54,0
	HR($err \leq 7,5$), %	62,9	43,3	53,5	74,8
COT	<i>dev</i>	-8,6	-18,5	18,2	2,1
	$ dev $	25,5	56,6	12,6	10,5
	HR, %	28,6	13,3	25,6	45,0
	HR($err \leq 1$ град.), %	66,0	35,8	62,6	77,8
Rэф, мкм	<i>dev</i>	-2,7	-2,7	4,4	0,05
	$ dev $	5,0	7,9	2,6	1,9
	HR, %	35,7	21,6	31,7	57,3
	HR($err \leq 5$ мкм), %	75,0	56,4	71,4	87,6
I, мм/ч	<i>dev</i>	-2,11	-3,59	2,90	0,15
	$ dev $	2,99	5,23	2,26	1,86

	<i>HR, %</i>	41,1	22,6	31,7	60,3
	<i>HR(err≤1 град.), %</i>	71,4	55,0	76,9	92,6
тип осадков	<i>HR, %</i>	42,8	22,2	28,9	63,2
грозы	<i>HR, %</i>	96,9	99,1	98,5	99,5
град	<i>HR, %</i>	93,9	97,8	98,1	98,9
обледенение	<i>HR, %</i>	55,4	37,1	59,4	75,2
	<i>HR(err≤1 град.), %</i>	93,5	81,4	99,4	99,3
тип облачности	<i>HR, %</i>	37,4	19,6	65,8	62,0
Σсут, мм	<i>dev</i>	-0,1	-0,3	-0,9	0,1
Σмес, мм	<i>dev</i>	1,5	-8,3	-25,2	5,1
Σгод, мм	<i>dev</i>	18	-99	-303	62

Таблица 3. Валидация наземными наблюдениями параметров облачности, осадков и ОЯП по оценкам разных вариантов КИМ (вся выборка 2019 г., регион «ЕТР»)

параметр обл-сти	хар-ки точности	версия КИМ				
		<i>AVHRRex</i>	<i>MSUMRex</i>	<i>SEV0ex</i>	<i>SEV0nc</i>	<i>SEV415ex</i>
КОО, окт.	<i>dev, окт.</i>	-0,3	-0,6	-1,3	-0,9	-1,1
	<i>СКО, окт.</i>	2,6	2,5	3,9	4,1	3,8
	<i>HR (err≤2 окт.), %</i>	78,4	80,3	62,5	58,7	62,9
	<i>HR (яс., раз., спл.), %</i>	63,7	66,3	51,8	47,8	52,2
	<i>HR (яс., спл.), %</i>	91,6	93,4	75,6	71,0	76,1
ННГО, км	<i>HR, %</i>	92,9	85,7	77,2	74,6	76,9
I, мм/ч	<i>POD, %</i>	94,9	96,5	86,9	76,3	87,1
	<i>POO, %</i>	88,2	80,7	69,7	72,0	71,4
	<i>HR, %</i>	84,0	78,9	67,3	64,6	68,6
	<i>POD_{слаб.}, %</i>	84,7	83,2	66,4	66,7	68,2
	<i>POD_{умер.}, %</i>	86,8	81,4	72,0	60,8	72,2
	<i>POD_{сил.}, %</i>	67,1	70,8	60,7	29,8	64,8
снег	<i>POD, %</i>	77,3	76,2	72,2	55,6	70,5
дождь	<i>POD, %</i>	84,3	90,2	79,7	61,8	79,7
смеш. ос.	<i>POD, %</i>	18,6	22,9	11,6	18,0	23,2
грозы	<i>HR, %</i>	93,7	91,0	97,5	95,1	97,4
град	<i>POD, %</i>	41,8	36,1	6,9	10,8	7,1
Σсут, мм	<i>dev</i>	0,26	0,18	-0,14	-0,93	-0,01
	<i> dev </i>	1,1	1,3	1,9	2,6	1,9
	<i>HR(err≤1мм), %</i>	72,7	69,0	56,7	49,4	58,8
	<i>HR(err≤2,5мм), %</i>	89,1	85,3	77,1	70,0	78,4

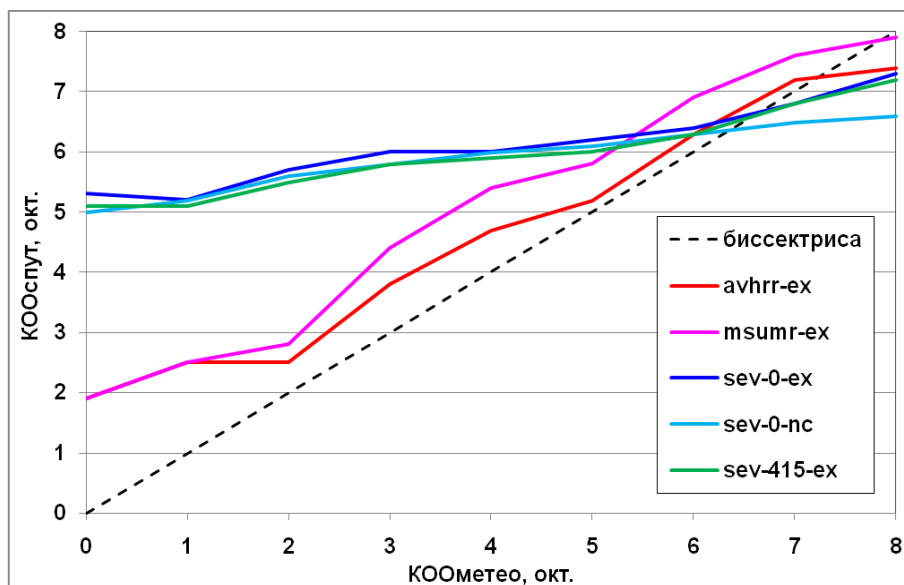


Рис. 1. Сопоставление оценок количества облачности (окт.) по спутниковым ($KOO_{\text{спутн}}$) и наземным ($KOO_{\text{метеo}}$) наблюдениям (2019 г., «ETP»)

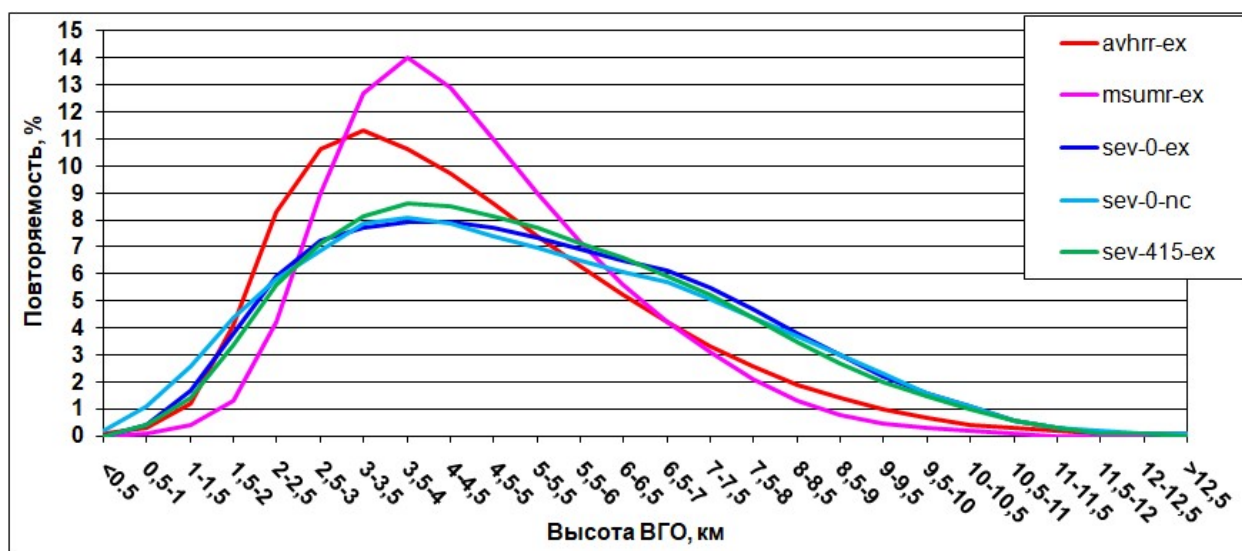


Рис. 2. Повторяемость значений высоты ВГО (км) над уровнем моря (2019 г., «ETP»)

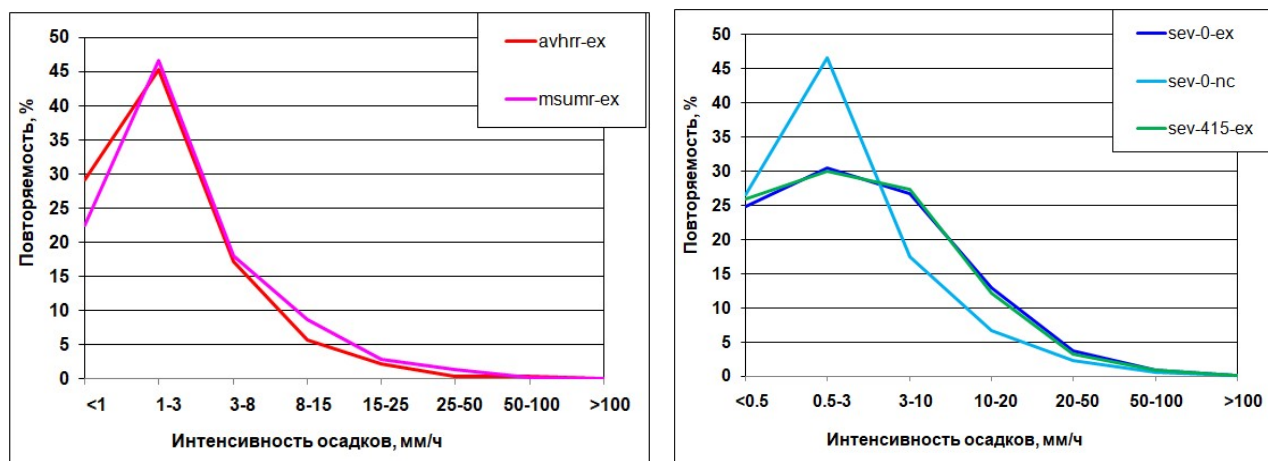


Рис. 3. Повторяемость значений интенсивности осадков (мм/ч) (2019 г., «ETP»)

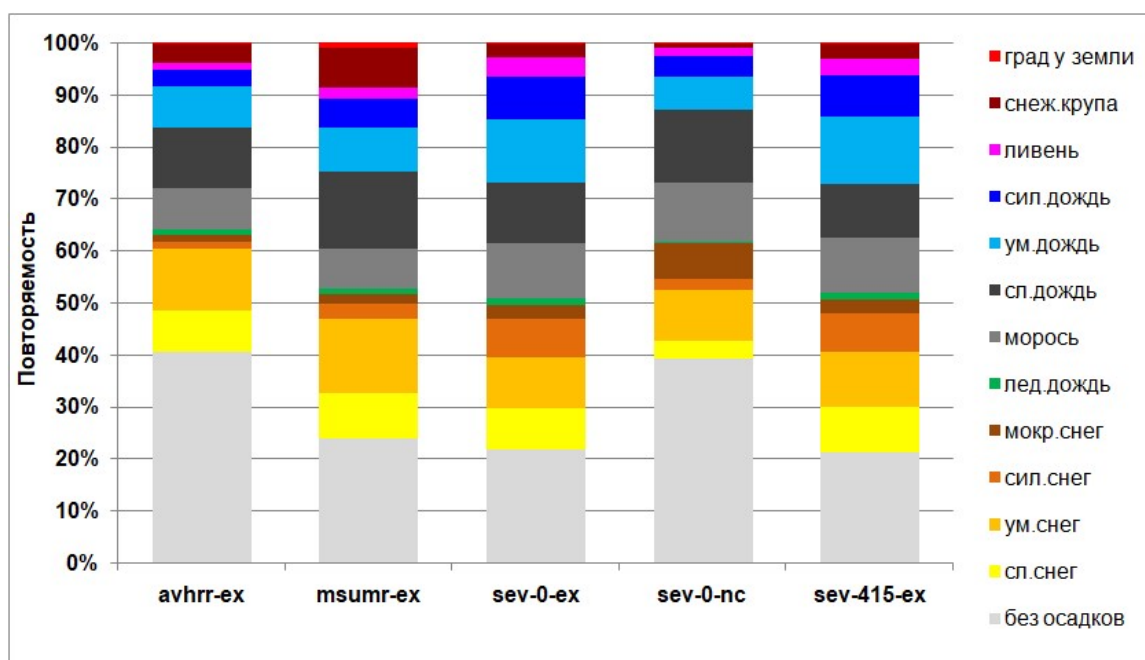


Рис. 4. Повторяемость типа осадков (2019 г., «ETP»)

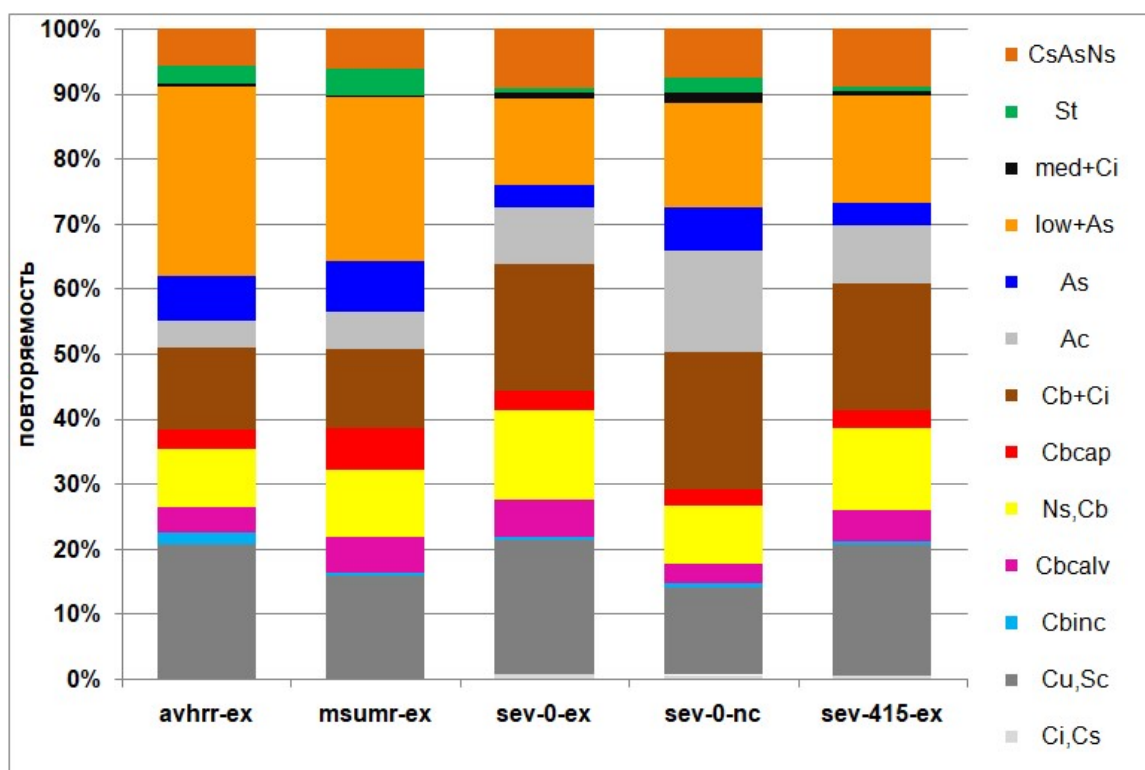


Рис. 5. Повторяемость классов облачности (2019 г., регион «ETP»)

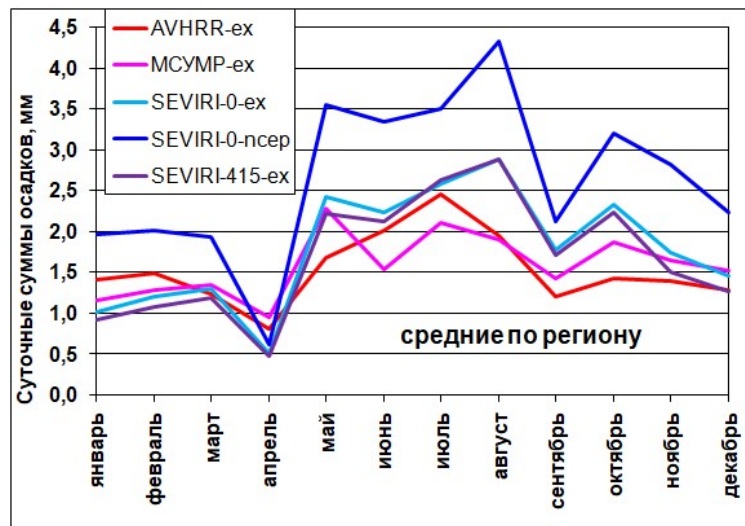
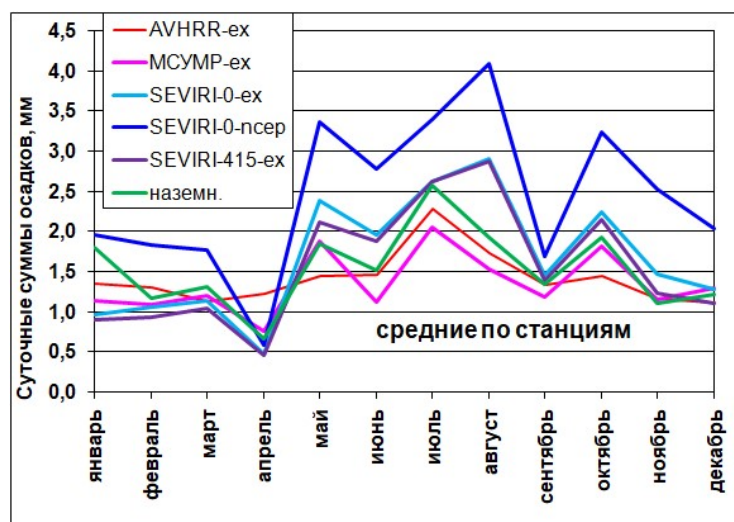


Рис. 6. Годовой ход среднемесячных значений суточных сумм осадков (2019 г., «ЕТР»)

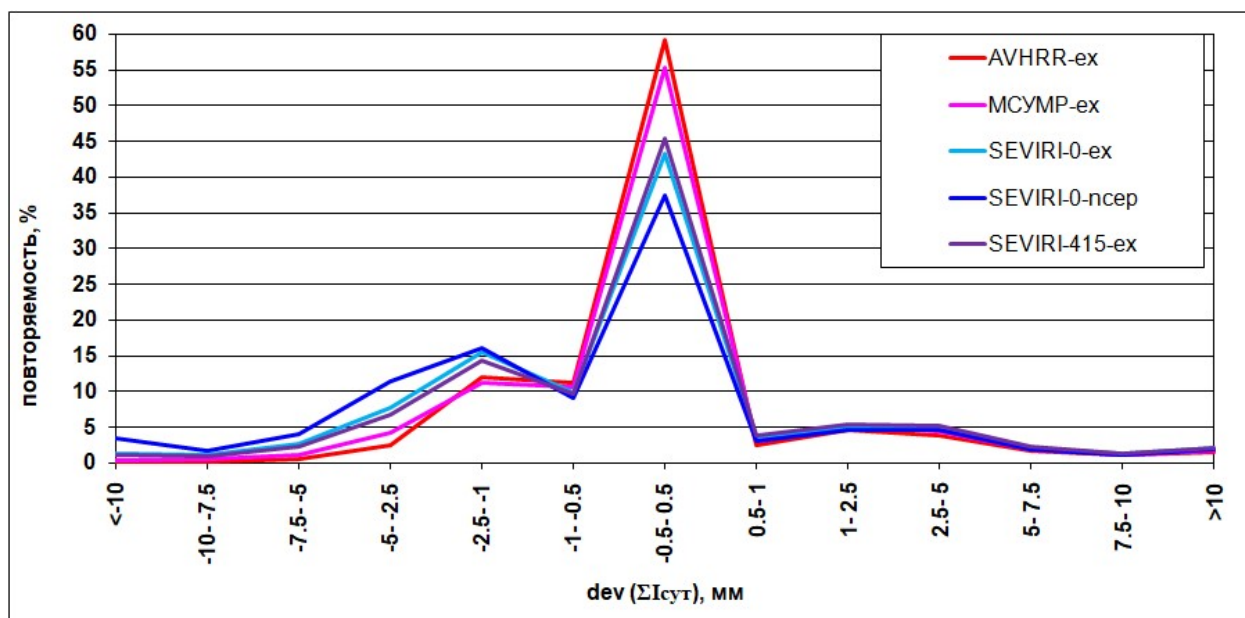
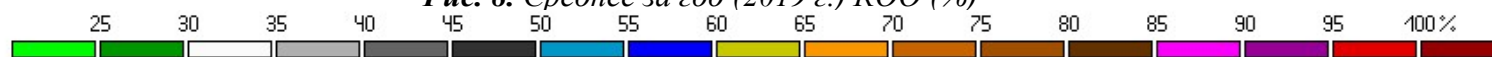
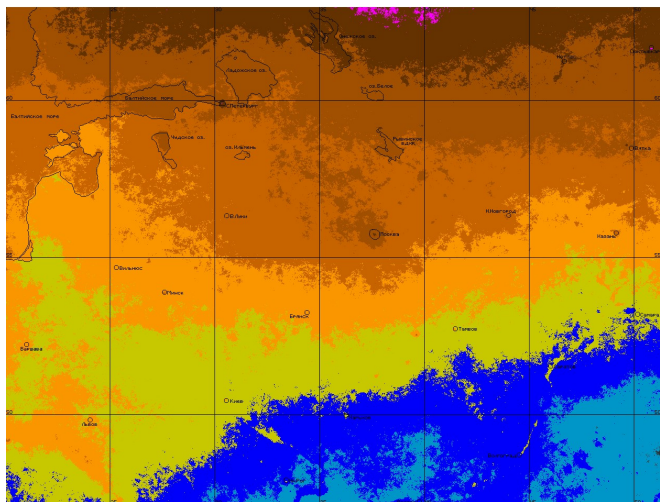


Рис. 7. Повторяемость значений $dev = \Sigma_{наземн.} - \Sigma_{спутн.}$ (2019 г., «ЕТР»)

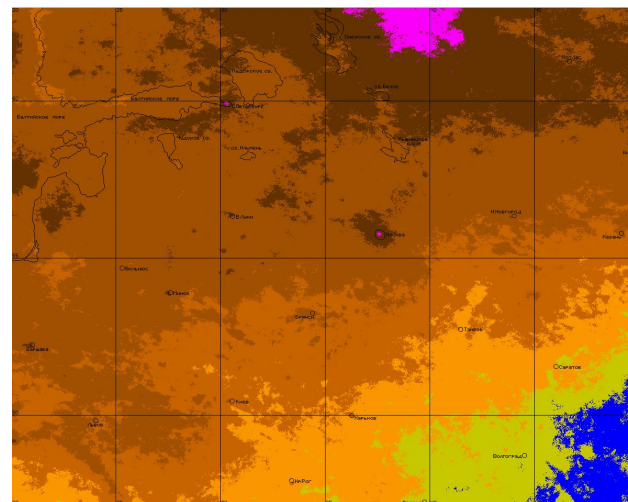
Рис. 8. Среднее за год (2019 г.) КОО (%)



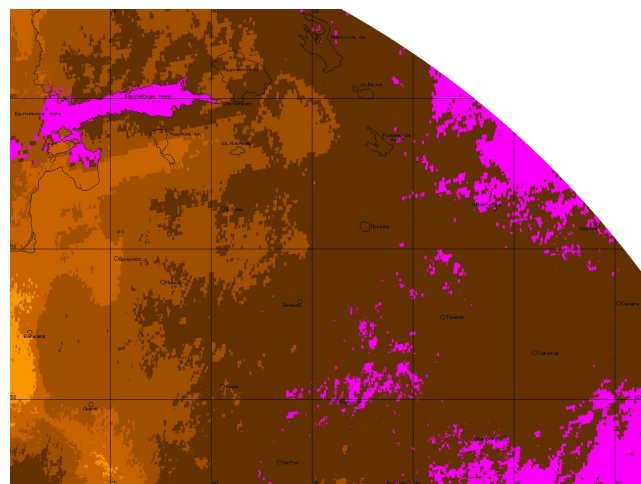
AVHRR-Ex



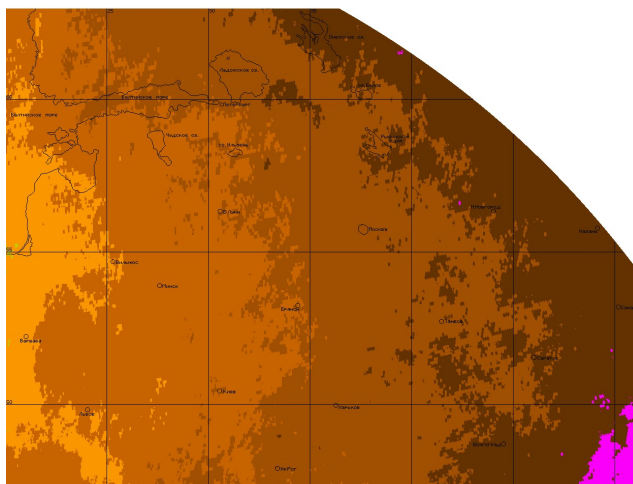
MSUMR-Ex



SEVIRI-0-Ex



SEVIRI-0-NCEP



SEVIRI-415-Ex

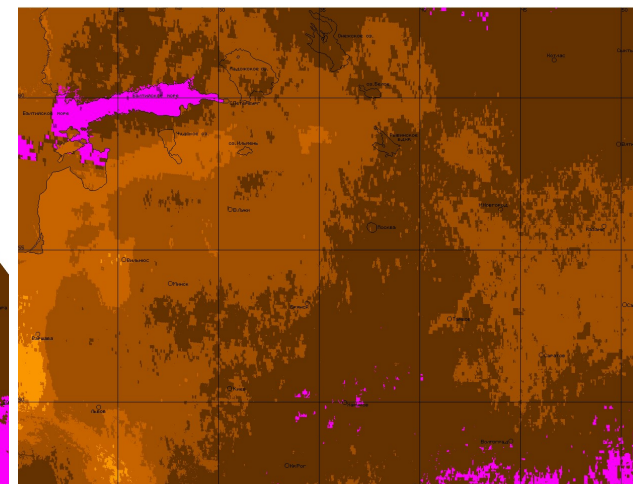
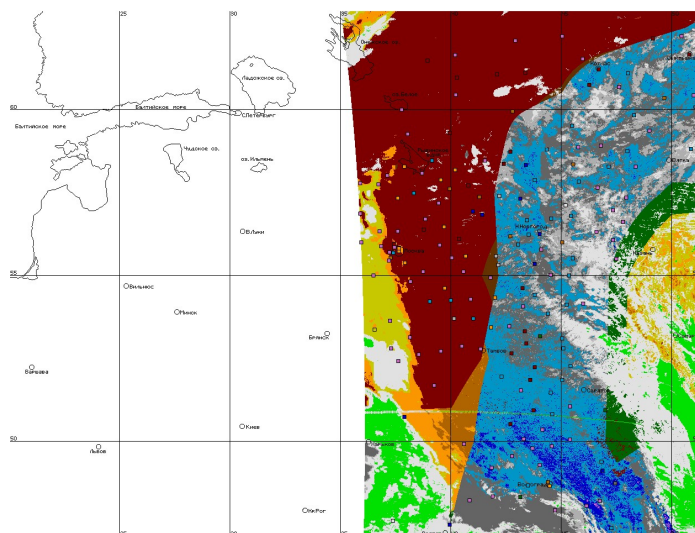


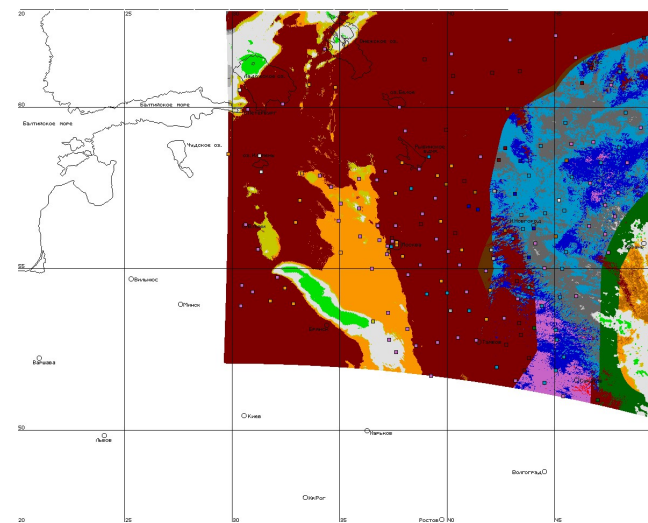
Рис. 9. Валидация типа осадков по спутниковым данным (7 октября 2019 г.) наземными наблюдениями на метеостанциях (6 ч ВСВ)



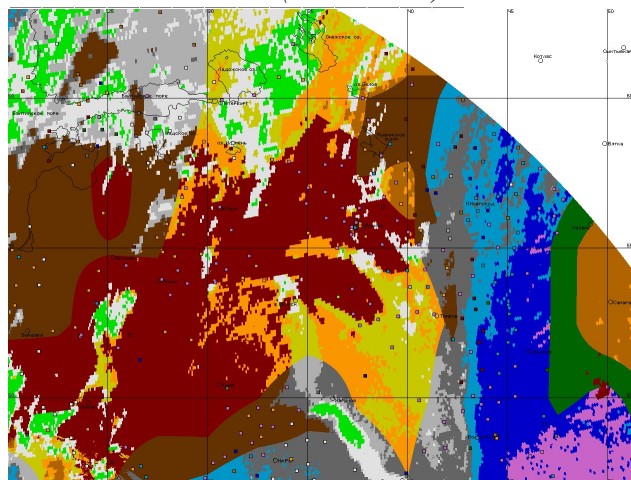
AVHRR-Ex (05:44 ВСВ)



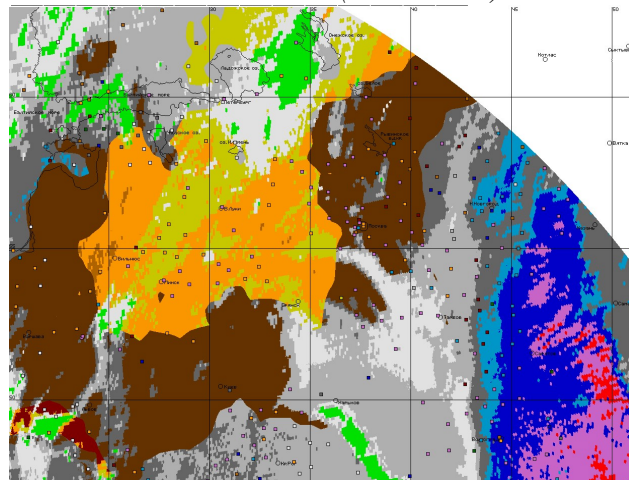
MSUMR-Ex (05:55 ВСВ)



SEVIRI-0-Ex (05:45 ВСВ)



SEVIRI-0-NCEP (05:45 ВСВ)



SEVIRI-415-Ex (05:45 ВСВ)

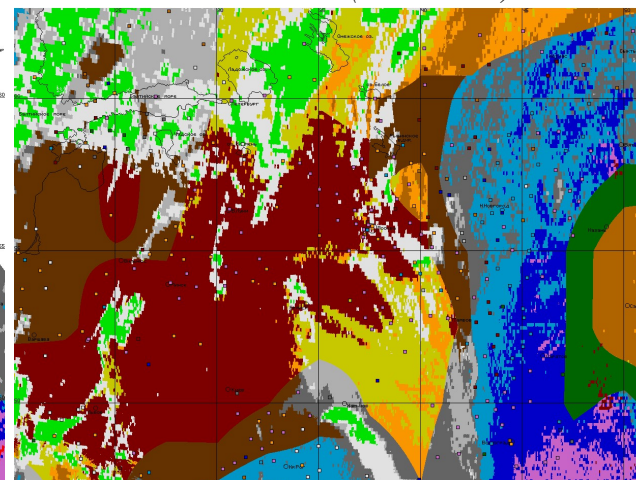
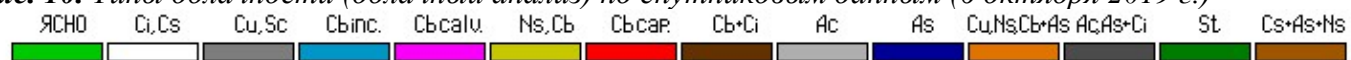
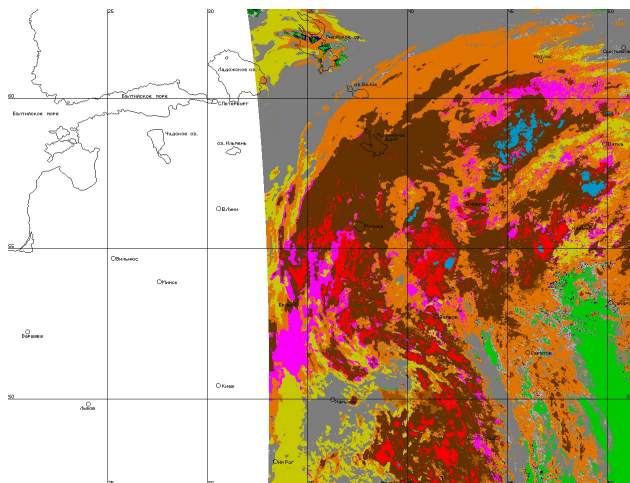


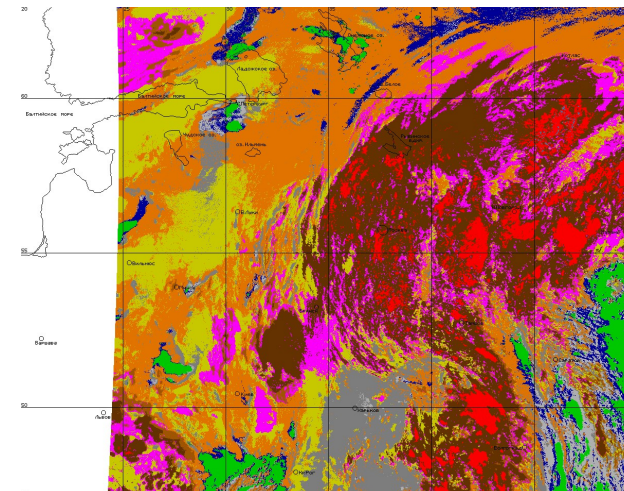
Рис. 10. Типы облачности (облачный анализ) по спутниковым данным (6 октября 2019 г.)



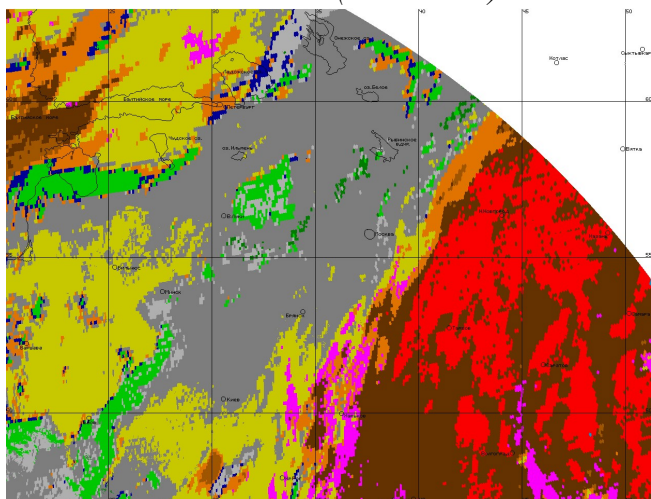
AVHRR-Ex 05:44 BCB



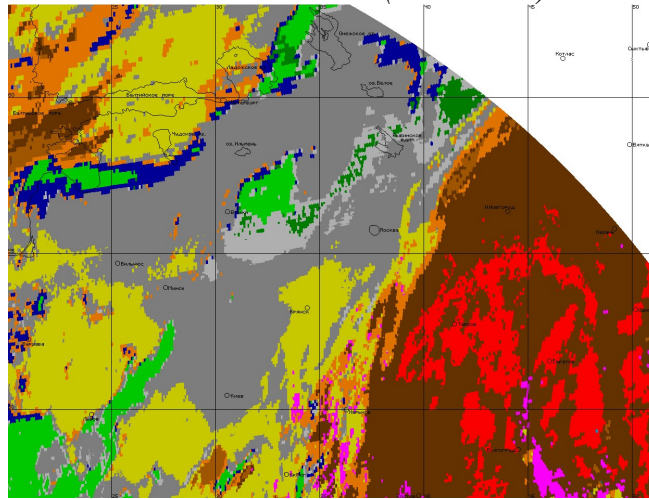
MSUMR-Ex (05:55 BCB)



SEVIRI-0-Ex (05:45 BCB)



SEVIRI-0-NCEP (05:45 BCB)



SEVIRI-415-Ex (05:45 BCB)

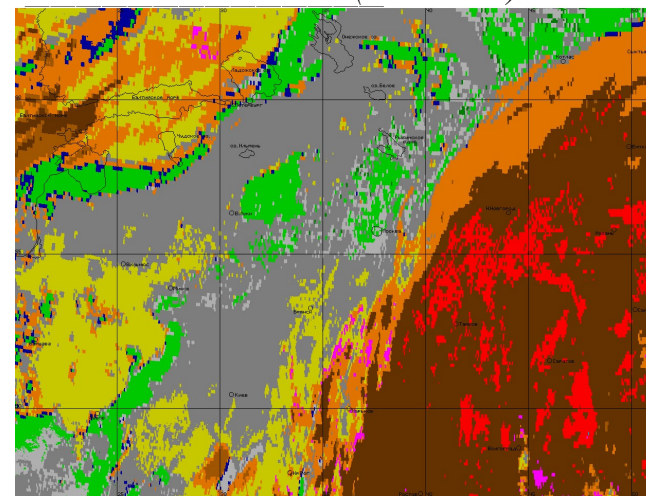
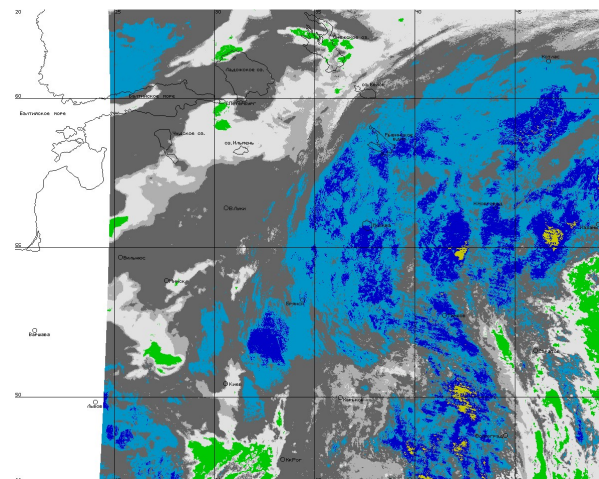
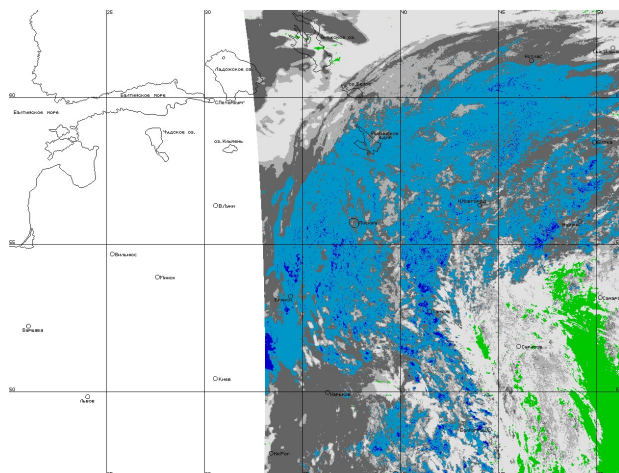


Рис. 11. Интенсивность осадков по спутниковым данным (6 октября 2019 г.)
AVHRR-Ex (05:56 BCB) *MSUMR-Ex (06:16 BCB)*



SEVIRI-0-Ex (05:45 BCB)

SEVIRI-0-NCEP (05:45 BCB)

SEVIRI-415-Ex (05:45 BCB)

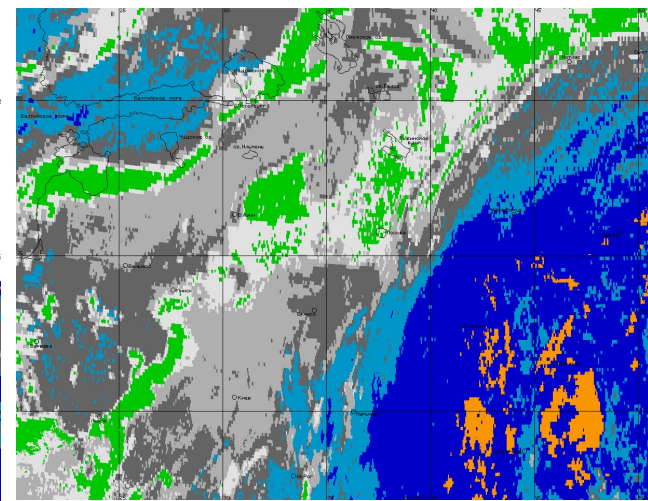
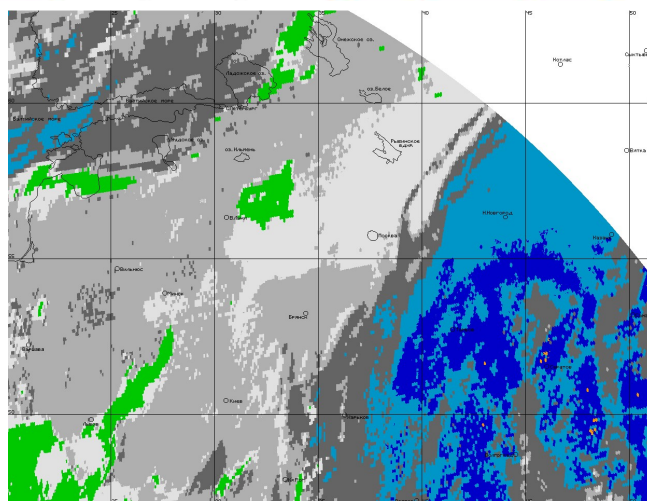
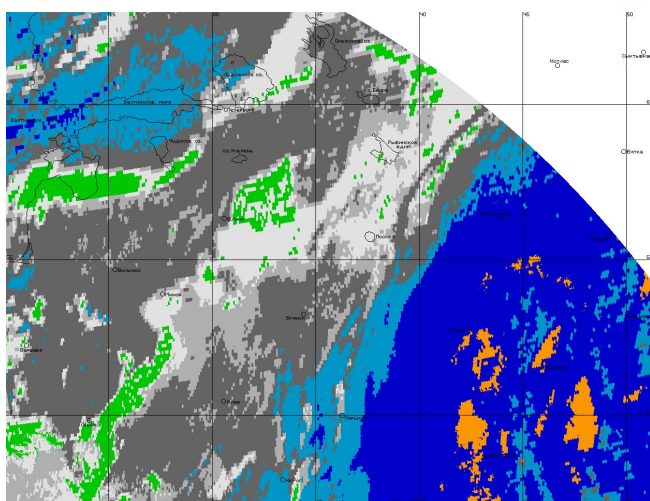
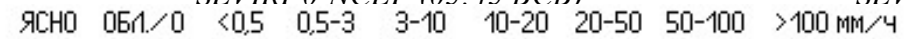
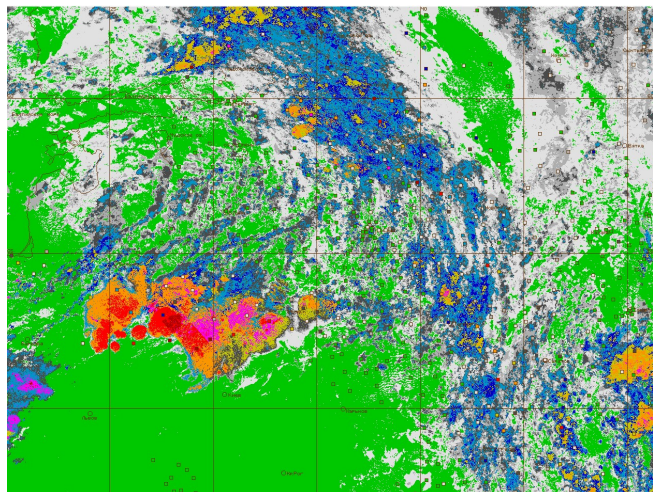


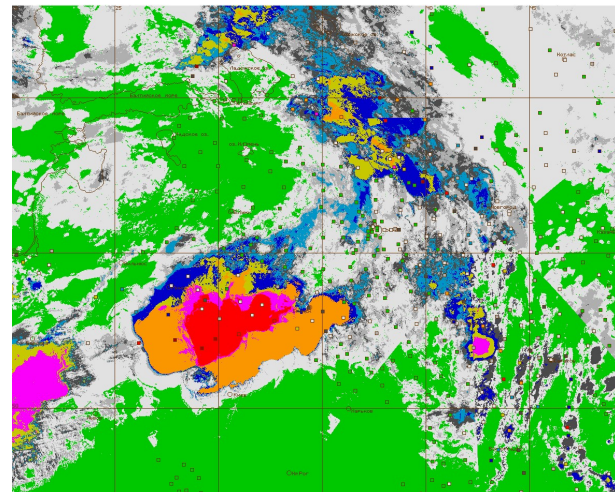
Рис.12. Суточные суммы осадков (1.07.2019). Дополнительно нанесены наземные измерения $\Sigma I_{\text{сут}}$



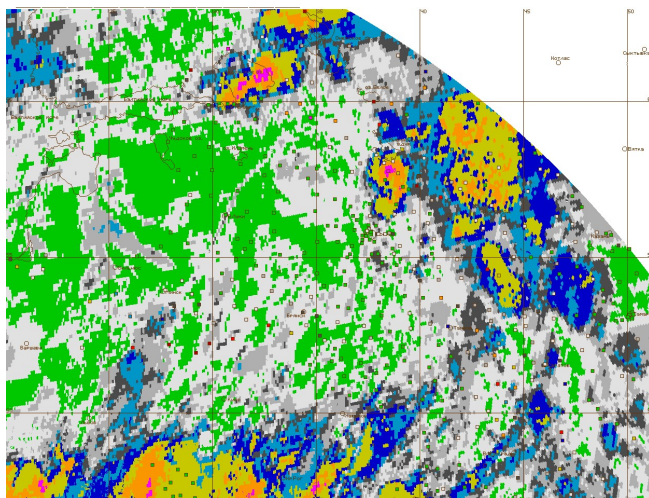
AVHRR-Ex



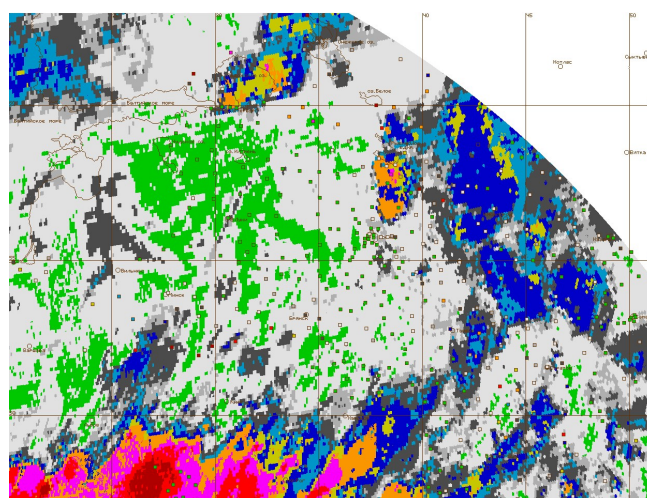
MSUMR-Ex



SEVIRI-0-Ex



SEVIRI-0-NCEP



SEVIRI-415-Ex

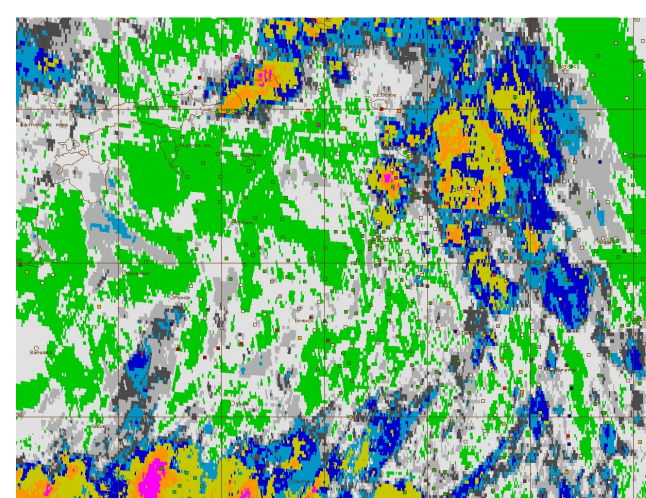


Рис. 13. Месячные суммы осадков, полученные разными вариантами КПМ (февраль 2019 г.)

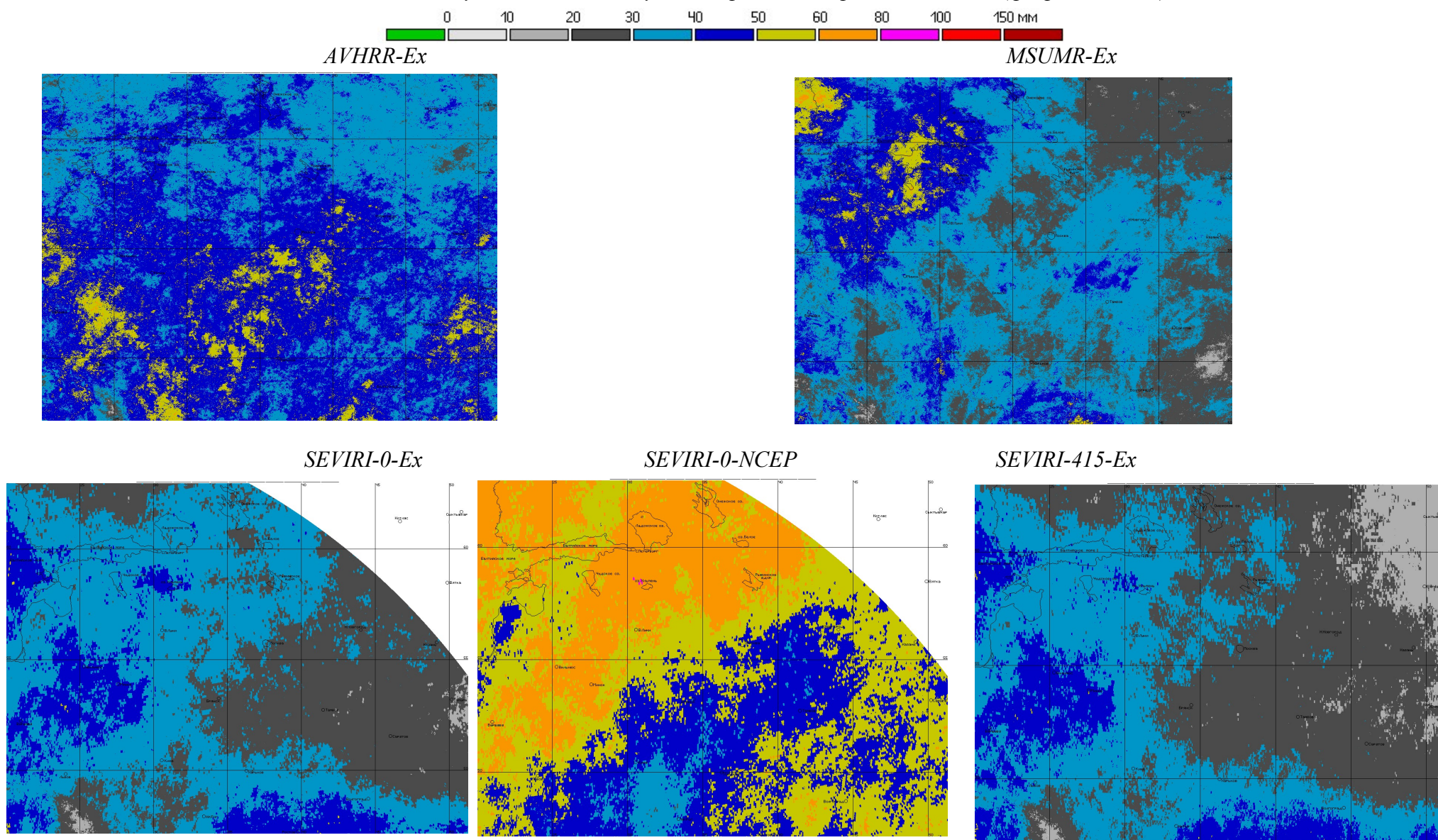
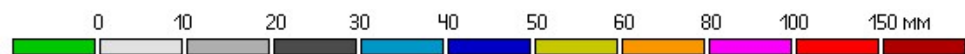
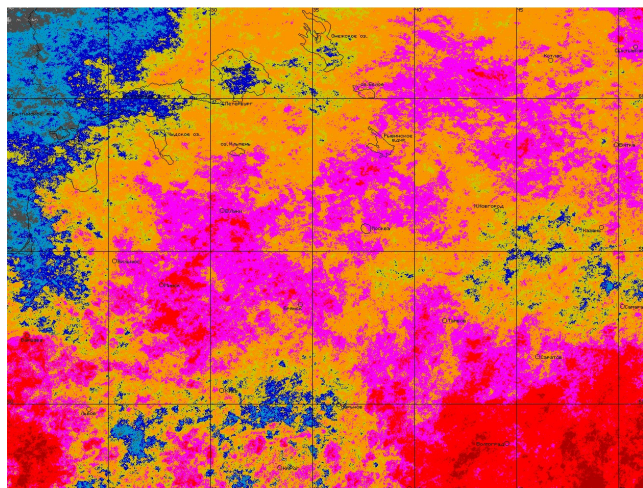


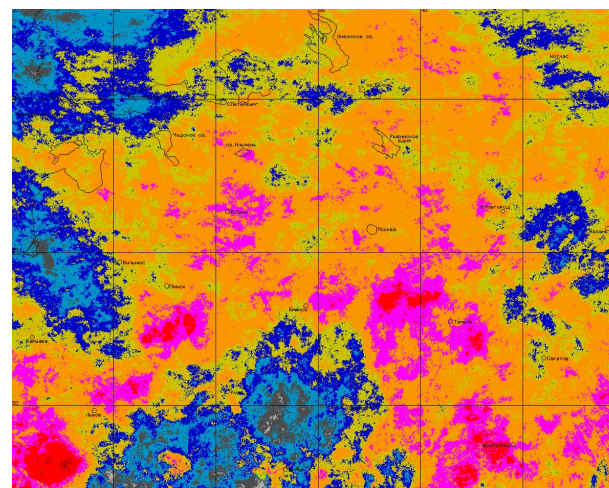
Рис. 14. Месячные суммы осадков, полученные разными вариантами КИМ (июль 2019 г.)



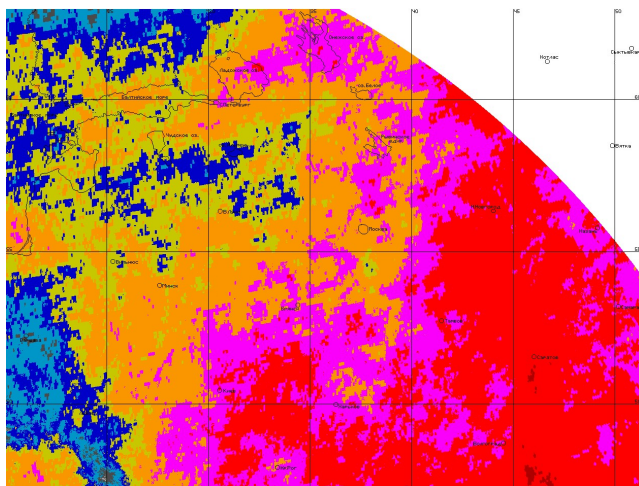
AVHRR-Ex



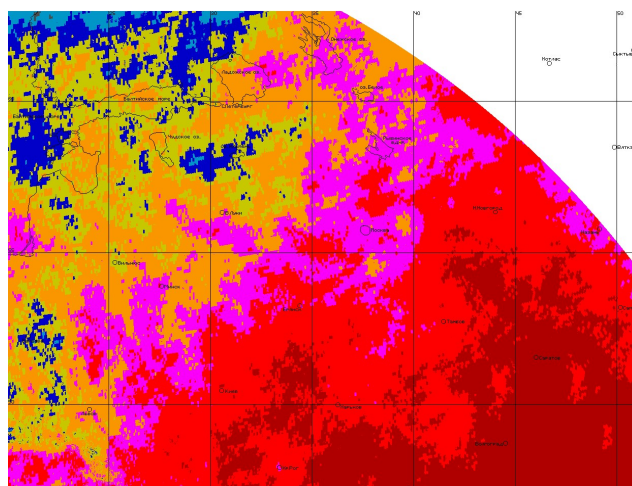
MSUMR-Ex



SEVIRI-0-Ex



SEVIRI-0-NCEP



SEVIRI-415-Ex

