

Введение

Спутниковые наблюдения за облаками применяются не только для анализа и прогноза погоды, но и в климатических исследованиях. Так, среднее количество общей облачности (КОО) является важной характеристикой климата и общей циркуляции атмосферы (Мазин, Хржан, 1989), т.к. от него зависит планетарное альbedo и, следовательно, радиационный баланс, который связан с тепловым и водным балансами (Stengel et al., 2015).

В разных странах успешно эксплуатируются различные системы обработки и классификации спутниковых многоспектральных изображений для детектирования облачности (например, в рамках проектов SAF NWC и SAF CM EUMETSAT (<http://www.cmsaf.eu>)), на базе работы которых создаются архивы спутниковых наблюдений за облачностью (например, ISCCP и др.) (Чернокульский, Мохов, 2009). Высокая периодичность получения информации об облачном покрове по данным SEVIRI/Meteosat и приуроченность её к заданным временным интервалам позволяет использовать её для глобального мониторинга облачного покрова.

В данной работе рассмотрены возможности использования для климатических исследований созданной автором в НИЦ «Планета» комплексной пороговой методики (КПМ) пописельной автоматической классификации данных измерений радиометра SEVIRI с геостационарных спутников серии Meteosat, которая в круглосуточном режиме детектирует облачность и определяет параметры облачного покрова, осадков и опасных явлений погоды (Волкова, Успенский, 2010) для всей зоны обзора SEVIRI/Meteosat независимо от состояния подстилающей поверхности при угле спутникового визирования (viz) не более 7,7°.

Описание КПМ (детектирование облачной маски)

КПМ детектирует облачность над сушей, водной и снежно-ледовой поверхностями, в т.ч. в горных условиях, без априорного задания маски «суша/вода» и дополнительных сведений о снежно-ледовом покрове. Круглосуточно выделяются 2 класса: «облачно» и «безоблачно», а в светлое время суток класс «безоблачно» дополнительно разделяется на 5 подклассов: «суша без снега», «вода», «снег/лед», «льды» и «дым».

Для этого КПМ круглосуточно использует информацию о радиационной температуре в каналах 4-7, 9, 10 ($\lambda=3,9, 6,2, 7,3, 8,7, 10,8, 12,0$ мкм), а в светлое время (высота солнца над горизонтом (h_0) более 0°) дополнительно к ней – об альbedo в каналах 1-3 ($\lambda=0,6, 0,8$ и 1,6 мкм) для уточнения состояния подстилающей поверхности, а также распознавания солнечного блика на воде и облачности над водой. В пороговом решающем правиле помимо значений альbedo ($A_{0,6}, A_{0,8}$ и $A_{1,6}$) и радиационной температуры ($T_{3,9}, T_{6,2}, T_{7,3}, T_{8,7}, T_{10,8}$ и $T_{12,0}$), также используются их разности ($T_{3,9}-T_{10,8}$), ($T_{12,0}-T_{8,7}$), ($T_{7,3}-T_{6,2}$), ($T_{10,8}-T_{12,0}$) и ($A_{0,6}-A_{0,8}$). Пороговые значения предикторов задаются в КПМ в виде эмпирически полученных функциональных зависимостей от h_0 , номера календарного дня от начала года, приземной температуры воздуха, температуры на стандартных барических уровнях, атмосферного давления на уровне моря, температуры воздуха, приведенной к уровню моря и максимальной в атмосферном столбе, viz, географической широты, высоты места над уровнем моря и др.

Изначально все пиксели считаются безоблачными и задача КПМ – обнаружить облачные. Алгоритм для выделения облачной маски представляет собой последовательное прохождение серии из нескольких тестов (каждый тест может содержать несколько решающих правил). Пиксел считается причисленным к классу «облачно», если пройден хотя бы один тест, но полностью. Если не пройден ни один тест целиком – пиксел остаётся безоблачным. Далее в КПМ (после расчета температуры и высоты верхней границы облачности (ВГО)) для облачных пикселов осуществляется их проверка на соответствие высоте ВГО ($h_{ВГО}$) высоте места над уровнем моря. Облачные пиксели с $h_{ВГО} \leq 50$ м над подстилающей поверхностью причисляются к безоблачным и в светлое время суток для них проводится классификация на 5 подклассов.

Однако получаемые по данным SEVIRI/Meteosat оценки КОО для небольших территорий не являются равноценной заменой аналогичным оценкам, выполненным по результатам наземных наблюдений на метеостанциях, из-за более грубого пространственного разрешения спутниковой информации (проблема частично заполненных облачностью пикселов). Кроме того, спутниковые оценки КОО растут (по объективным причинам) с увеличением viz из-за ухудшения спутникового разрешения и др. причин. Поэтому спутниковые оценки облачного покрова по данным SEVIRI/Meteosat всегда будут несколько выше аналогичных наземных (Stengel et al., 2015).

Использование КПМ для климатических оценок облачного покрова

Таблица 1. Оценки CFC (%), выполненные на основе различных архивов

регион	архивы					
	ISCCP ¹	другие архивы ²	наземные наблюдения ³	модели ⁴	КПМ ⁵ , 2006-2010 гг.	КПМ ⁵ , 2016-2017 гг.
глобально	66	56-75	65	51-64	72	69
северное полушарие	64	53-74	62	52-62	67	65
южное полушарие	69	60-76	68	50-66	77	72
суша	57	41-69	55	43-55	60	-
океан	70	60-77	66-68	55-68	80	-

Примечание. 1 - (Чернокульский, Мохов, 2009), 2 – точная стояния Meteosat 0° в.д., 3 – точная стояния Meteosat 41,5° в.д.

Таблица 2. Оценки КОО (балл)

регион	климат ¹	КПМ ⁵ , 2006-2010 гг.
глобально	5,8	5,9
северное полушарие	5,3	6,4
южное полушарие	6,2	5,9
суша	4,4	5,0
океан	6,4	6,4

Примечание. 1 - (Семенов и др., 1991), 5 – точная стояния Meteosat 0° в.д.

В работе (Волкова, 2012) была показана возможность использования выходных продуктов КПМ для климатических исследований, в т.ч. изменчивости количества облачного покрова. Так, по результатам детектирования КПМ облачной маски можно оценивать глобальное количество облачности. Например, для каждого пикселя спутниковой информации за некоторый период времени суммируется количество случаев с облачностью и вычисляется среднее за этот период значение вероятности покрытия этого пикселя облачностью (аналог CFC – Cloud Fraction Cover) (см. рис. 1 (сутки), рис. 2 (месяц) и рис. 3 (год)). В табл. 1 приведены глобальные и субглобальные оценки CFC, выполненные по данным разных источников. Анализ рис. 1-3 и табл. 1 показывает, что получаемые спутниковые оценки по данным разных архивов, в основном, находятся в хорошем согласии друг с другом, хотя и заметно различаются. Также можно рассчитать и среднее за период времени КОО для небольших фрагментов спутникового изображения (например, размером 4x4 пикселя), а потом суммировать для больших территорий (см. рис. 4 и табл. 2). Исследования автора показывают, что, в целом, получаемые КПМ оценки КОО находятся в основном согласии с климатом по данным разных авторов (Мазин, Хржан, 1989; Хромов, Мамонтова, 1974; Семенов и др., 1991).

При сравнении табл. 1 и 2 видно, что значения КОО оказываются ниже CFC (соответственно ~60 и ~70 % для всего круга обзора SEVIRI/Meteosat). По результатам оценок КПМ за 2006-2010 и 2016-2017 гг. (см. также (Волкова, 2012) и рис. 4-6, 7-а и 8) (весь круг обзора SEVIRI/Meteosat (точка стояния 0° в.д.)) в ночное время значения CFC и КОО заметно уменьшаются, особенно над сушей, по сравнению с дневными условиями. Зимой над пустынями CFC и КОО также значительно ниже, в целом, чем летом, а в высоких широтах – наоборот, выше. Восточное полушарие менее «облачно», чем западное, из-за большей доли суши, над которой количество облачности практически всегда ниже, чем над океанами. Сезонные изменения количества облачности сильнее выражены для северного и южного полушарий, чем для восточного и западного. Над сушей суточный ход облачности лучше выражен, чем сезонный, а над океанами одинаково слабо и суточный и сезонный. Поле облачности ВЗК (интритропическая зона конвергенции) в течение года смещается в «летнее» полушарие.

Зонально-средний ход значений CFC и КОО для разных выборок архива 2006-2010 гг. практически совпадает: 3 максимума (около экватора и полюсов) и 2 минимума (около 30°) (см., например, рис. 7-б). Разница между максимальными и минимальными значениями составляет 40-50 %. Для географических регионов с высоким влагосодержанием атмосферы разница между ночными и дневными значениями CFC и КОО выше (в среднем, на 5 %), чем для «сухих» районов (почти не меняется). Над океанами значения CFC и КОО всегда выше (на 5-10 %), чем для суши, особенно для «сухих» тропиков (более чем на 15 %).

Пожим образом ведут себя и значения КОО и CFC, полученные за 2017 г. для данных SEVIRI/Meteosat с точкой стояния 41,5° в.д. Все это хорошо согласуется с другими климатическими исследованиями, например, (Мазин, Хржан, 1989; Семенов и др., 1991) и архивами (Чернокульский, Мохов, 2009).

Ограничения использования КПМ

Сопоставление результатов детектирования облачности КПМ по данным радиометра SEVIRI/Meteosat с наземными метеонаблюдениями показывает, что крупные облачные массивы и обширные безоблачные пространства детектируются хорошо. Ошибки могут возникать в следующих случаях:

- размеры облаков или просветов в облаках меньше размера пикселя. При этом в зависимости от размера облака и/или просвета пиксел причисляется к классу «облачно» или «безоблачно» и количество облачности увеличивается или уменьшается по сравнению, например, с наземными метеонаблюдениями;
- «снежный шлейф» за облаком иногда может ошибочно детектироваться как облачность или снежный покров, хотя из-за достаточно высоких значений приземных температур воздуха он не образуется, т.к. быстро тает (характерно для переходных сезонов);
- в дневное время на границе «вода/суша» при большой изрезанности береговой линии или небольших размерах водоемов (часто при наличии снежно-ледового покрова или большой амплитуде температур на границе «вода/суша») могут детектироваться отдельные мелкие облака (размером 1-3 пикселя), повторяющие береговую линию в виде пунктирной линии (просветы 3-5 и более пикселов). Также в ряде случаев «лишняя» облачность может появляться в регионах, расположенных ниже и существенно выше (горы) уровня Мирового океана, а также при наличии температурной инверсии (в ночное время и в холодный период года). На появление «лишней» облачности могут также влиять неточности и грубый масштаб карт рельефа;
- могут теряться тонкие С₁, С₂ и А₂ на фоне подстилающей поверхности, при этом они обычно хорошо видны на фоне другой нижележащей облачности;
- при высоком содержании в атмосфере водяного пара, особенно в зимнее время над снежно-ледовым покровом или в ночное время над водой может ошибочно детектироваться облачность типа слоистой;
- в ночное время летом КПМ может несколько завышать количество облачности над Северной Африкой из-за причисления к водяным облакам пылевых;
- неточности полей анализа и прогноза температуры воздуха и атмосферного давления, а также большое удаление срока спутникового наблюдения от срока, для которого получена дополнительная информация.

Несмотря на это, в целом, точность КПМ достаточно высока. Она практически не зависит от времени суток и слабо зависит от синоциклопической ситуации и состояния подстилающей поверхности. Ошибок следует ожидать при высоком содержании в атмосфере водяного пара или температурной инверсии, в ночное или зимнее время, при больших углах спутникового визирования, а также на границе «суша/вода», над снежным покровом или в горных районах, при наличии С₁, С₂ и А₂ и полей мелких С₁ и А₂. Однако, в целом, суммарные ошибки детектирования облачной маски никогда не превосходят 5 % (для полного изображения) и 10 % (для больших фрагментов) площади всего изображения, в подавляющем большинстве случаев они составляют соответственно менее 1 и 5 %.

Сопоставление КПМ с зарубежными аналогами

В работах (Волкова, 2011; Волкова, Успенский, 2015) автором было проведено сопоставление результатов детектирования облачной маски КПМ и методикой, используемой в EUMETSAT SAF NWC и SAF (<http://www.cmsaf.eu>), а также сравнение их с наземными наблюдениями.

Обе пороговые методики (КПМ и EUMETSAT) помимо многоканальной спутниковой (пороговые значения являются сложными функциями, зависящими от разных параметров) применяют схожую дополнительную информацию: вертикальное распределение температуры воздуха в атмосфере и атмосферное давление на уровне моря, карты рельефа. Однако методика EUMETSAT дополнительно использует вертикальное распределение влажности воздуха, маску «суша-вода» и карту типа подстилающей поверхности, а также результаты расчетов радиационной модели.

Обе методики имеют схожие трудности при распознавании облачных пикселов над неоднородной подстилающей поверхностью, в случае с температурной инверсией, а также при детектировании мелкой кучевой и низкой тёмной облачности. На точность влияют пространственное и временное разрешение дополнительной информации, а также её адекватность, viz, изменение освещенности и др. При этом КПМ лучше детектирует облачность в высоких широтах зимой и вдоль береговой линии, а методика EUMETSAT – над водной поверхностью. КПМ может находить «лишнюю» облачность в ночное и, реже, дневное время над Сахарой (пылевые облака детектируются как водяные), а методика EUMETSAT «терять» относительно тонкую перистообразную облачность в тропиках (15-30 %) и недооценивает КОО в сумерках (до 10 %), но переоценивает КОО над снежно-ледовой (до 30 %) и водной поверхностью (до 15 %) (Stengel et al., 2015).

Сопоставление оценок КОО, полученных по данным SEVIRI с помощью КПМ и методики EUMETSAT, показывает, что различия в оценках облачного покрова составляют, в среднем, 12 % (Волкова, 2011). При этом по КПМ детектируется больше облачности в низких широтах и меньше – в высоких, по сравнению с EUMETSAT. В целом, у КПМ меньше амплитуда dev в пределах зоны видимости SEVIRI, хотя среднее значение dev несколько больше: в среднем для круга обзора SEVIRI/Meteosat dev=10-15 % (до 20 %) у КПМ и dev=5-10 % (до 30 %) у EUMETSAT в зависимости от способа валидации (Bojanowski J. et al., 2018).

Требования пользователей к точности информации об облачном покрове составляют dev=5-10 %, rms=20 % (Bojanowski J. et al., 2018; Stengel et al., 2015). Таким образом, обе методики, в основном, удовлетворяют предъявляемым к ним требованиям.

Заключение

Многочисленные оценки качества выходных продуктов КПМ (по данным SEVIRI/Meteosat) по облачной маске при сопоставлении их с наземными наблюдениями за облачностью, климатической информацией и зарубежными аналогами показывает (Волкова, Успенский, 2015), что они вполне удовлетворяют предъявляемым к ним пользователям требованиям и могут использоваться как дополнение к наземным наблюдениям на метеостанциях за состоянием облачного покрова для макромасштабного мониторинга и климатических исследований облачного покрова (особенно в районах с редкой наземной сетью метеорологических станций).

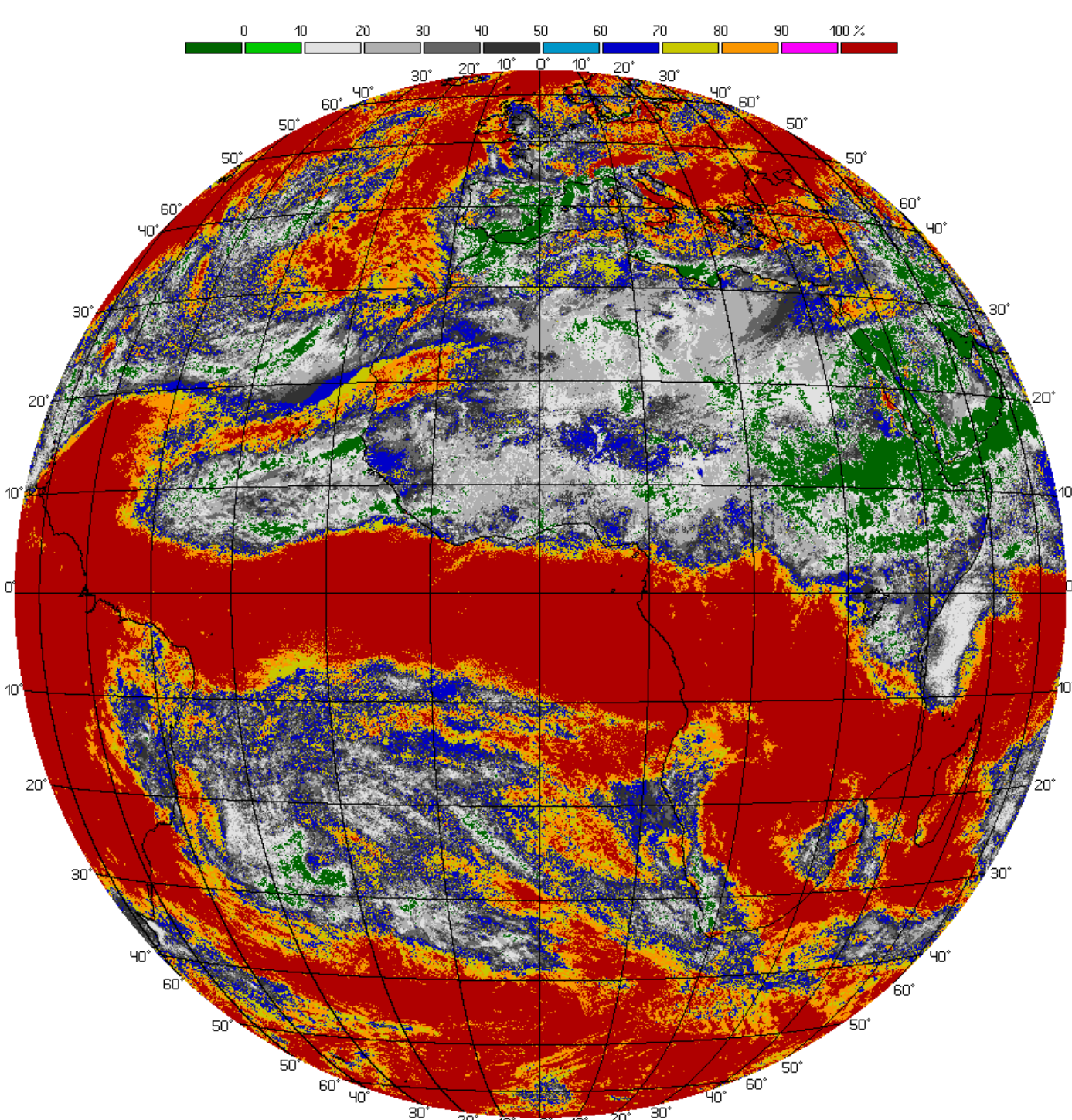


Рис. 1. Среднее за сутки CFC (5.01.2017 г., SEVIRI/Meteosat-10)

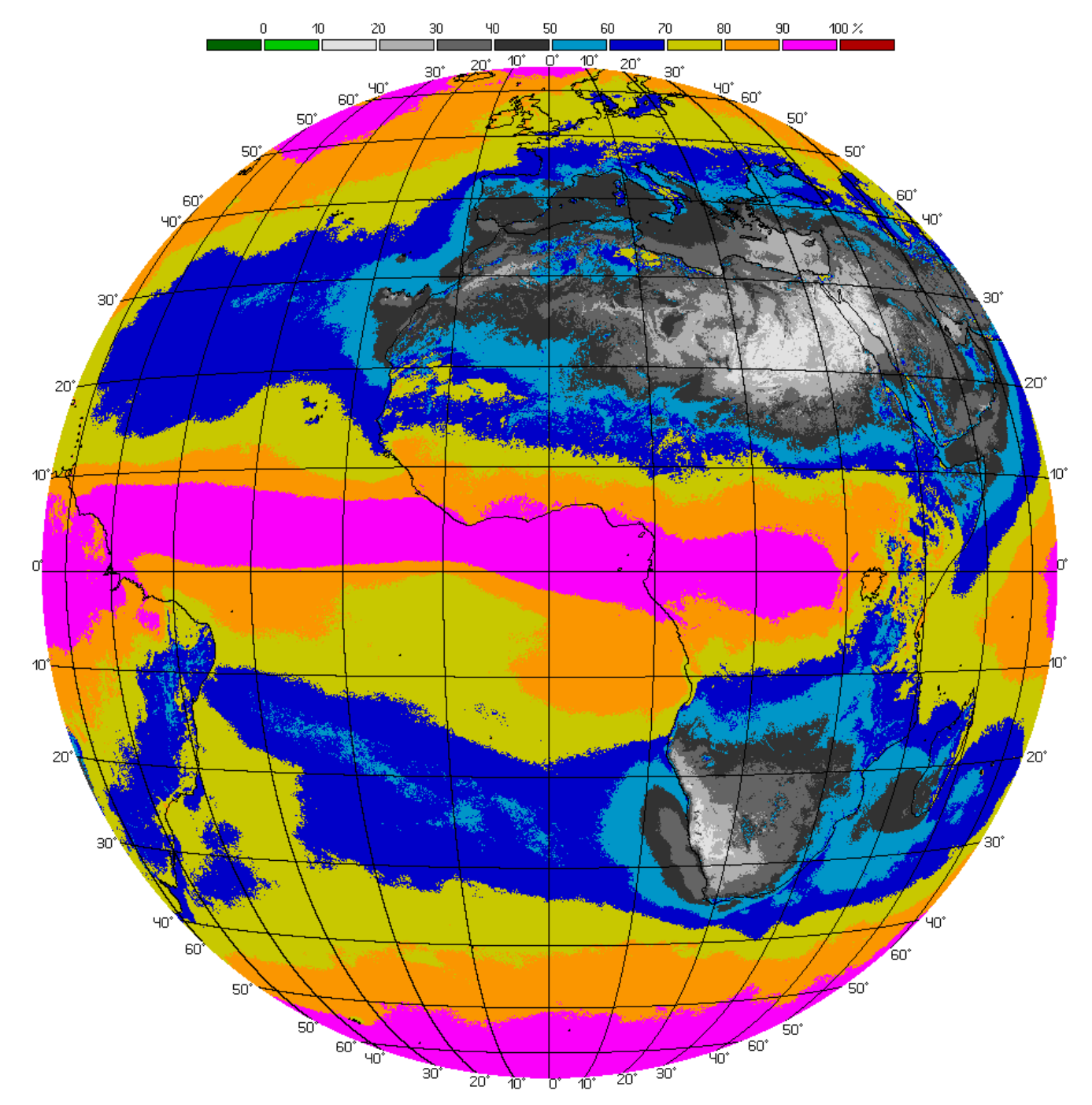


Рис. 2. Среднее за месяц CFC (август 2017 г., SEVIRI/Meteosat-8)

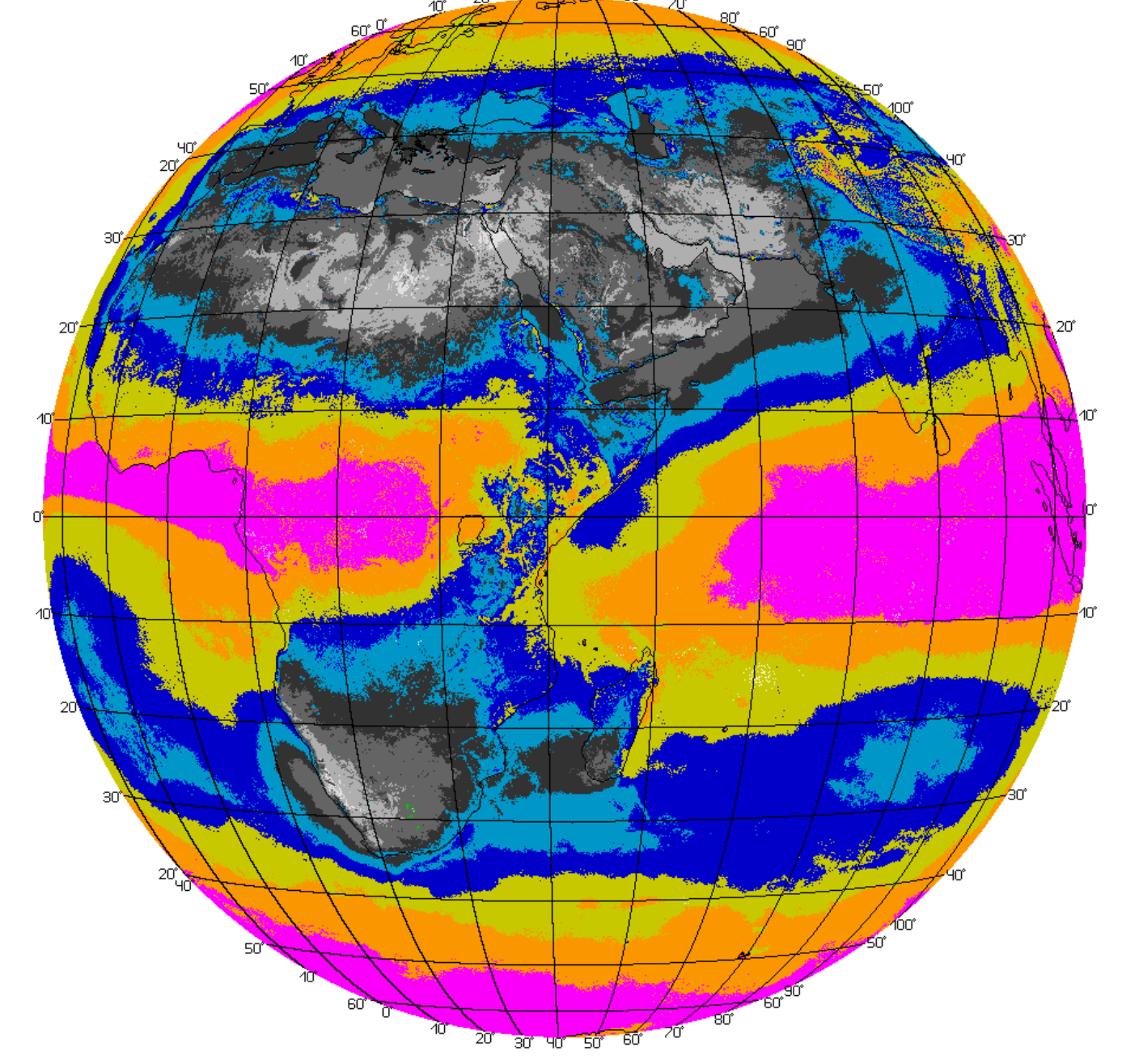


Рис. 3. Среднее за год CFC (2016 г., SEVIRI/Meteosat-10 (вверху) и 2017 г., SEVIRI/Meteosat-8 (внизу))

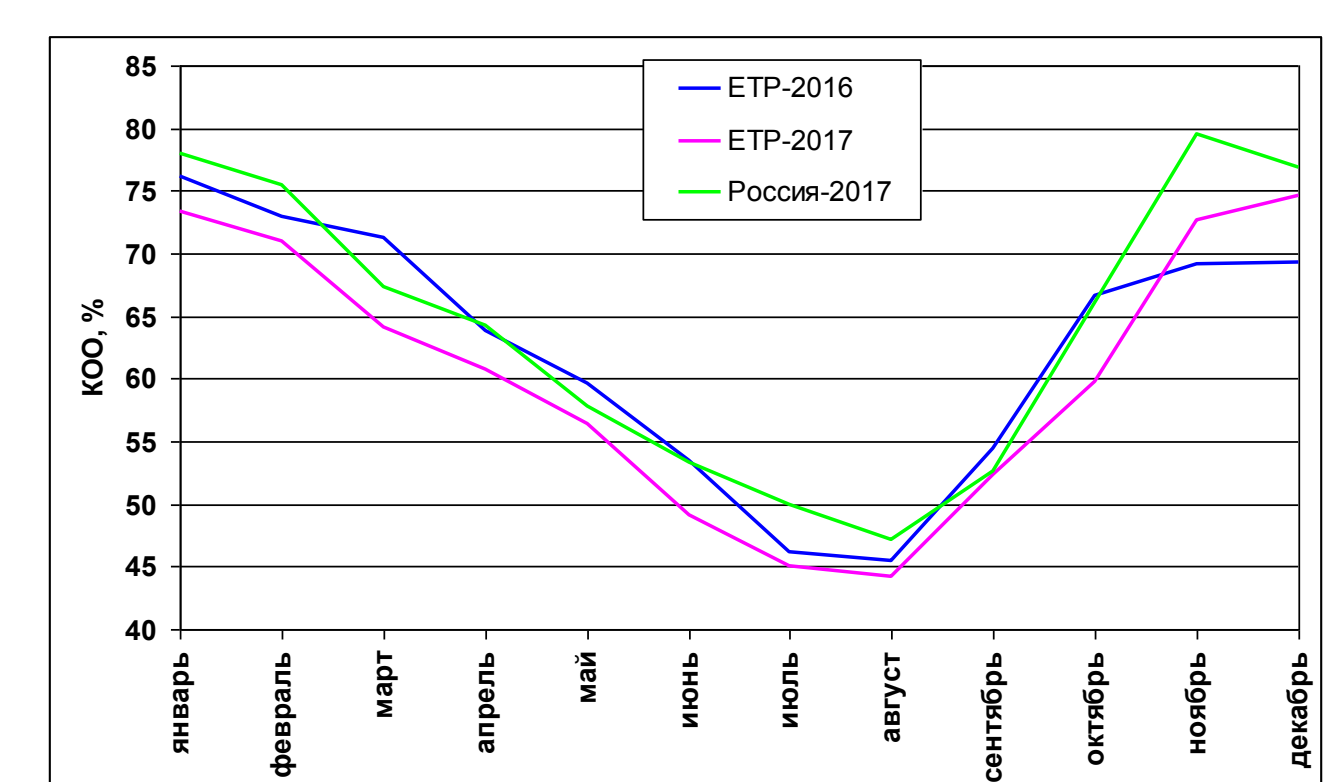


Рис. 4. Годовой ход значений КОО по данным радиометра SEVIRI КА Meteosat для ETRP и сопредельных стран (точка стояния 0° в.д.) и для России и сопредельных стран (точка стояния 41,5° в.д.)

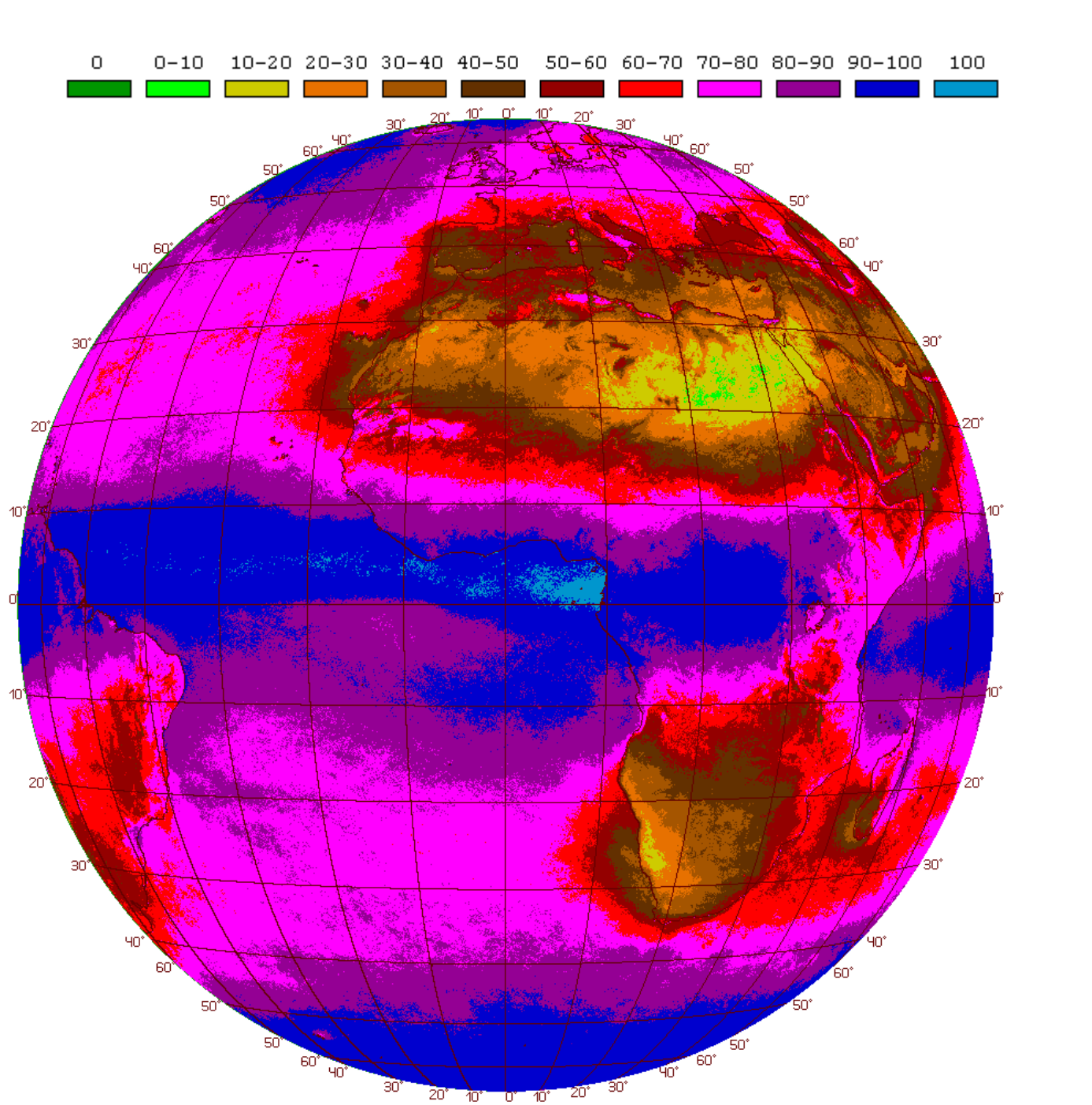


Рис. 5. CFC (%), выборка 2006-2010 гг., точка стояния КА Meteosat 0° в.д.

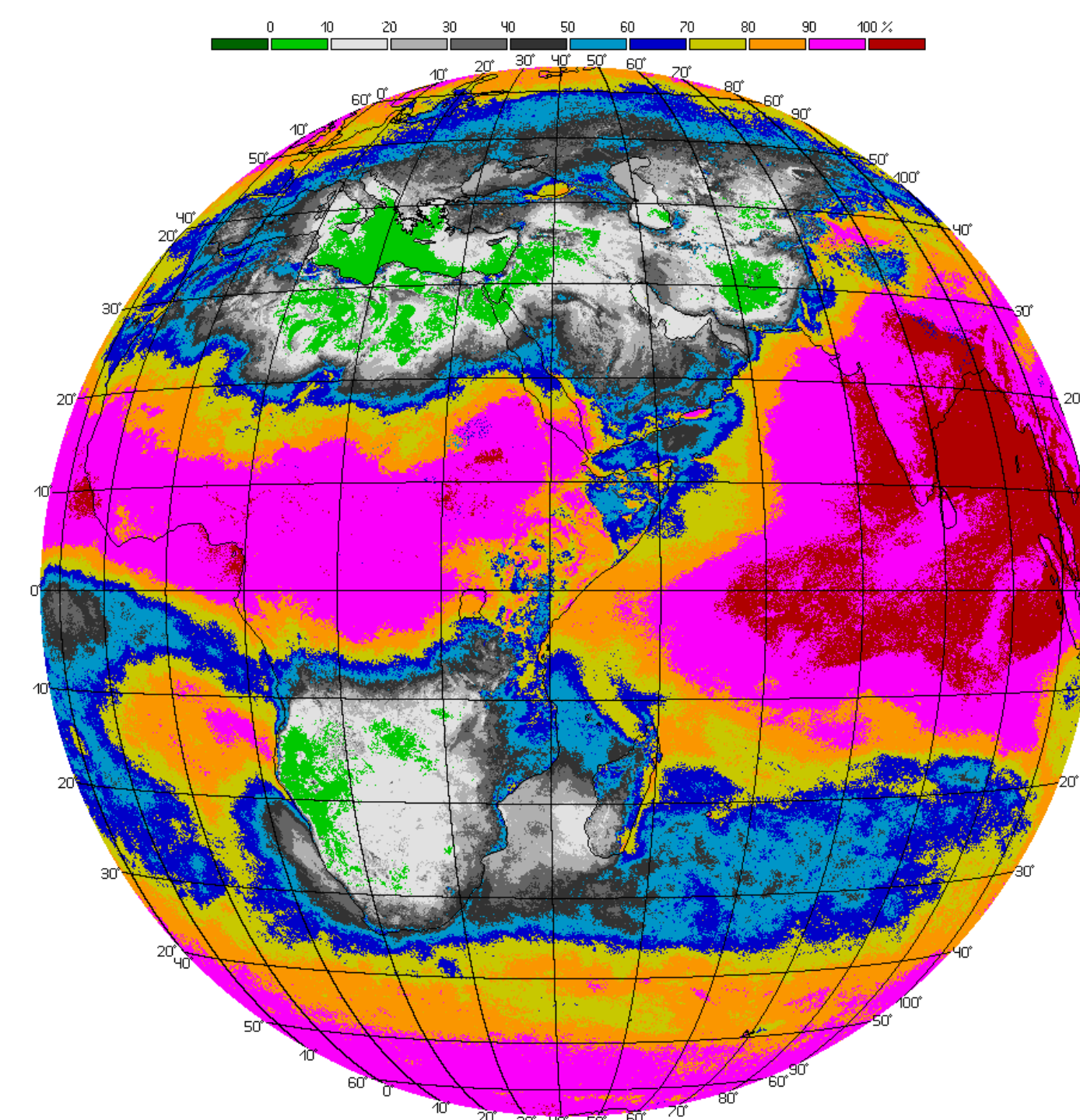


Рис. 6. Среднее за месяц CFC (август 2017 г., SEVIRI/Meteosat-8)

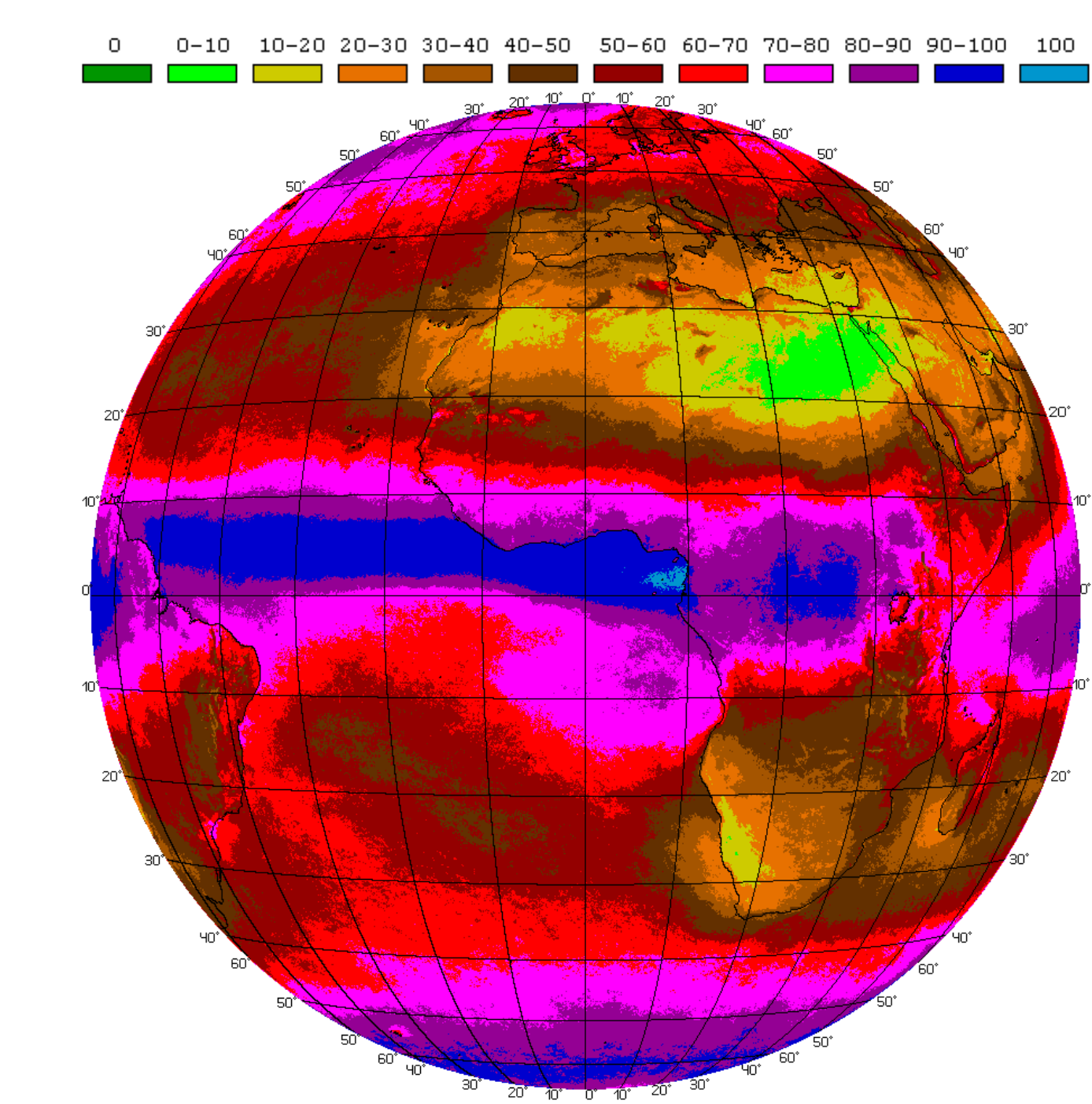


Рис. 7. Среднее за 2006-2010 гг. КОО (SEVIRI/Meteosat-8, -9)

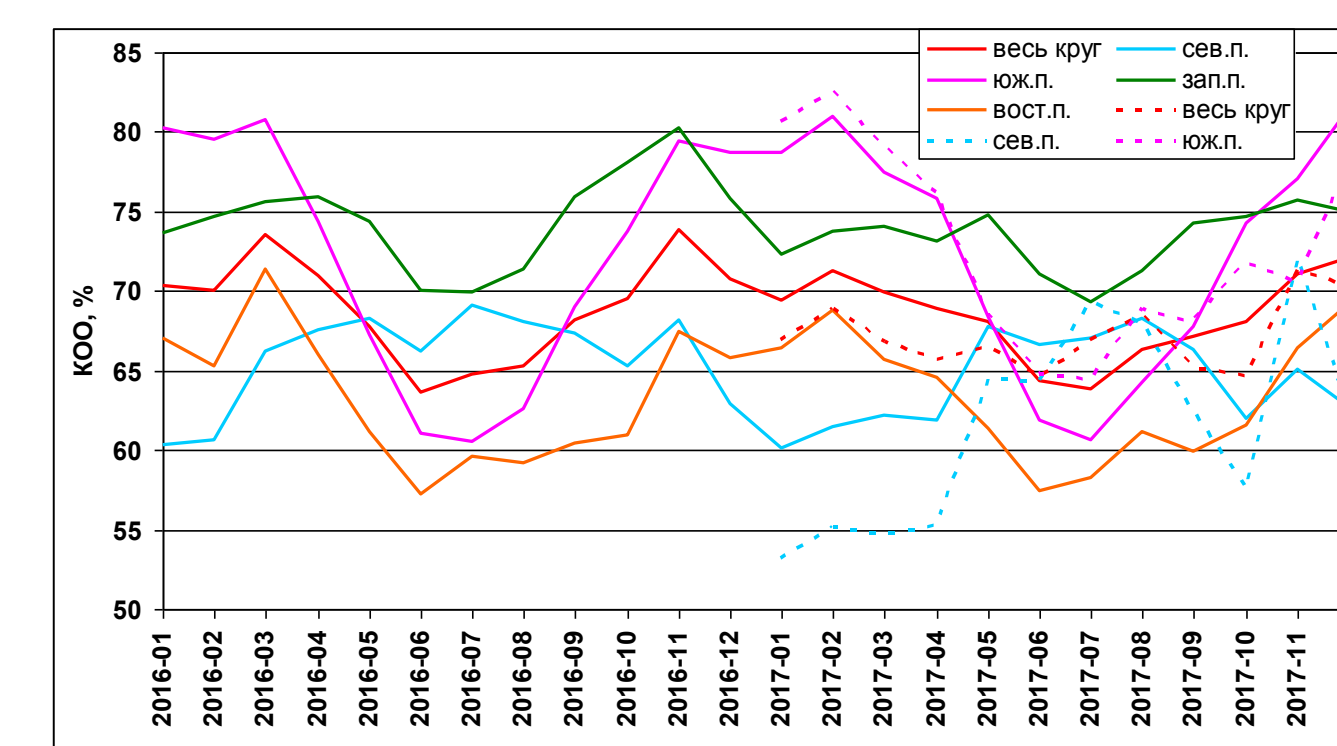


Рис. 8. Годовой ход значений КОО для всего круга обзора радиометра SEVIRI/Meteosat (площадная линия – точка стояния 0° в.д., пунктирная линия – точка стояния 41,5° в.д.), а также для северного, южного, западного и восточного полушарий

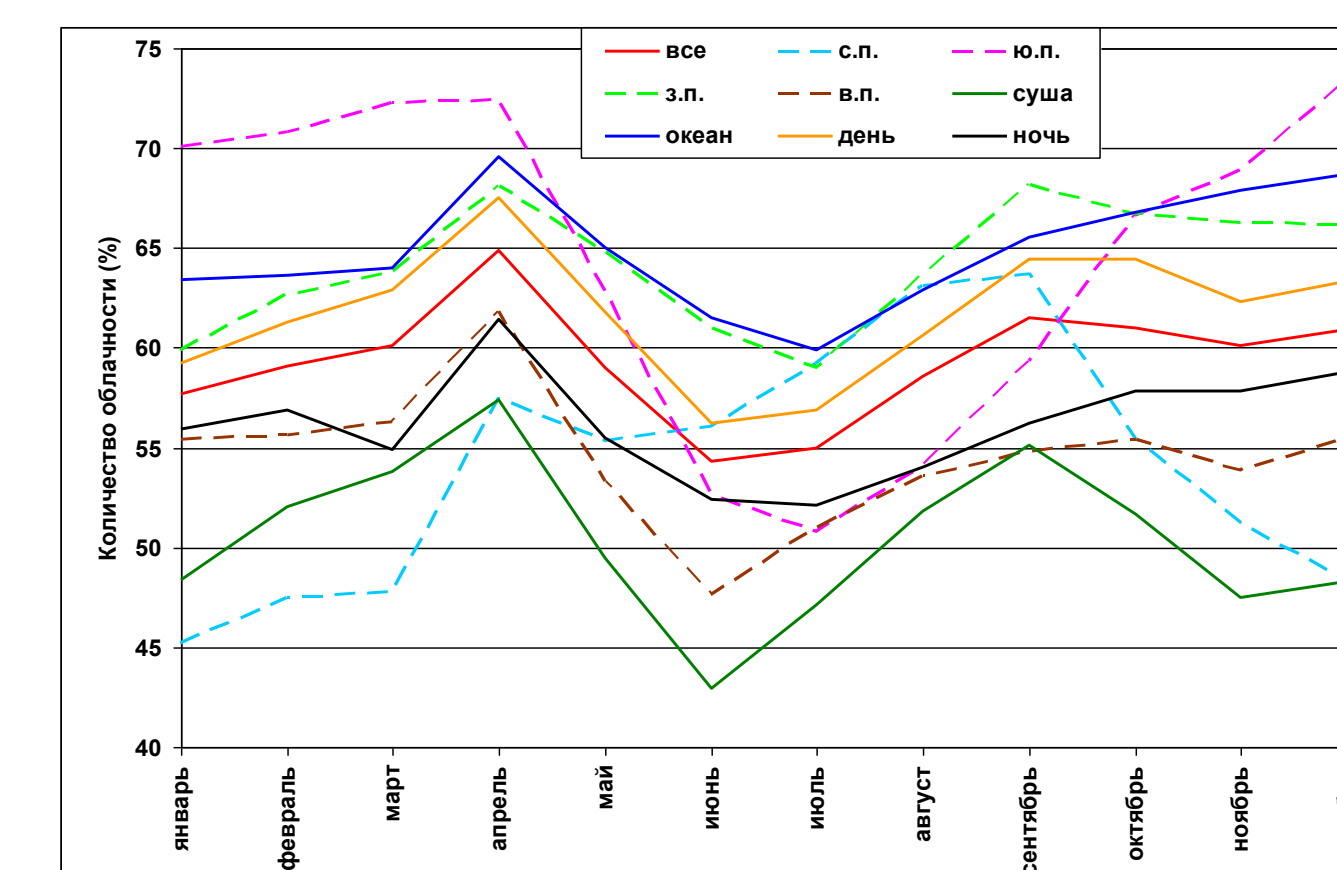


Рис. 9-а. Годовой ход количества облачности (КОО, %), выборка 2006-2010 гг., точка стояния КА Meteosat 0° в.д.

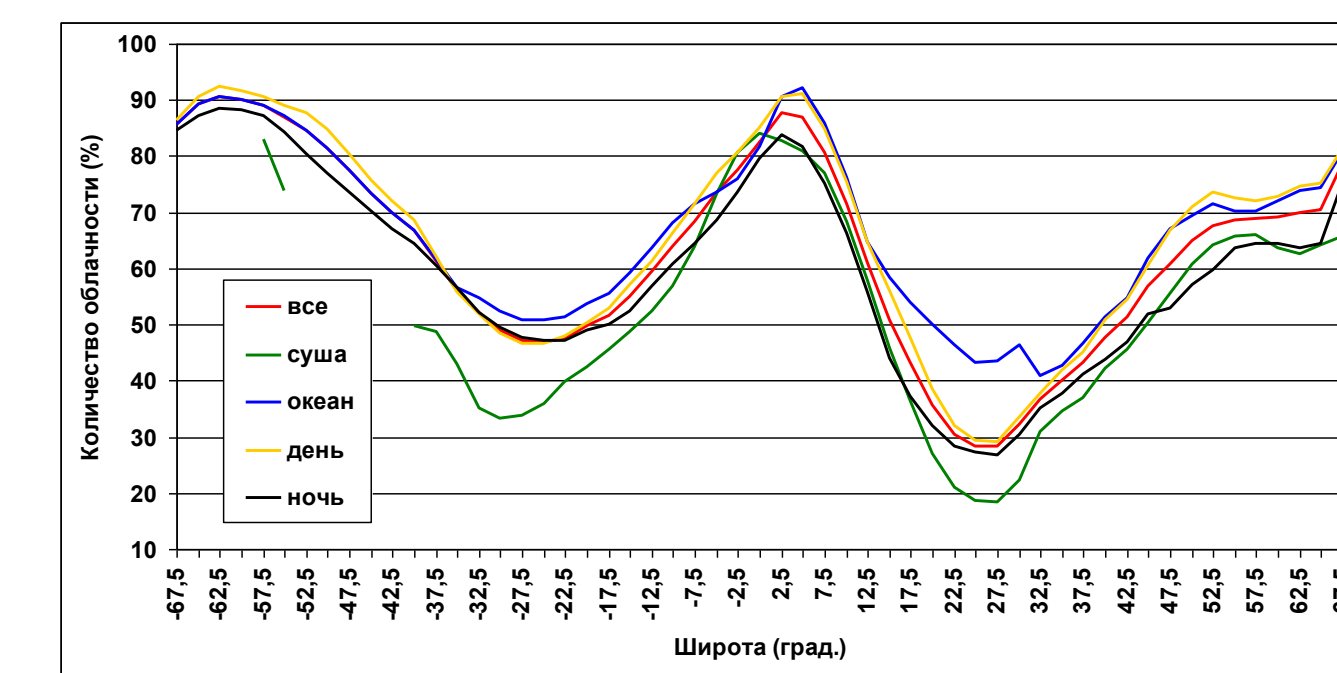


Рис. 7-б. Зонально-средний ход количества облачности (КОО, %), выборка 2006-2010 гг., точка стояния КА Meteosat 0° в.д.

Литература

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.

Волкова Е.В. Сравнительный анализ работоспособности двух пороговых методик автоматического детектирования облачности и оценки параметров облачного покрова по данным радиометра SEVIRI с ИСЗ Meteosat-9 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 4. С. 54-60.

Волкова Е.В., Успенский А.Б. Оценки параметров облачного покрова по данным геостационарного МИСЗ Meteosat-9 круглосуточно в автоматическом режиме // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7. № 3. С. 16-22.

Волкова Е.В., Успенский А.Б. Оценки параметров облачного покрова и осадков по данным сканирующих радиометров полярно-орбитальных и геостационарных метеоспутников // Исследования Земли из космоса, 2015, №5, с.30-43.

Мазин И.П., Хржан А.Х. Облака и облачная атмосфера. Справочник // Л.: Гидрометиздат, 1989. 647 с.

Семенов Ю.С., Авдоинин С.И., Борисенко Е.П., Волковичев О.А., Петров Н.Н., Рейтенбах Р.Г., Старнов В.И., Чернокулов А.А. Атмосфера. Справочник // Л.: Гидрометиздат, 1991. 510 с.

Хромов С.П., Мамонтова Л.И. Метеорологический словарь // Л.: Гидрометиздат, 1974. 568 с.

Чернокульский А.В., Мохов И.И. Сравнение современных глобальных климатологий облачности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2009. Т. 6. № 2. С. 235-243.

Bojanowski J., Sioki R., Duguay-Tetzlaff A., Finkensieper S., Hollmann R., Werscheck M. CM SAF. Validation report. Meteosat cloud fractional cover (COMET). Edition 1. SAF/CM/MeteoSwiss/VALMET/CFC. Issue 1.2. January 29, 2018. doi: 10.5676/EUM_SAF_CM/CFC_METEOSAT/V001. 64 pp.

Stengel M., Karlsson K.G., Meirink J.F., Hollmann R., Werscheck M. CM SAF. Product user manual. Clouds. SAF/CM/DWD/PUM/CLOUDS. Ver. 1.8. February, 2015. 99 pp.