

Автором в «НИЦ «Планета» была создана Комплексная пороговая методика (КПМ) автоматического круглогодичного определения параметров облачного покрова, осадков и опасных явлений погоды (ОЯП) для Европейской территории России (ЕТР) и сопредельных стран по данным измерений альбедо и радиационной температуры в 5ти каналах радиометра AVHRR с полярно-орбитальных (п/о) метеоспутников серии NOAA (Волкова, 2013). Результаты валидации выходных продуктов КПМ по данным AVHRR для региона «ЕТР» данными наземных наблюдений на метеостанциях и метеорологическом радаре, климатическими оценками и аналогичными оценками КПМ по данным радиометра SEVIRI с геостационарных метеоспутников серии Meteosat показали, что получаемые оценки параметров облачности, осадков и ОЯП удовлетворяют предъявляемым к ним пользователями требованиям и сопоставимы по качеству с зарубежными аналогами (Волкова, 2014; Волкова, Успенский, 2009; Волкова, Успенский, 2015). На основе КПМ был создан специализированный программный комплекс («ЕТР» (Волкова, Успенский, Куларский, 2015)), позволяющий в автоматическом режиме не только классифицировать спутниковую информацию, но и валидировать (ежедневно и ежемесячно) выходные продукты климатических оценок и данными наземных наблюдений на метеостанциях.

Российский гидрометеорологический п/о спутник «Метеор-М» №2 имеет на борту аппаратуру (МСУ-МР) с похожими на радиометр AVHRR техническими характеристиками (однако МСУ-МР и AVHRR используют разные спектральные аппаратные функции для соответствующих каналов, кроме того, имеются погрешности бортовой калибровки МСУ-МР). Вариант КПМ, разработанный для данных AVHRR, был применен в неизменном виде к данным МСУ-МР. Сопоставление спутниковых (МСУ-МР и AVHRR) и наземных метеонаблюдений показало, что в некоторых случаях возникают очень серьезные ошибки классификации (например, при детектировании облачной маски) (Волкова и др., 2015). В результате, КПМ была адаптирована для данных МСУ-МР. Валидация нового варианта КПМ наземными метеонаблюдениями и климатическими оценками показала, что получаемые оценки параметров облачности, осадков и ОЯП, в основном, удовлетворяют предъявляемым к ним пользователями требованиям и сопоставимы по качеству с зарубежными аналогами и оценками КПМ по данным AVHRR (Волкова, 2017). В процессе валидации были выявлены некоторые недостатки информации МСУ-МР при сравнении с данными AVHRR, влияющие на качество классификации и непопадающие коррекции в новом варианте КПМ.

Исходные данные и критерии качества

Валидация была проведена для архива синхронных (разница во времени между сроками не более 5 мин) спутниковых (МСУ-МР и AVHRR) наблюдений для региона «ЕТР» (47,16-63,0° с.ш. и 20,0-50,0° в.д., разрешение 1' (0,01667°) по широте и 1,5' (0,025°) по долготе) для выборки с января 2015 г. по май 2018 г. (198 пар сроков). Сравнение проводилось отдельно для теплого (апрель-октябрь – «лето») и холодного (ноябрь-март – «зима») периодов года, а также для всей выборки 2015-2018 гг. Попытке сравнения измерений МСУ-МР в каналах 1, 2, 4 и 6 и соответствующие измерения AVHRR в каналах 1-5, т.е. $\lambda=0,6$ мкм ($A_{0,6}$), $\lambda=0,9$ мкм ($T_{1,0}$), $\lambda=3,7$ мкм ($T_{3,7}$), $\lambda=10,8$ мкм ($T_{10,8}$), $\lambda=12,0$ мкм ($T_{12,0}$), а также выходные продукты КПМ по общему покрову, осадкам и ОЯП. Рассчитывались: среднее, минимальное и максимальное значения по данным обоих приборов; $dev=|AVHRR-MSUMR|$ – среднее отклонение; $dev=|AVHRR-MSUMR|$ – среднее абсолютное отклонение; $SKO=(\Sigma(AVHRR-MSUMR)^2)/N$ – среднее квадратичное отклонение; $POD = (Probability\ of\ Detection)$ – вероятность правильного детектирования канала; $FAR = (False\ Alarm\ Rate)$ – вероятность ошибочного детектирования канала; $HR = (Hit\ Rate)$ – точность классификации; повторяемость значений dev по грациям. Результаты валидации показали следующее (см. также рис. и табл.).

Сопоставление измерений МСУ-МР и AVHRR

- 1) альбедо $A_{0,6}$.** В теплый период года измерения МСУ-МР завышают значения $A_{0,6}$ ($dev=9,2\%$) относительно аналогичных измерений AVHRR, а в холодный период года немного занижают – $dev=0,4\%$. В среднем за год $dev=13\%$, $SKO=18\%$. В ~20% случаев значения $dev \geq 20\%$. Т.е. вариабельность значений $A_{0,6}$ друг относительно друга у обоих приборов достаточно велика, особенно «зимой».
- 2) альбедо $A_{0,9}$.** «Зимой» измерения МСУ-МР занижают значения $A_{0,9}$ ($dev=11,4\%$) и немного завышают «летом» ($dev=-1,9\%$) относительно аналогичных измерений AVHRR. В теплый период года $dev=9,5\%$, $SKO=14\%$, а в холодный – $dev=14,5\%$, $SKO=20\%$. В 10% случаев «летом» и в 25% случаев «зимой» $dev \geq 20\%$. Т.е. вариабельность значений $A_{0,9}$ друг относительно друга у обоих приборов также велика, как и у $A_{0,6}$, особенно в холодный период года.
- 3) радиация альбедо ($A_{0,6}-A_{0,9}$).** Зависимость значений ($A_{0,6}-A_{0,9}$) от сезона менее выражена, однако «зимой» значения dev и SKO немного больше, чем «летом». В целом, значения ($A_{0,6}-A_{0,9}$) по данным МСУ-МР сильно занижены относительно аналогичных оценок по данным AVHRR – в среднем за год $dev=8,7\%$, $SKO=13\%$. В 95% случаев $-5\% \leq dev \leq 25\%$.
- 4) радиационная температура $T_{1,0}$.** Измерения МСУ-МР сильно занижают значения $T_{1,0}$ относительно AVHRR: в среднем за год $dev=8,6$ К (независимо от сезона). $dev=9,5-10$ К и $SKO=12-14$ К (в холодный период года больше, чем в теплый). В 10% случаев «летом» и в 25% случаев «зимой» $dev \geq 20$ К. В 98-99% случаев $dev > 10$ К.
- 5) радиационная температура $T_{3,7}$.** «Летом» значения $T_{3,7}$ регистрируются обоими приборами почти одинаково $dev=0,1$ К, «зимой» МСУ-МР немного завышает $T_{3,7}$ – $dev=0,9$ К. Однако значения dev и SKO больше в теплый период года (соответственно 4,4 К и 6,8 К), чем в холодный (соответственно 3,3 К и 4,9 К). В 95% случаев «зимой» и в 90% случаев «летом» $dev \leq 10$ К.
- 6) радиационная температура $T_{10,8}$.** Значения $T_{10,8}$ завышаются МСУ-МР всегда (в среднем за год $dev=1$ К) – в холодный период года заметно больше ($dev=1,6$ К), чем в теплый ($dev=0,4$ К). Однако значения dev и SKO больше «летом» (соответственно 4,5 К и 7,0 К), чем «зимой» (соответственно 3,6 К и 5,3 К). В 95% случаев в холодный период года и в 90% случаев в теплый $dev \leq 10$ К.
- 7) разность радиационных температур ($T_{10,8}-T_{3,7}$).** По данным МСУ-МР значения ($T_{10,8}-T_{3,7}$) в среднем на 0,6 К ниже, чем по данным AVHRR независимо от сезона ($dev=0,9$ К, $SKO=1,2$ К). При этом почти в 100% случаев $-4 \leq dev \leq 6$ К, а в 98% случаев $-1,5 \leq dev \leq 3,5$ К. Несмотря на небольшие значения dev и SKO , различия двух видов измерений всё же существенны, т.к. средние значения ($T_{10,8}-T_{3,7}$) обычно составляют от 0,5 до 2,5 К для поверхности суши и большинства типов облачности.
- 8) разность радиационных температур ($T_{12,0}-T_{10,8}$).** Для предиктора ($T_{12,0}-T_{10,8}$) в среднем за год $dev=9$ К («летом» – 8,5 К, «зимой» – 9,5 К), т.е. оценки по данным МСУ-МР сильно занижены относительно оценок по данным AVHRR. В 97% случаев $dev > 5$ К.

Сопоставление результатов классификации по данным радиометров МСУ-МР и AVHRR

точностью ± 2 градации – 96-98%. **Вывод:** оценки W_{max} по данным МСУ-МР можно считать близкими к оценкам W_{max} по данным AVHRR, особенно «зимой».

9) Высота НГО (h_{NGO}). Для 4 классов h_{NGO} HR=81,5% независимо от сезона. Для класса « $\leq 1,5$ км» $POD=86-88\%$ («летом» больше), $FAR=5-9\%$ («зимой» меньше). У классов «1,5-3 км» и «3-5 км» POD заметно выше в холодный период года, чем в теплый. $FAR=20\%$ у классов с высокой НГО независимо от сезона. В целом, оценки по данным МСУ-МР занижают h_{NGO} . Однако в 96-98% случаев различия в оценках h_{NGO} двумя методиками не превышают ± 1 соседний класс. Отличия в 2 и особенно в 3 классе следует считать преимущественно проблемой совмещения пикселей из-за временно-го несоответствия спутниковых наблюдений. **Вывод:** оценки h_{NGO} по данным МСУ-МР близки к аналогичным оценкам по данным AVHRR, особенно зимой и для класса « $\leq 1,5$ км».

10) Толщина облачного слоя (dh). Для 14 градаций dh HR=31-36% («зимой» больше, чем «летом»). Наибольшие значения POD (более 20%) у классов/градаций $dh=1-7$ км, а также у класса « $<0,5$ км». $FAR=50\%$ у всех классов/градаций. Хуже всего «совпадают» оценки dh у мощной (особенно многослойной) облачности и St ($dh=0,5-1$ км). Для тонкой облачности ($dh<3$ км) оценки по данным МСУ-МР завышают dh (обычно на 1-2 км) относительно оценок по данным AVHRR, однако для мощной Сб и многослойной отмечается занижение dh (обычно на 1-2 км). Вероятность совпадения оценок dh обоими методиками с точностью ± 1 градация – 73-76%, с точностью ± 2 градации – 88-94% и с точностью ± 3 градации – 95-98,5%. Больше в холодный период года, чем в теплый. **Вывод:** получаемые по данным МСУ-МР оценки dh немного завышены для тонких облачных слоев и заметно занижены для мощной Сб и многослойной облачности.

11) Интенсивность осадков (I). Для 2 классов (осадки/без осадков) HR=69-75% («зимой» больше, чем «летом»). Класс «осадки» обоими вариантами КПМ детектируется практически одинаково (в среднем $POD=87,5\%$, $FAR=25\%$), особенно «летом» ($POD=94\%$, $FAR=33\%$). «Зимой» немного хуже – $POD=82\%$, однако $FAR=15\%$. Т.е. в теплый период года, несмотря на хорошее совпадение зон осадков, размеры зон осадков по данным МСУ-МР заметно больше ($POD=32\%$ для класса «облачно/без осадков»). В холодный период года совпадение зон осадков немного меньше, но меньше и завышение, т.е. выделенные обеими методиками зоны осадков примерно равны по размеру, но смещены относительно друг друга. При определении интенсивности осадков совпадение заметно хуже – HR=41-50% («зимой» лучше, чем «летом»). $POD=40-50\%$ для отдельных классов/градаций. Однако значения FAR достаточно высокие (более 60%). Лучше всего относительно друг друга обе методики выделяют зоны осадков $I=1-3$ мм/ч – $POD=50-60\%$, $FAR=35-43\%$. КПМ по данным МСУ-МР завышает I слабых осадков и занижает I сильных на 1-2 градации относительно оценок по данным AVHRR, а осадки умеренной и умеренно-сильной интенсивности (для соответствующего сезона) оценивает с точностью ± 1 градация. Вероятность совпадения результатов классификации I обоими методиками с точностью ± 1 градация составляет 83-92% и с точностью ± 2 градации – 95-99% («зимой» больше, чем «летом»). **Вывод:** в теплый период года КПМ по данным МСУ-МР переоценивает зоны осадков. По интенсивности осадков обе методики ближе друг к другу в холодный период года. КПМ по данным МСУ-МР «усиливает» слабые осадки и «ослабляет» сильные на 1-2 градации.

12) Град. Для 2 классов: «град» и «облачно/без град» HR=95% (в холодный период года больше, чем в теплый). Для класса «облачно/без град» $POD=95\%$ (выше «зимой», чем «летом»), а $FAR=1\%$. Для класса «град» в теплый период года $POD=65\%$, а $FAR=90\%$, т.к. количество случаев класса «град» в несколько десятков раз меньше, чем класса «без град». В целом, по данным МСУ-МР почти в 10 раз больше зарегистрировано облачных пикселей с ненулевой вероятностью град, чем по данным AVHRR. Количество случаев класса «сильная град» – в 7,5 раз меньше, чем класса «слабая град». Поэтому значения POD для «сильных град» намного ниже (соответственно 91,5 и 38,5%), а значения FAR – выше (соответственно 8 и 63%), чем для «слабых». Для 2х классов интенсивности град HR=85,5%. **Вывод:** КПМ по данным МСУ-МР заметно завышает зоны град с ненулевой вероятностью относительно данных AVHRR.

13) Град. Для 2 классов: «град в облаках» и «облачно/без град» HR=90% («зимой» больше, чем «летом»). Однако значения POD для класса «град» намного выше (71%), а значения FAR – ниже (86,5%) в теплый период года (значения FAR , т.к. количество случаев класса «град» в несколько десятков раз меньше, чем класса «без град»). В целом, по данным МСУ-МР зарегистрировано почти в 5,5 раз больше пикселей с градом в облаках, чем по данным AVHRR. Количество случаев класса «град у земли» в несколько десятков раз меньше, чем класса «град в облаках», но не у земли (по данным МСУ-МР выделяется в ~300 раз больше пикселей «град у земли», чем по данным AVHRR), поэтому POD для него намного ниже (соответственно 60,5 и 89%), а FAR – выше (соответственно ~0 и 99,5%). В целом же, вероятность совпадения результатов классификации зон града с разной вероятностью выпадения обоими методиками достаточно высока – HR=89%. **Вывод:** КПМ по данным МСУ-МР завышает зоны града в облаках, а также зоны с высокой вероятностью выпадения града относительно оценок по данным AVHRR.

14) Тип осадков у поверхности земли. Для 12 классов осадков HR=50% («зимой» больше, чем «летом»). В целом за год наибольшие значения POD у классов «ледяной дождь» и «снежная крупка» (в среднем более 70%), $POD=50\%$ – у классов «град», «умеренный» и «сильный снег», а $POD=40\%$ – у классов «сильный ливень», «слабый» и «умеренный дождь». У остальных классов осадков $POD<35\%$. Небольшие значения FAR (~20%) только у классов

Полное совпадение (HR, %) результатов классификации по данным МСУ-МР и AVHRR

параметр	всё	теплый период года	холодный период года
облачная маска (2 класса)	65,8	75,2	48,6
тип облачности (13 классов)	36,2	35,7	36,6
тип облачности (13 классов с коррекцией)	89,6	89,2	90,1
барическая высота (11 градаций)	48,5	44,3	52,9
фазовое состояние воды на ВГО (4 класса)	52,9	45,7	60,7
максимальная влажность (8 градаций)	39,7	37,9	41,6
высота НГО (4 градаций)	81,6	81,6	81,6
толщина облачного слоя (14 градаций)	33,5	31,1	36,1
водопаз облачного слоя (8 градаций)	22,7	23,9	21,4
зоны осадков (2 класса)	71,9	68,9	75,0
интенсивность осадков (8 градаций)	45,4	40,9	49,8
тип осадков (12 классов)	45,7	41,7	49,6
тип осадков (2 класса)	98,0	98,5	97,5
зоны град (2 класса)	98,0	96,3	99,8
интенсивность зрог (2 класса)	85,6	-	-
зоны града в облаках (2 класса)	95,3	91,4	99,4
вероятность выпадения града (2 класса)	88,9	-	-
оптическая плотность (11 градаций)	33,8	32,0	35,8
оптическая толщина (14 градаций)	27,9	26,7	29,2
эффективный радиус (8 градаций)	37,2	33,6	41,0
интенсивность обледенения (4 класса)	55,5	54,0	57,2

Совпадение (HR, %) результатов классификации по данным МСУ-МР и AVHRR с ошибкой 1, 2 или 3 соседних классов/градаций

параметр	всё			теплый период года			холодный период года					
	0	1	2	0	1	2	0	1	2			
h_{NGO}	48,5	93,0	99,1	99,9	44,3	91,1	98,7	99,8	52,9	95,0	99,5	99,9
W_{max}	52,9	96,1	99,9	100,0	45,7	93,8	99,7	100,0	60,7	98,5	99,9	100,0
h_{NGO}	39,7	82,6	97,0	99,6	37,9	81,0	95,8	99,2	41,6	84,3	98,3	99,9
dh	81,6	96,9	99,9	100,0	81,6	95,7	99,9	100,0	81,6	98,2	99,9	100,0
I	33,5	76,1	91,0	96,8	31,1	73,1	88,2	95,2	36,1	79,3	94,1	98,5
SW	22,7	70,5	92,3	98,5	23,9	69,4	91,7	98,3	21,4	71,7	92,9	98,6
I_{max}	45,4	87,7	97,1	99,3	40,9	83,1	95,3	98,9	49,8	92,2	99,0	100,0
COD	33,8	70,4	85,2	93,0	32,0	68,8	84,7	93,2	35,8	72,2	85,8	92,9
COT	27,9	65,8	83,8	91,6	26,7	63,9	81,6	89,3	29,2	68,0	86,3	94,2
R_{eff}	37,2	78,4	92,6	96,9	33,6	73,1	90,1	97,0	41,0	84,0	95,1	96,5
I_{crit}	55,5	93,6	99,6	100,0	54,0	92,7	99,4	100,0	57,2	94,6	99,9	100,0

Отклонение оценок по данным МСУ-МР от оценок по данным AVHRR

параметр	всё			теплый период года			холодный период года		
	dev	dev	SKO	dev	dev	SKO	dev	dev	SKO
$A_{0,6}$	-5,9	13,1	18,1	-9,2	12,8	18,2	0,4	13,6	18,1
$A_{0,9}$	2,7	11,3	16,6	-1,9	9,5	14,3	11,4	14,7	20,2
$T_{1,0}$	8,6	9,7	13,1	8,6	9,6	12,3	8,6	9,8	13,9
$T_{3,7}$	-0,4	3,9	6,0	0,1	4,4	6,8	-0,9	3,3	4,9
$T_{10,8}$	-1,0	4,1	6,2	-0,4	4,5	7,0	-1,6	3,6	5,3
$(T_{10,8}-T_{3,7})$	0,6	0,9	1,2	0,5	0,9	1,2	0,7	0,8	1,2
$(A_{0,6}-A_{0,9})$	8,7	10,0	12,1	7,3	9,2	11,4	11,2	11,6	13,2
$(T_{10,8}-T_{12,0})$	9,0	9,7	13,7	8,5	9,4	12,7	9,5	10,1	14,8
$T_{10,8}$	1,4	4,3	6,6	1,5	5,9	7,7	1,4	4,5	5,8
$T_{12,0}$	-0,20	0,71	1,01	-0,21	0,87	1,19	-0,19	0,70	0,90
ΣI_{max}	-0,2	0,3	2,1	-0,2	0,5	2,6	-0,1	0,4	1,4
ΣI_{max}	-1,8	13,0	18,1	-3,0	15,3	21,1	0,0	11,8	15,0
ΣI_{max}	-33,3	65,2	80,5	-	-	-	-	-	-

«морской снег» и «ледяной дождь», у остальных классов $FAR=40\%$. «Ошибочно» относительно другого варианта КПМ классифицированные классы осадков близки по интенсивности или фазе (твёрдые/жидкие) осадков. Осадки, выпадающие в твердом виде, в большинстве случаев «ошибочно» принимаются другой методикой всё равно за твёрдые осадки, а жидкие – за жидкие, но другой интенсивности. Только классы «морской», «слабый дождь», «морской снег» и «ледяной дождь» соответствует большое разнообразие «ошибочных» классов осадков, в т.ч. разной фазы, т.к. эти виды осадков часто выпадают в холодный и переходный периоды года и на границе между двумя основными классами/дождь. Для 2х классов типа осадков («дождь» и «снег») HR=98%. Для обоих классов $POD=95\%$, а $FAR<10\%$ (кроме класса «дождь» – в холодный период года $POD=83\%$). **Вывод:** результаты классификации осадков по типам у поверхности земли, полученные по данным МСУ-МР и AVHRR, можно считать достаточно близкими, особенно для двух основных классов (снег/дождь).

15) Оптическая плотность облачного слоя (COD). Для 11 градаций COD HR=36% (больше «зимой», чем «летом»). У классов $COD=20-60$ наибольшее POD (более 30-35%) и наименьшее FAR . Для оптически тонкой облачности оценки COD по данным МСУ-МР выше, чем по данным AVHRR, а у оптически плотной облачности – ниже на 1-4 градации. Вероятность совпадения результатов классификации COD обоими методиками с точностью ± 1 градация – 68-72%, с точностью ± 2 градации – 85%, с точностью ± 3 градации – 93%, а с точностью ± 4 градации – 97-99% («зимой» совпадение обычно больше, чем «летом»). **Вывод:** оценки COD по данным МСУ-МР отличаются от оценок COD по данным AVHRR не более чем на 1-3 градации. Совпадение результатов обеих классификаций заметно выше в холодный период года и для значений $COD=20-60$.

16) Оптическая толщина облачного слоя (COT). Для 14 градаций COT HR=27-29% («зимой» больше, чем «летом»). Наибольшие POD (более 15-20%) у градаций $COT=20-250$, а также у класса « <400 ». $FAR=26\%$ у всех классов COT . КПМ по данным МСУ-МР завышает оценки COT оптически тонкой по данным AVHRR облачности ($COT<10$) на 2-3 и более градаций из-за ошибок её детектирования, в т.ч. её h_{NGO} и dh . Вероятность совпадения результатов классификации COT обоими методиками с точностью ± 1 градация – 63-68%, с точностью ± 2 градации – 81,5-86,5%, с точностью ± 3 градации – 89-94%, а с точностью ± 4 градации – 93,5-97,5% («зимой» больше, чем «летом»). **Вывод:** оценки COT по данным МСУ-МР отличаются от оценок по данным AVHRR не более чем на $\pm 1-4$ градации в большинстве случаев. Совпадение результатов обеих классификаций заметно выше в холодный период года и для значений $COD=20-250$ и $COT=400$. Для малых значений COT оценки по данным МСУ-МР сильно завышены.

17) Эффективный радиус облачных частиц (R_{eff}). Для 8 классов R_{eff} HR=33,5-41% («зимой» больше, чем «летом»). Наименьшие POD (менее 30%) и наибольшие FAR (более 75%) у минимальных и максимальных R_{eff} , т.к. наиболее часто они соответствуют Сб и Аs, которые плохо детектируются по данным МСУ-МР и для которых хуже определяется фаза. В большинстве случаев различия оценок R_{eff} обоими методиками не превышает $\pm 1-2</$