

КАЛИБРОВКА АЛГОРИТМА ПОЛЯРИЗАЦИОННО СКОРЕКТИРОВАННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НАЗЕМНЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ДАННЫХ ОБ ИНТЕНСИВНОСТИ ОСАДКОВ

А.А. Феоктистов¹, Л.А. Пахомов¹, О.Б. Федичев¹, А.А. Мирошин¹, Ю.Б. Павлюков²

¹Научный центр оперативного мониторинга Земли (НЦ ОМЗ),
ФЕДЕРАЛЬНОЕ КОСМИЧЕСКОЕ АГЕНСТВО
127490, г. Москва, ул. Декабристов, вл.51, корп. 25.
E-mail: feoktistov@ntsomz.ru

²Центральная аэрологическая обсерватория (ЦАО),
РОСКОМГИДРОМЕТ
141700, г. Долгопрудный, ул. Первомайская, 3.
E-mail: yurav@orm.mipt.ru

Сообщается о результатах сопоставления точностных характеристик 7 вариантов РСТ алгоритма оценки интенсивности осадков над территорией Московского региона. При этом использованы данные многоканального сканирующего микроволнового радиометра SSM/I КА F15 Министерства обороны США и квазисинхронные измерения интенсивности осадков радиолокационной метеорологической сети «Московское кольцо».

Введение

С 2002 года в Научном центре оперативного мониторинга Земли (НЦ ОМЗ) Федерального космического агентства ведутся работы по созданию системы оперативного мониторинга зон осадков, что вызвано погодными и климатическими аномалиями последних лет, проявлявшимися в катастрофических наводнениях вследствие осадков экстремальной интенсивности. Используются данные многоканальных микроволновых сканирующих радиометров (ММСП) SSM/I, установленных на борту американских военных метеорологических ИСЗ F13, F14 и F15 серии DMSP [1]. В результате подготовительных операций, выполненных в 2002 году, были сформированы 8 массивов данных ММСП SSM/I, содержащих материалы микроволновой съемки территории Российской Федерации и сопредельных государств, пострадавшей в течение лета 2002 года от целого ряда широко известных катастрофических наводнений.

В 2003 году нами были выполнены работы по решению первой, качественной, задачи - обнаружения зон интенсивных осадков без количественной оценки их интенсивности [2,3].

Второй этап работ был проведен в 2004 году. Получены первые результаты решения второй задачи – количественной - оценки интенсивности осадков. Работа выполнялась объединенными усилиями НЦ ОМЗ и ЦАО, поскольку в ЦАО накоплен обширный теоретический и экспериментальный опыт по измерению атмосферных осадков радиолокационным способом. В Московском регионе в течение более 10 лет в оперативном круглосуточном режиме проводится радиолокационный мониторинг осадков на базе радиолокационной метеорологической сети «Московское кольцо». Результаты измерений сравниваются с данными наземной осадкомерной сети [4]. Эти данные являются идеальным источником наземных данных для отработки алгоритмов оценки интенсивности осадков с использованием спутниковых данных микроволновой (МВ) области спектра.

В данной работе сообщается о первых результатах абсолютной калибровки 7 вариантов алгоритма поляризационно скорректированной температуры (Polarization Corrected Temperature РСТ), с помощью которых проводилась оценка интенсивности осадков. В работе использовались данные (по территории Московского региона) ММСП SSM/I, установленного на борту ИСЗ F15, и квазисинхронные измерения интенсивности осадков радиолокационной метеорологической сети «Московское кольцо». Анализировалась ситуация, когда после продолжительного засушливого периода к Москве приблизился циклон, принесший осадки экстремальной интенсивности. Был сформирован квазисинхронный массив материалов съемки Московского региона, включающий: (1) данные аппаратуры SSM/I ИСЗ F15 (время съемки территории Московского региона - 23 июня 2002 года, 22 ч. 52 м. летнего московского времени) и (2) данные об интенсивности осадков, полученные с помощью радиолокационной метеорологической сети (время съемки - 23 июня 2002 года, 22 ч. 50 м. летнего московского времени).

1. Постановка задачи

Хорошо известны три механизма, влияющие на формирование и трансформацию уходящего теплового МВ излучения системы подстилающая поверхность (ПП) – атмосфера, регистрируемого современными спутниковыми радиометрами:

1. Нечернота ($\epsilon < 1$) и поляризованность ($\epsilon_h \neq \epsilon_v$) излучательной способности ПП.
2. Молекулярное поглощение атмосферными газами (главным образом O_2 и H_2O).
3. Рассеяние и поглощение на жидких и кристаллических гидрометеорах.

Для того чтобы количественно оценивать какой-либо геофизический параметр системы ПП-атмосфера (в том числе и осадки), необходимо корректно учитывать или исключать влияние остальных механизмов.

Алгоритм учета влияния первых двух предложен в 1984 г. [5], успешно развивается [6-9] и основан на фундаментальном понятии РСТ (Polarization Corrected Temperature). Это стало возможным благодаря высокой корреляции радиоярких температур на двух поляризациях в канале 85 ГГц большинства земных ландшафтов.

Третий механизм изучен гораздо слабее первых двух, весьма сложен и играет ключевую роль в задаче ДЗ интенсивности осадков в МВ области спектра. Учитывая последнее обстоятельство, целесообразно остановиться на этом механизме подробнее.

Основные уравнения переноса в диапазоне частот канала SSM/I 85 ГГц [6,7]:

$$T_v = \exp(-\tau_s/\mu) [T_u + \exp(-\tau_a/\mu) \cdot (\epsilon_v T_s + (1 - \epsilon_v) T_d)] = \exp(-\tau_s/\mu) T_{vc} \quad (1)$$

$$T_h = \exp(-\tau_s/\mu) [T_u + \exp(-\tau_a/\mu) \cdot (\epsilon_h T_s + (1 - \epsilon_h) T_d)] = \exp(-\tau_s/\mu) T_{hc} \quad (2)$$

где T_v - радиояркая температура пиксела, К (вертикальная поляризация); T_h - радиояркая температура пиксела, К (горизонтальная поляризация); T_u - температура восходящего излучения атмосферы, К; T_d - температура нисходящего излучения атмосферы, К; T_{vc} - радиояркая температура безоблачного пиксела, К (вертикальная поляризация); T_{hc} - радиояркая температура безоблачного пиксела, К (горизонтальная поляризация); T_s - термодинамическая температура ПП, К; ϵ_v и ϵ_h - излучательная способность ПП на вертикальной и горизонтальной поляризациях; τ_s и τ_a - оптические толщины рассеяния и поглощения атмосферы; $\mu = \cos \theta$, где θ - зенитный угол (53° для SSM/I).

Далее вводится параметр β [5]:

$$\beta = (T_s - \epsilon_v T_s) / (T_s - \epsilon_h T_s) = (1 - \epsilon_v) / (1 - \epsilon_h) \quad (3)$$

характеризующий отношение коэффициентов отражения ПП на вертикальной и горизонтальной поляризациях, с помощью которого и формируется выражение для поляризационно скорректированной температуры РСТ:

$$РСТ = (T_v - \beta T_h) / (1 - \beta) \quad (4)$$

Легко показать, что с помощью соотношений (1) - (3) выражение (4) преобразуется к виду:

$$РСТ = \exp(-\tau_s/\mu) [T_u + \exp(-\tau_a/\mu) T_s] \quad (5)$$

что соответствует радиояркой температуре системы ПП-атмосфера при условии, что подстилающая поверхность является абсолютно черным телом. Величина РСТ зависит, таким образом, от температуры восходящего излучения атмосферы T_u , от температуры ПП T_s и от связанной с интенсивностью осадков оптической толщиной рассеяния τ_s на гидрометеорах и, в частности, на крупных ледяных частицах, находящихся в верхней части облака. Величину в квадратных скобках выражения (5) принято называть пороговым значением РСТ и обозначать $РСТ_0$, что соответствует радиояркой температуре системы ПП-атмосфера в безоблачных условиях и при условии, что ПП является абсолютно черным телом. С учетом последнего обстоятельства выражение (5) приобретает вид:

$$РСТ = \exp(-\tau_s/\mu) РСТ_0 \quad (6)$$

В первых трех вариантах алгоритма РСТ величина $РСТ_0$ представляется в виде следующего полинома [7]:

$$РСТ_0 = a_0 + a_1 РСТ_{19} + a_2 T_{v22} + a_3 T_{v22}^2 \quad (7)$$

В правой части уравнения (7) стоят радиояркие температуры каналов 22 ГГц и 19 ГГц, которые берутся из соответствующих массивов данных аппаратуры SSM/I ИСЗ F15.

Разность $РСТ_0 - РСТ = MSI$ носит название MSI (Mixed Scattering Index - Индекс смешанного рассеяния). MSI может связываться с интенсивностью осадков R , полученной на основании данных радиоло-

кационной метеорологической сети, с использованием как линейной, так и нелинейной регрессионной зависимости.

$$R_{\text{linear}} = a + b \cdot \text{MSI} \quad (8)$$

$$R_{\text{nonlinear}} = c \cdot \text{MSI}^d \quad (9)$$

Авторы [7] в дополнение к этим двум вариантам связи между MSI и интенсивностью осадков R (в мм/час) предложили еще один - комбинированный вариант:

$$R = A \cdot R_{\text{linear}} + B \cdot R_{\text{nonlinear}} + C \quad (10)$$

Значения величин a, b, A, B и C зависят от конкретных климатических условий данной местности и могут быть определены экспериментально. В соответствии с проведенными оценками нами получены следующие соотношения:

$$R_{\text{linear}} = 1,612 + 0,448 \cdot \text{MSI} \quad (11)$$

$$R_{\text{nonlinear}} = 0,04 \cdot \text{MSI}^{1,631} \quad (12)$$

$$R = 0,466 + 0,113 \cdot R_{\text{linear}} + 0,139 \cdot R_{\text{nonlinear}} \quad (13)$$

2. Результаты исследований

Методика проведения эксперимента заключалась в следующем. С помощью радиолокационной метеорологической сети “Московское кольцо” нами была получена карта осадков с пространственным разрешением 4 км, с определенной шкалой интенсивности осадков. На радарные данные нами была наложена сетка географических координат с шагом 0,5 градуса по широте и долготе, что соответствует границам пикселей аппаратуры SSM/I. Анализу был подвергнут 21 пиксел этой карты осадков. На рис. 1. схематически изображены очертания области карты осадков, где светлые ячейки географической сетки соответствуют анализируемым пикселям. В каждом из них указаны усредненные значения интенсивности осадков в мм/час, полученные на основании данных радиолокационных измерений. После этого для каждой из 21 ячеек с осадками был сформирован объединенный массив, включающий:

- значения интенсивности осадков по данным радиолокационной сети;
- соответствующие значения радиоярких температур в каждом из семи каналов SSM/I.

1,44				
3,72	2,01			
3,2	2,36	2,0		
	2,06	1,9	1,88	
		0,51	2,55	2,8
	1,07	1,8	1,1	1,25
		0,45	0,35	0,48
		0,72	0,21	

Рис. 1. Схематическое изображение области карты осадков с наложенной сеткой географических координат и значениями в каждой её ячейке интенсивности осадков по данным радара.

Сформированный объединенный массив использовался при проведении последующей обработки данных с целью калибровки алгоритмов.

Далее нами представлены результаты сопоставления интенсивности осадков по данным радара и рассчитанных с помощью следующих 7 вариантов алгоритма РСТ:

- 1) линейная интерполяция, см. (11);
- 2) нелинейная интерполяция, см. (12);
- 3) суперпозиция линейной и нелинейной составляющих, см. (13);
- 4) отношение РСТ в каналах 37 и 85 ГГц (PCT_{37}/PCT_{85});
- 5) отношение РСТ в каналах 19 и 85 ГГц (PCT_{19}/PCT_{85});
- 6) комбинация РСТ в каналах 37 и 85 ГГц ($(PCT_{37} - PCT_{85}) / (PCT_{37} + PCT_{85})$);
- 7) комбинация РСТ в каналах 19 и 85 ГГц ($(PCT_{19} - PCT_{85}) / (PCT_{19} + PCT_{85})$).

Необходимо обратить внимание на то, что в основе первых трех вариантов алгоритма РСТ лежит аддитивная схема, использующая разницу РСТ₈₅ и РСТ₀ ($MSI = PCT_{85} - PCT_0$). Последующие 4 предложенных авторами данной работы варианта алгоритма РСТ основаны на мультипликативной схеме – отношении значений РСТ для разных каналов. С точки зрения физики можно полагать, что эти 4 алгоритма обладают определенной перспективой, поскольку (в отсутствие атмосферных факторов) значения радиоярких температур, входящие в выражение для РСТ_f (на частоте f)

$$PCT\ f = (T_{vf} - \beta_f \cdot T_{hf}) / (1 - \beta_f) \quad (14)$$

пропорциональны значениям излучательной способности ϵ_{vf} и ϵ_{hf} и физической температуры подстилающей поверхности T_s :

$$T_{vf} = \epsilon_{vf} \cdot T_s \quad T_{hf} = \epsilon_{hf} \cdot T_s \quad (15)$$

При этом в аддитивных вариантах алгоритма (1-3) сохраняется в явном виде зависимость от физической температуры подстилающей поверхности T_s . В мультипликативных же вариантах алгоритма (4-7) T_s сокращается. Разумеется, при учете атмосферных эффектов простого сокращения T_s уже не получится, но есть основания полагать, что зависимость от физической температуры подстилающей поверхности T_s окажется менее выраженной. Это может привести к тому, что при анализе протяженных сцен с заметно различающимися значениями физической температуры подстилающей поверхности (или при съемках одной и той же территории в разные даты или в разное время суток) мультипликативные алгоритмы могут обеспечить получение более точных результатов. Очевидно, что при анализе данных, относящихся только к одной сцене, тем более, достаточно ограниченного размера, как в исследуемом нами сейчас случае, это свойство не должно проявиться – здесь потребуются статистика существенно большего объема – и по территории, и по размерам изображений. Следует иметь в виду, что различие физики зондирования (пассивный режим, SSM/I, и активный - радары) приводит к достаточно значительному разбросу сопоставляемых данных.

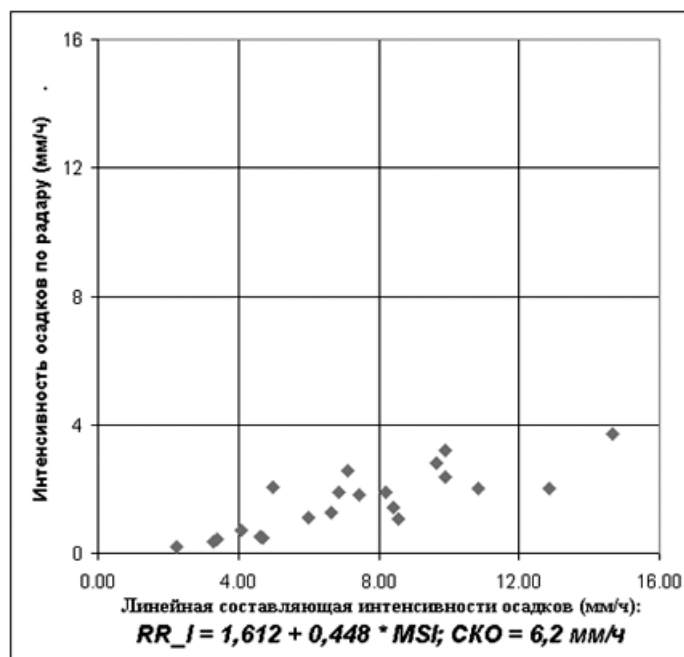


Рис. 2. График для сопоставления значений интенсивности осадков, полученных с помощью радара, и значений интенсивности осадков, рассчитанных с помощью варианта 1 алгоритма РСТ (линейная интерполяция).

На рис. 2. приведен график, позволяющий сопоставить интенсивности осадков, полученные с помощью радара (вертикальная ось), и интенсивности осадков, рассчитанные с помощью варианта 1 (линейная интерполяция) алгоритма РСТ (горизонтальная ось). Очевидно, что метод дает сильно завышенную оценку – примерно в 4 раза. Среднеквадратическая ошибка в данном случае равна 6,2 мм/час.

На рис. 3. приведен аналогичный график для алгоритма РСТ с использованием нелинейной интерполяции. Этот алгоритм дает несколько более точные результаты (СКО = 2,2 мм/час).

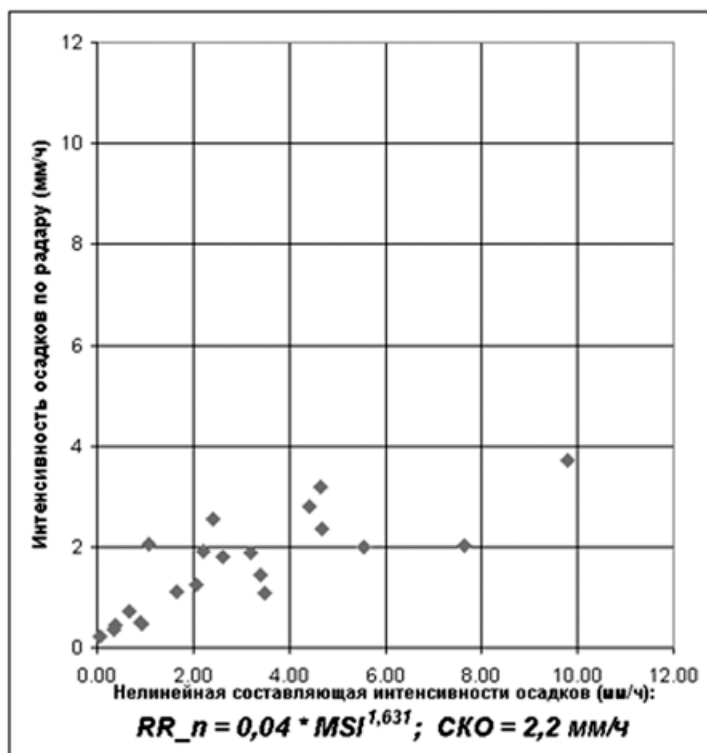


Рис. 3. График для сопоставления значений интенсивности осадков, полученных с помощью радара, и значений интенсивности осадков, рассчитанных с помощью варианта 2 алгоритма РСТ (нелинейная интерполяция).

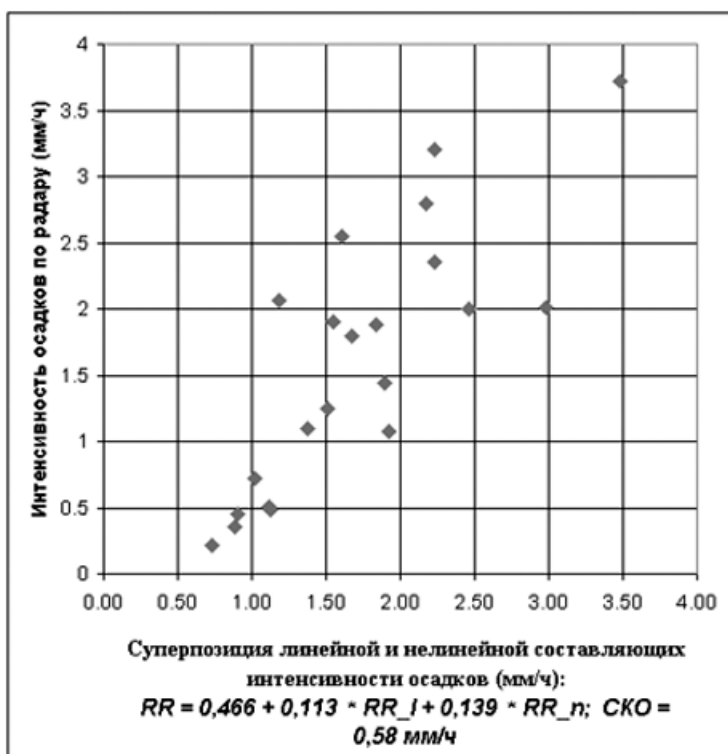


Рис. 4. График для сопоставления значений интенсивности осадков, полученных с помощью радара, и значений интенсивности осадков, рассчитанных с помощью варианта 3 алгоритма РСТ (суперпозиция линейной и нелинейной составляющих).

Сопоставление интенсивности осадков, полученной с помощью радара, и алгоритма РСТ с использованием комбинированной (линейной и нелинейной) интерполяции иллюстрируется графиком на рис. 4. Данный алгоритм показал наиболее высокую точность (СКО = 0,58 мм/час).

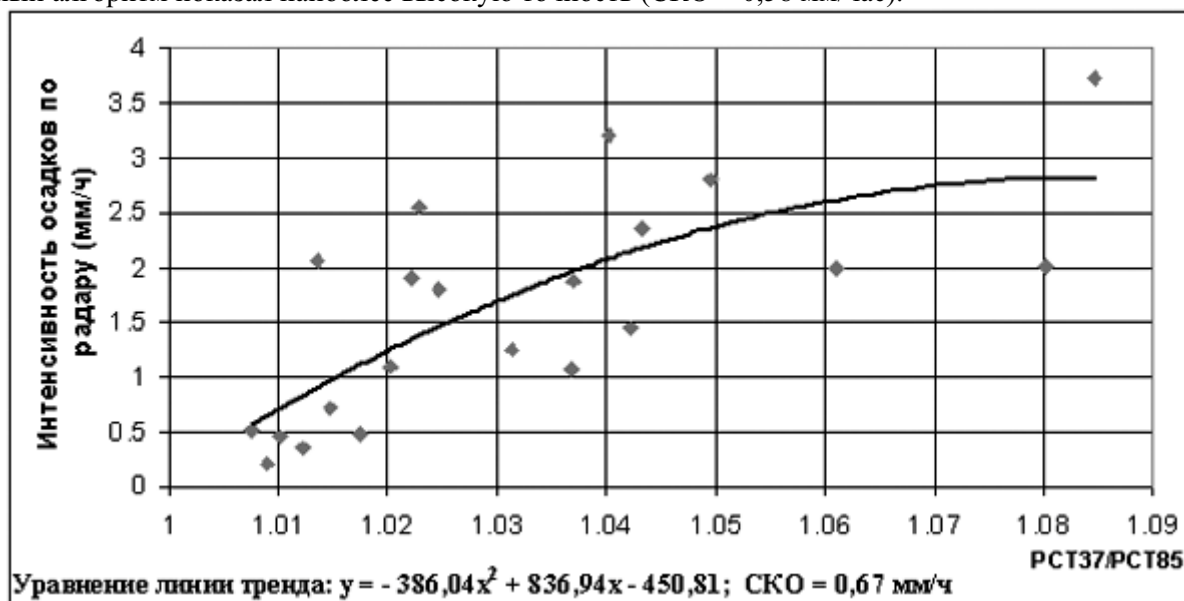


Рис. 5. График для сопоставления значений интенсивности осадков, полученных с помощью радара, и значений интенсивности осадков, рассчитанных с помощью варианта 4 алгоритма РСТ (по отношению РСТ37/РСТ85).

Сопоставление интенсивности осадков, полученной с помощью радара, и отношения РСТ37/РСТ85 (аппроксимация полиномом второй степени по отношению РСТ37/РСТ85) позволило получить СКО = 0,67 мм/час (график на рис. 5.).

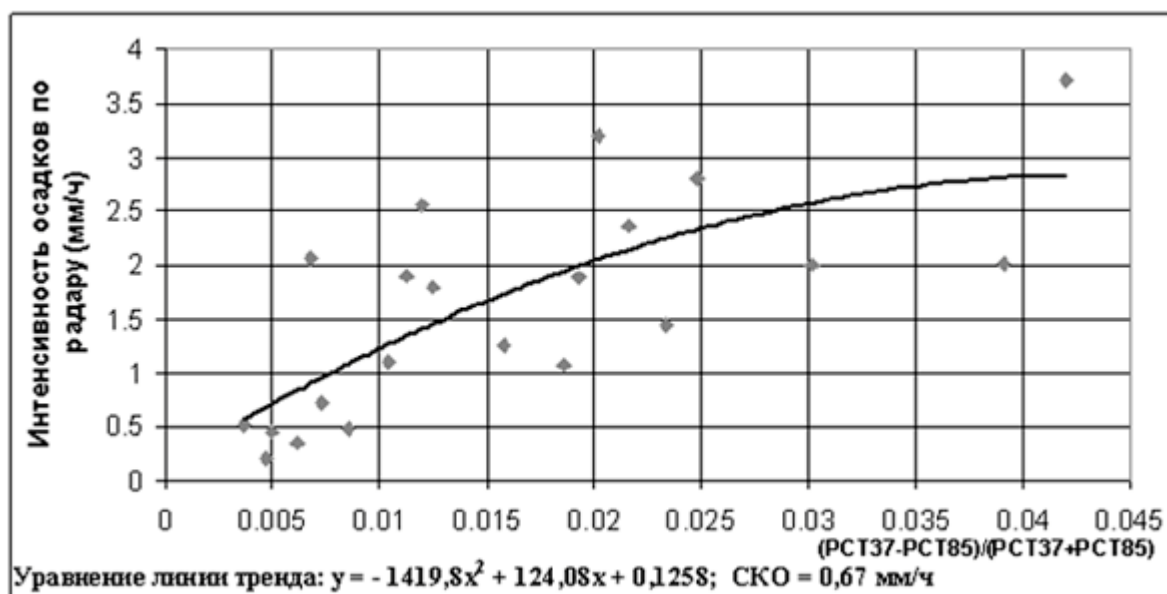


Рис. 6. График для сопоставления значений интенсивности осадков, полученных с помощью радара, и значений интенсивности осадков, рассчитанных с помощью варианта 5 алгоритма РСТ (по отношению $(РСТ37 - РСТ85) / (РСТ37 + РСТ85)$).

На рис. 6. представлен график, позволяющий сопоставить интенсивность осадков, полученную с помощью радара, и отношения $(РСТ37 - РСТ85) / (РСТ37 + РСТ85)$. Переход к усложненному варианту для тех же каналов ничего не изменил: СКО остался равным 0,67 мм/час.

Сопоставление интенсивности осадков, полученной с помощью радара, и отношения РСТ19/РСТ85 проиллюстрировано на графике на рис. 7. Использование этой пары каналов позволило повысить точность до СКО = 0,59 мм/час.

Сопоставление интенсивности осадков, полученной с помощью радара, и отношения $(РСТ19 - РСТ85) / (РСТ19 + РСТ85)$ можно провести, используя график на рис. 8. Как и в случае пары каналов 37 и 85 ГГц переход к усложненному варианту ничего не изменил - СКО остался равным 0,59 мм/час.

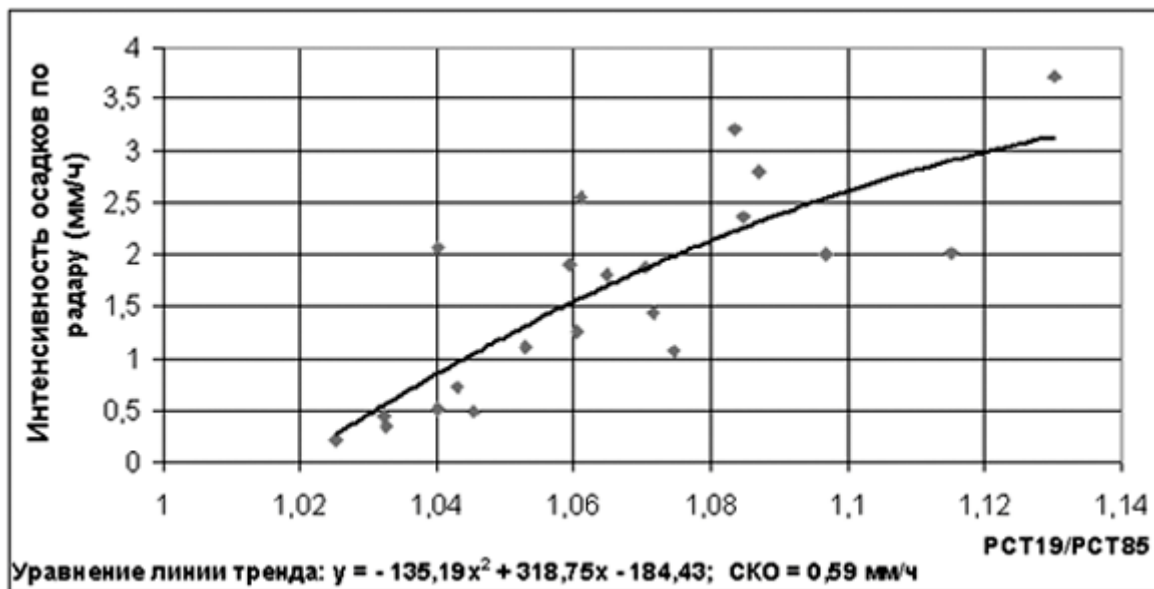


Рис. 7. График для сопоставления значений интенсивности осадков, полученных с помощью радара, и значений интенсивности осадков, рассчитанных с помощью варианта 6 алгоритма РСТ (по отношению PCT19/ PCT85).

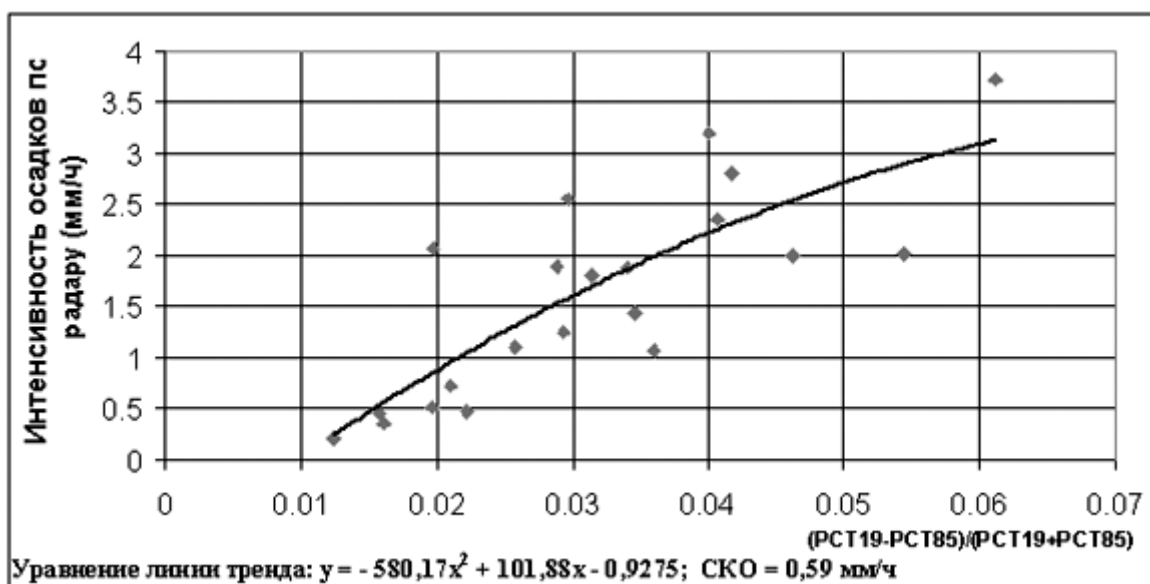


Рис. 8. График для сопоставления значений интенсивности осадков, полученных с помощью радара, и значений интенсивности осадков, рассчитанных с помощью варианта 7 алгоритма РСТ (по отношению $(PCT19 - PCT85) / (PCT19 + PCT85)$).

Для наглядности вычисленные для каждого варианта алгоритма РСТ значения SKO сведены в следующую таблицу:

Таблица 1. Значения SKO для 7 вариантов алгоритмов SKO

№	Алгоритм	SKO, (мм/час)
1	Линейная интерполяция	6,2
2	Нелинейная интерполяция	2,2
3	Суперпозиция линейной и нелинейной составляющих	0,58
4	PCT37/PCT85	0,67
5	PCT(37-85)/(37+85)	0,67
6	PCT19/PCT85	0,59
7	PCT(19- PCT(19-85)/(19+85)85)/(19+85)	0,59

Заключение

С точки зрения точностных характеристик алгоритмы могут быть разбиты на две группы. В первую группу входят алгоритмы линейной и нелинейной интерполяции (варианты 1 и 2), которые характеризуются неприемлемо высоким уровнем ошибок – СКО равно 6 и 2 мм/час, соответственно.

Для остальных 5 алгоритмов СКО меняется в достаточно узких пределах - от 0,58 до 0,67 мм/час. Менее точные результаты в этой группе (варианты 4 и 5) для пары каналов 37 и 85 ГГц (0,67 мм/час), более точные – у вариантов 6 и 7 на основе пары каналов 37 и 85 ГГц (0,59 мм/час), и у варианта 3 (0,58 мм/час).

Для проведения адекватной оценки точностных характеристик предложенных мультипликативных вариантов алгоритма РСТ планируется проведение дополнительных исследований с использованием статистически представительных массивов данных.

Литература

1. *Hollinger J.P., Peirce J.L., Poe G.A.* SSM/I instrument evaluation. – IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 1990, v. 28, N 5, p. 781 – 790.
2. *Пахомов Л.А., Феоктистов А.А., Мирошин А.А.* Об автоматическом обнаружении зон интенсивных осадков по данным дистанционного зондирования в микроволновой области спектра. – Тез. докл. Всероссийской конференции «Дистанционное зондирование поверхности Земли и атмосферы», Иркутск, 2 – 6 июня 2003 г., с. 16.
3. *Пахомов Л.А., Феоктистов А.А., Федичев О.Б., Мирошин А.А.* Обнаружение зон осадков и оценка их интенсивности с использованием данных дистанционного зондирования в микроволновой области спектра. // Сборник докладов Всероссийской конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Москва, 10-12 ноября 2003 г, с. 476 – 481.
4. *Pavlyukov Yu. B.* Application experience of attenuation-tuned Z-R relation in radar rain-fall measurements // Proc. of the 31th International Conference on Radar Meteorology. Seattle WA, 6 – 12 August 2003, USA, American Meteorological Society. P. 277 – 278
5. *Grody N.C.* Precipitation monitoring over land from satellite by microwave radiometry. – International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'84), Strasbourg, France, ESA SP-215, 1984, p. 417-423.
6. *Hayasaka T., Murata H., Zhao B., Zhu Y., Li W.* Rainfall distribution over the Asian continent retrieved from SSM/I data. – Proc. SPIE, 1998, v. 3503, p. 108 – 114.
7. *Li W., Gao F., Zhu Y., Zhao B.* Study on rainfall by SSM/I data in Huai River Basin area. – Proc. SPIE, 1998, v. 3503, p. 115 – 123.
8. *Spencer R.W., Goodman H.M., Hood R.E.* Precipitation retrieval over land and ocean with the SSM/I: Identification and characteristics of the scattering signal. – J. Atmos. Ocean. Techn., 1989, v. 6, p. 254 – 273.
9. *Todd M.C., Bailey J.O.* Estimates of rainfall over the United Kingdom and surrounding seas from the SSM/I using the polarization corrected temperature algorithm. – J. Appl. Meteorol., 1995, v. 34, p. 1254 – 1265.