

СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАДИОТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДОЖДЕВЫХ ЯЧЕЕК В МИКРОВОЛНОВОМ ДИАПАЗОНЕ.

Илюшин Я.А.^{1,2}, Кутуза Б.Г.², Шпренгер А.А.¹

¹Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, 119992 Москва ГСП-2
Ленинские горы улица Лебедева физический факультет E-mail ilyushin@phys.msu.ru

²Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН Моховая 11-7, Москва,
125009, Россия E-mail kutuza@cplire.ru

Проведены расчеты интенсивности и поляризации теплового радиоизлучения дождевых ячеек в микроволновом диапазоне длин волн. По результатам моделирования обсуждается возможность оценки параметров дождевых ячеек по данным многочастотной радиометрии.

SPECTRAL CHARACTERISTICS OF THERMAL ELECTROMAGNETIC RADIATION OF THE RAIN CELLS IN THE MICROWAVE BAND.

Ya.A. Ilyushin, B.G. Kutuza, A.A. Sprenger

Intensity and polarization of thermal radiation of rain cells in the microwave band are calculated. Possible approach to the inverse problem solution based on the simulation results is discussed.

Пассивное зондирование на миллиметровых и субмиллиметровых волнах имеет ряд преимуществ по сравнению с другими техниками наблюдения облачности из космоса. Измерения солнечных отражений и теплового ИК излучения чувствительны к оптической толщине атмосферы. В то же время микроволновая радиометрия более чувствительна к водозапасу и размеру частиц, поскольку длины волн соизмеримы с размерами кристаллов льда в перистых облаках. При многочастотных микроволновых измерениях возможно достижение компромисса между глубиной проникновения и чувствительностью, оценка параметров распределения частиц по размерами и определение большей части массы льда в облаках [1].

Облака и осадки часто характеризуются вертикальной и горизонтальной неоднородностью распределения. Однако, плоско-параллельная слоистая модель атмосферы в расчетах переноса излучения не полностью описывает рассеянные поля излучения от пространственно неоднородных распределений выпадающих осадков. Эти вопросы исследовались рядом авторов, в т.ч. [2,3,4,5]. Несферичность частиц также усложняет задачу моделирования. Для учета этих моментов требуется максимально строгий подход к моделированию переноса поляризованного излучения в анизотропной среде. Ранее (см., например, [6]) и в частности в рабочих алгоритмах обработки данных [7], в связи с ограниченными вычислительными ресурсами применялись одномерные модели радиационного переноса в среде эквивалентных сферических частиц.

Обзор ранних моделей радиационного переноса показывает, что большинство из них не удовлетворяет в полной мере предъявляемым требованиям. В частности, трехмерные статистические модели [4,3] применяются только для макроскопически изотропных и зеркально симметричных сред, в которых можно пренебречь эффектами поляризации. Исследования аналитическими методами типа [8,9] (двухпотокное приближение) и [10] (диффузионное приближение), в основном ограничивались сильно идеализированными геометрическими моделями. Многие дискретно-ординатные модели, например MWMOD [11] и VDISORT [12], используют одномерную плоскопараллельную геометрию. Коды прямого статистического моделирования, типа свободно распространяемого GRIMALDI [13], также мало пригодны в задачах дистанционного зондирования в связи с большими числами фотонов, необходимыми для получения достоверных результатов при малых полях зрения приборов. Модель RAL (лаборатория Резерфорда-Эпплтона) [14] и модель однократного рассеяния KOPRA, разработанная для эксперимента MIPAS [15], также не учитывают поляризацию, KOPRA работает только в одномерной сферической геометрии, а RAL в одномерной и двумерной псевдосферической. В некоторых моделях отсутствуют модели тепловых источников излучения или применяется неполное описание поляризации [4], или одновременно оба [16,17].

В работах [18,19] описан один из алгоритмов рассеяния трехмерной поляризационной модели радиационного переноса ARTS. В новой версии модели ARTS применяются сразу два подхода:

обратный метод статистического моделирования [20] и итерационный метод дискретных ординат [18]. Оба метода работают в трехмерной сферической геометрии и учитывают поляризационные эффекты, связанные с несферичностью частиц. Итерационный метод дискретных ординат работает также и в одномерной сферической геометрии. Реализация итерационного метода дискретных ординат практически аналогична соответствующим алгоритмам SHDOM или VDOM. Простая одномерная плоскопараллельная модель, использующая итеративный дискретно-ординатный метод [18], описана также в работе [21]. Для учета рассеяния на несферических частицах различной ориентации и формы в модели введен учет всех параметров вектора Стокса, т.е. полный учет поляризации излучения. Эта модель может применяться как в микроволновом, так и в инфракрасном диапазонах длин волн. Одномерная версия алгоритма использовалась для исследования влияния различных микрофизических параметров облаков на спектры [22].

В данной работе разработан и применен алгоритм численного моделирования радиационного переноса в трехмерно-неоднородной анизотропной рассеивающей среде [23]. Проведены расчеты радиационных свойств дождевой атмосферы на длине волны 3, 8, 15.4 и 22 мм в зависимости от интенсивности дождя. Проведено компьютерное моделирование теплового излучения дождевой ячейки путем прямого численного решения ВУПИ. Представлены результаты расчетов первого и второго компонентов вектора Стокса яркостной температуры дождевой ячейки в диапазоне миллиметровых волн. Показано, что поляризационные эффекты, описываемые вторым компонентом вектора Стокса, проявляются в ячейке дождя.

В настоящей работе впервые оценена неравномерность углового и пространственного распределения интенсивности уходящего теплового излучения дождя, связанная с трехмерной ячейистой структурой дождевого поля. Впервые получены интегральные оценки проявления указанных эффектов в радиометрических наблюдениях дождевых полей из космоса. Впервые показана несостоятельность радиационной модели плоскостлой среды как теоретической основы микроволновой радиометрии дождевых осадков.

Исследование выполнено при поддержке грантов РФФИ 13-02-12065 офи-м и 15-02-05476. Авторы благодарят администрацию НИВЦ МГУ им. М.В.Ломоносова за предоставленные ресурсы суперкомпьютеров СКИФ-ГРИД "Чебышев" и "Ломоносов" [24].

ЛИТЕРАТУРА

1. Evans, K.F., Walter, S.J., Heymsfield, A.J., McFarquhar, G.M. Submillimeter-wave cloud ice radiometer: Simulations of retrieval algorithm performance // J. Geophys. Res. Atmospheres. 2002. V.107. N.3. PP.2-1-2-21.
2. J. L. Haferman, W. F. Krajewski, and T. F. Smith, Three-dimensional aspects of radiative transfer in remote sensing of precipitation: Application to the 1986 CONMEX storm // J. Appl. Meteorol. 1994. V.33. N.12. PP.1609-1622.
3. Roberti, L., J. Haferman, and C. Kummerow Microwave radiative transfer through horizontally inhomogeneous precipitating clouds // 1994. J. Geophys. Res. V.99. N.D8. PP.16707-16718.
4. Liu, Q., Simmer, C., Ruprecht, E. Three-dimensional radiative transfer effects of clouds in the microwave spectral range // J. Geophys. Res. Atmospheres. 1996. V.101. N.D2., PP.4289-4298.
5. C. Kummerow Beamfilling errors in passive microwave rainfall retrievals // J. Appl. Meteorol. 1998. V.37. N.4. PP.356-370.
6. S. T. Bond, The potential effect of cirrus on Microwave Limb Sounder retrievals, Ph.D. dissertation, Univ. Edinburgh, Edinburgh, U.K., 1996.
7. D. L. Wu and J. H. Jiang, EOS MLS algorithm theoretical basis for cloud measurements, Jet Propulsion Lab., Pasadena, CA, Tech. Rep., 2002.
8. Davies R. The effect of finite geometry on the three-dimensional transfer of solar irradiance in clouds // J. Atm. Sci. 1978. V.35. N.9. P.1712-1725
9. Harshvardhan, J. A. Weinman, R. Davies, Transport of infrared radiation in cuboidal clouds. // J. Atm. Sci. 1980. V.38. PP.2500-2513.
10. Gube, M., J. Schmetz, and E. Raschke Solar radiative transfer in a cloud field. // Contrib. Atm. Phys. 1980. V.53. PP.24-34.
11. Simmer, C. Handbuch Zu MWMOD, Kieler Strahlungstransport-modell Fuer Den Mikrowellenbereich. 1993.

12. Schulz, F. M., and K. Stamnes, Angular distribution of the Stokes vector in a plane-parallel, vertically inhomogeneous medium in the vector discrete ordinate radiative transfer // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*. 2000. V.65. PP.609-620.
13. A. Macke, D. L. Mitchell, and L. V. Bremen, Monte carlo radiative transfer calculations for inhomogeneous mixed phase clouds // *Phys. Chem. Earth B*. 1999. V.24. N.3. PP.237-241.
14. Kerridge, B., et al. Consideration of mission studying chemistry of the UTLS, // *Prog. Rep. 6, Eur. Space Res. and Technol. Cent., Noordwijk, Netherlands*. 2003.
15. Hoepfner, M., and C. Emde, Comparison of single and multiple scattering approaches for the simulation of limb-emission observations in the mid-IR// *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, 2005. V.91. N.3. PP.275- 285.
16. L. Oikarinen, E. Sihvola, and E. Kyrola, Multiple scattering radiance in limb-viewing geometry // *J. Geophys. Res.* 1999. V.104. N.D24. P.31 261-31 274.
17. K. Ishimoto and H. Masuda, A Monte Carlo approach for the calculation of polarized light: Application to an incident narrow beam// *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*. 2002. V.72. N.4. PP.462-483.
18. Emde, C., S. A. Buehler, C. Davis, P. Eriksson, T. R. Sreerekha, and C. Teichmann A polarized discrete ordinate scattering model for simulations of limb and nadir long-wave measurements in 1-D/3-D spherical atmospheres // *J. Geophys. Res.* 2004. V.109. P.D24207
19. Buehler, S. A., P. Eriksson, T. Kuhn, A. von Engeln, and C. Verdes ARTS, the Atmospheric Radiative Transfer Simulator // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, 2005. V.91. N.1. PP.65- 93.
20. C. Davis, C. Emde and R. Harwood, A 3-D polarized reversed Monte Carlo radiative transfer model for Millimeter and submillimeter passive remote sensing in cloudy atmospheres // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2005. V.43. N.5. PP.1096-1101.
21. Sreerekha, T. R., S. A. Buehler, and C. Emde A simple new radiative transfer model for simulating the effect of cirrus clouds in the microwave spectral region // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, 2002. V.75. PP.611- 624.
22. C. Emde, S.A. Buehler, P. Eriksson, T.R. Sreerekha, The effect of cirrus clouds on microwave limb radiances // *Atmospheric Research*, 2004. V.72. N.1-4.PP.383-401.
23. Илюшин Я.А., Кутуза Б.Г. Влияние пространственной структуры осадков на поляризационные характеристики уходящего микроволнового излучения атмосферы. // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2016. Т.52. N.1. С.83–91.
24. Воеводин Вл.В., Жуматий С.А., Соболев С.И., Антонов А.С., Брызгалов П.А., Никитенко Д.А., Стефанов К.С., Воеводин Вад.В. Практика суперкомпьютера "Ломоносов" // *Открытые системы*. - Москва: Издательский дом "Открытые системы", 2012. - 7