

## Поляризационные характеристики микроволнового излучения ячейки и плоского слоя дождя при наблюдении Земли из космоса

Илюшин Я.А., Кутуза Б.Г.

Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова  
ИРЭ им В.А.Котельникова РАН, Москва, 125009, ул. Моховая, д.11, корп.7  
Tel: +7(095)629-33-65, Fax: +7(095)629-36-78

*Представлены результаты компьютерного моделирования восходящего микроволнового излучения атмосферы, содержащей осадки. Модель учитывает данные наземных измерений поляризации радиоизлучения дождя. Показано, что второй параметр Стокса яркостной температуры дождевой атмосферы в миллиметровом диапазоне может достигать значений 3–5 К. Для учета поляризационных эффектов при интерпретации данных космического зондирования необходимо значительно улучшить пространственное разрешение микроволнового радиометра.*

*Simulation results of the upwelling microwave radiation of the precipitating atmosphere are presented. The simulation model accounts for the results of the ground based observation results of the polarized radiation from the rain drops. It has been shown that the 2nd Stokes parameter of the radio brightness temperature of the raining atmosphere in the millimeter wave frequency band can reach up to 3-5 K. To account for the polarization effects correctly on the data analysis stage, the spatial resolution of the space borne microwave interferometric radiometer should be significantly improved.*

### Введение

Исследование осадков с использованием данных космических наблюдений – одна из важных проблем дистанционного зондирования. Впервые возможность определения интенсивности дождя по данным наблюдений микроволнового излучения была показана в 1968 г. по результатам эксперимента на ИСЗ Космос 243 [1]. Зоны выпадения осадков над морской поверхностью были зарегистрированы по характерным значениям радиояркостных температур на длинах волн 0.8, 1.35 и 3.2 см. При этом, интенсивность выпадения осадков можно определить по интенсивности излучения.

Дальнейшее развитие техники наблюдения атмосферных осадков из космоса связано с американским ИСЗ DMSP с микроволновым радиометром SSM/I [2] с рабочим диапазоном длин волн 0.35 до 1.6 см. Зоны осадков определялись как области с пониженной яркостной температурой на длине волны 0.35 см в связи с увеличением альбедо при многократном рассеянии микроволн на крупных дождевых каплях. Также, в последние годы дистанционное зондирование атмосферных осадков проводилось на американо-японском спутнике TRMM. В настоящее время в стадии разработки находится крупный американский проект по исследованию осадков GPM (Global Precipitation Mission), запуск спутника планируется 2012 году.

### Поляризационные измерения

В упомянутых предыдущих исследованиях не учитывалась поляризация теплового излучения дождевой атмосферы, которая проявляется во втором параметре вектора Стокса Q. Частичная поляризация теплового излучения, вызванная сплющиванием падающих дождевых капель, является характерным признаком дождевой атмосферы [3]. Как известно, вектор Стокса в базисе горизонтальной и вертикальной линейных поляризаций ( $h, v$ -базис) выражается через соответствующие компоненты вектора напряженности электрического поля  $E_h$  and  $E_v$ . Компоненты вектора Стокса имеют размерность интенсивности.

В технике пассивных измерений компоненты вектора Стокса удобно выражать через яркостные температуры в приближении Рэлея-Джинса. По первому параметру Стокса  $I$  можно определять интенсивность дождя. Вторым параметром Стокса  $Q$  чувствителен к форме частиц и следовательно позволяет оценить распределение капель по размерам. Третий параметр Стокса  $U$  чувствителен к азимутальной асимметрии распределенных источников теплового излучения, обусловленной несфероидальной формой дождевых частиц и их преимущественной ориентацией.

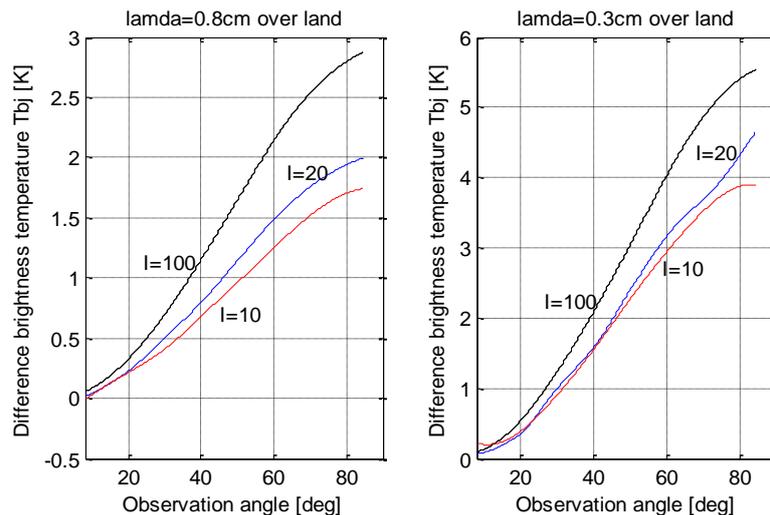
Наземные поляриметрические измерения теплового излучения дождевых капель проводились одновременно на нескольких частотах от 13 до 90 ГГц [3,4]. По данным наблюдений в Московской области и в Немецком аэрокосмическом центре (Оберпфaffenхофен) были измерены второй и третий параметры Стокса. Показано, что второй и третий компоненты вектора Стокса радиояркостной температуры могут достигать значений 15-20 и 2-3 К, соответственно, при максимальном угле наклона эллипса поляризации к горизонтали около 7 градусов. Поляризационные эффекты могут быть использованы для обнаружения осадков из космоса и количественных оценок их характеристик.

#### Результаты компьютерного моделирования

Получены теоретические оценки поляризации теплового излучения осадков в миллиметровом диапазоне в направлениях визирования, близких к горизонтали. Проведено компьютерное моделирование восходящего радиотеплового излучения в системе «дождевая атмосфера – поверхность». Поле излучения формируется как атмосферой, так и подстилающей поверхностью. Вычисления яркостной температуры восходящего излучения проводились по методу инвариантного погружения Амбарцумяна. Метод был разработан в первой половине XX в. и первоначально применялся к исследованию радиационного переноса в атмосферах звезд и планет.

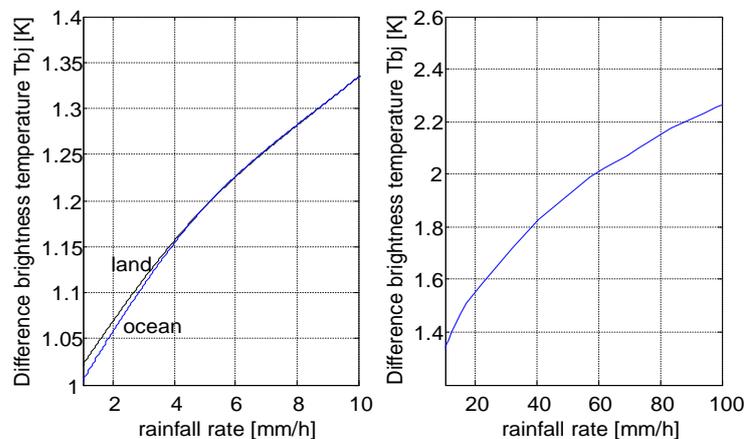
Дождевой слой рассматривался как однородная плоскостная рассеивающая среда. В этом случае решение уравнения переноса значительно упрощается. В предлагаемой модели также учитывается многократное рассеяние на каплях в дождевом слое и различие коэффициентов ослабления на вертикальной и горизонтальной поляризациях.

На рис. 1 показаны значения разности яркостных температур ( $T_b^v - T_b^h$ ) на 3 и 8 мм, наблюдаемых из космоса, в зависимости от надирного угла визирования. Графики на рис. 1 соответствуют двум длинам волн и трем значениям интенсивности дождя: 10, 20 и 100 мм/ч. Можно видеть, что при надирных углах визирования более 50 градусов второй параметр Стокса превышает 1 К. В зависимости от угла визирования и интенсивности выпадения осадков, разброс значений разности яркостных температур ( $T_b^v - T_b^h$ ) на длинах волн 3 и 8 мм составляет соответственно 5.5 и 2.8 К.



**Рис. 1. Различие радиояркостных температур над поверхностью суши для вертикальной и горизонтальной поляризации на длине волны 3 и 8 мм в зависимости от надирного угла визирования.**

На рис. 2 показаны зависимости поляризационного контраста на длине волны 3 мм в зависимости от интенсивности осадков для надирного угла визирования  $50^\circ$



**Рис. 2. Зависимость различия радиояркостных температур над поверхностью моря и суши в зависимости от интенсивности дождя, длина волны 3 мм.**

Вследствие высокого ослабления коротких миллиметровых волн в дождевом слое при интенсивности выпадения осадков более 10 мм в час, наблюдаемые радиояркостные температуры практически не зависят от свойств поверхности. Снижение яркостной температуры на миллиметровых волнах с ростом интенсивности дождя обусловлено повышением альbedo атмосферного дождевого слоя. Поляризация излучения зависит от длины волны, угла визирования и интенсивности выпадения осадков. Вследствие различия альbedo, при интенсивности дождя более 5 мм в час второй параметр Стокса радиояркостной температуры может достигать величины 2 – 4 К на частоте 100 ГГц при надирных углах визирования 50-60 градусов.

Были проведены также расчеты радиояркостных температур собственного теплового излучения изолированной кубической дождевой ячейки 3 км x 3 км x 3 км. Индикатриса рассеяния полагалась рэлеевской, значения объемных коэффициентов поглощения и рассеяния принимались близкими к рассчитанным для вертикальной и

горизонтальной поляризации при надирных углах 50-60 градусов. Численное решение уравнения переноса излучения проводилось с помощью разностных схем методом итераций [5].

По результатам моделирования, были проведены сравнения параметров Стокса радиоярких температур однородного плоского слоя и изолированной кубической дождевой ячейки. На рис. 3 показаны угловые зависимости средней радиояркой температуры кубической ячейки (3 км x 3 км x 3 км) и однородного плоского слоя 3 км толщины на частоте 90 ГГц при интенсивности дождя 10 мм в час. Можно видеть значительные различия при больших надирных углах визирования. Угловые распределения яркости излучения, уходящего с верхней грани кубической ячейки, приближаются к решению для однородной плоскостной среды по мере увеличения горизонтальных размеров прямоугольной ячейки.

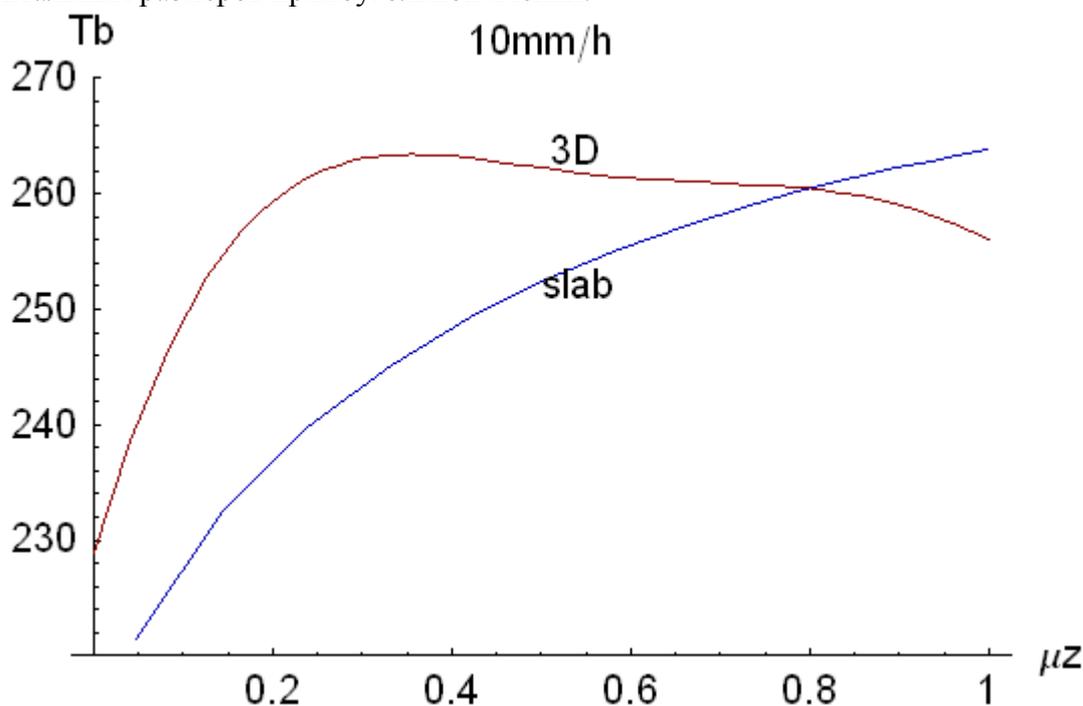
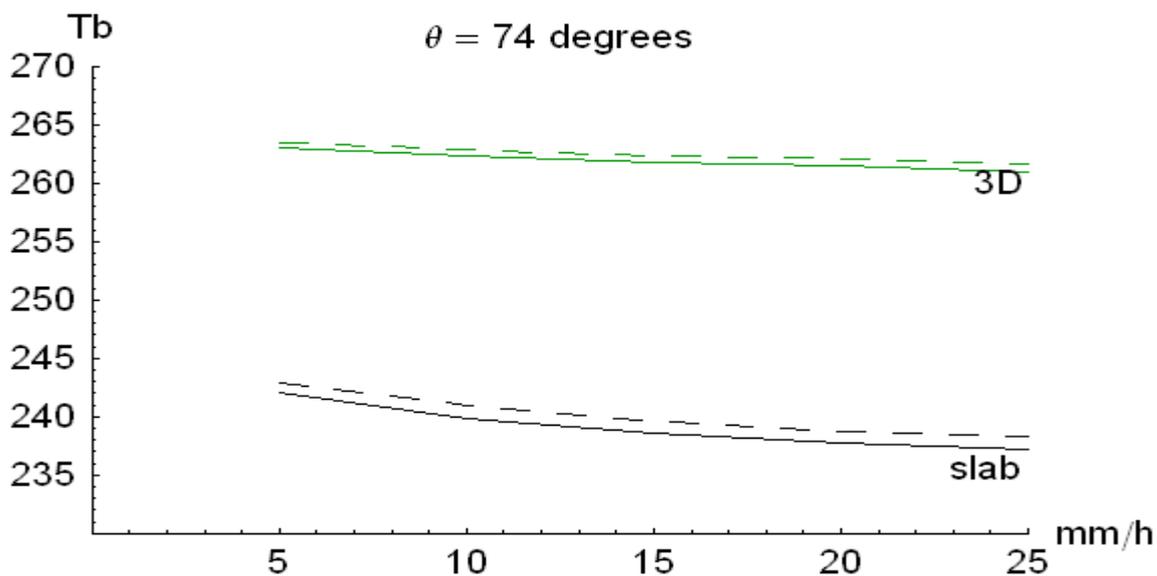


Рис. 3. Угловые зависимости средней радиояркой температуры. 3D – кубическая ячейка со стороной куба 3 км, slab – однородный плоский дождевой слой 3 км толщины.

Радиояркие температуры на вертикальной и горизонтальной поляризациях в зависимости от интенсивности выпадения осадков для плоского слоя и кубической ячейки показаны на рис. 4.



**Рис. 4. Радиояростные температуры кубической ячейки и однородного плоского слоя как функции интенсивности дождя. Сплошные линии – горизонтальная поляризация, пунктир – вертикальная поляризация.**

В миллиметровом диапазоне волн средние угловые распределения яркостных температур всей наблюдаемой поверхности кубической ячейки значительно отличаются от угловых распределений для плоского слоя. Однако, поляризационные эффекты (различие яркостных температур для различных поляризаций) приблизительно равны по порядку величины.

#### Обсуждение результатов

По результатам моделирования показано, что для интерпретации данных спутникового зондирования требуется пространственное разрешение микроволнового радиометра, не хуже размера дождевой ячейки. В настоящее время, горизонтальное пространственное разрешение приборов составляет около 15 км. Оно может быть значительно улучшено применением радиометра-интерферометра миллиметровых волн с двумерным синтезом апертуры для измерения четырех компонент вектора Стокса теплового излучения гидрометеоров [6]. Оценки показывают, что в миллиметровом диапазоне волн возможно изготовление интерферометра с пространственным разрешением 1-2 км, что значительно меньше типичного размера дождевой ячейки, с чувствительностью 0.3-0.5 К. При этом окажется возможным измерение второго параметра Стокса, для исследования областей выпадения осадков. Наиболее целесообразным вариантом конструкции является фазированная антенная решетка Y-типа. В настоящее время обсуждается возможность установки радиометра-интерферометра К-диапазона на Международной Космической Станции (МКС). Технически возможна установка антенны с размером апертуры 3 м.

#### 1. ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ.

В работе получены оценки различия радиояростных температур дождевой атмосферы в миллиметровом диапазоне на вертикальной и горизонтальной поляризации в зависимости от длины волны и угла наблюдения. Теоретические и экспериментальные результаты также свидетельствуют о значительной поляризации нисходящего теплового радиоизлучения атмосферных осадков. Таким образом, для эффективного учета поляризационных эффектов в интерпретации спутниковых данных зондирования необходимо значительно увеличить пространственное разрешение микроволновых радиометров. Одним из вариантов решения проблемы является использование интерферометра с синтезированной апертурой.

Авторы выражают искреннюю благодарность администрации НИВЦ МГУ за предоставление доступа к вычислительным ресурсам суперкомпьютерного комплекса параллельных вычислений СКИФ-ГРИД МГУ "Чебышев".

#### **Литература**

1. А.Ye. Basharinov, A.S.Gurvich, S.T. Egorov "Radio emission of the Earth as a planet", М.: Nauka, 1974.
2. R. W. Spencer, H.M. Goodman, R.E.Hood "Precipitation retrieval over land and ocean with the SSM/I: Identification and characteristics of the scattering signal", J. of Oceanic Technol. V. 6, pp. 254-273, 1989.
3. B.G.Kutuza, G.K.Zagorin, A.Hornbostel and A.Schroth, "Physical modeling of passive polarimetric microwave observations of the atmosphere with respect to the third Stokes parameter", Radio Science, v. 33, № 3, pp. 677-695, 1998.
4. Schroth A., A.Hornbostel, B.G.Kutuza and G.K.Zagorin, Utilization of the First Three Stokes Parameters for the Determination of Precipitation Characteristics, in *IGARSS'95*, pp.141-143, Seattle, WA, USA, July, 1998.
5. Рихтмайер Р., Мортон К. Разностные методы решения краевых задач. - М.: Мир, 1972. - 418 с.
6. B.G.Kutuza, and G.K.Zagorin "Two-dimensional synthetic aperture millimeter-wave radiometric interferometer for measuring full-component Stokes vector of emission from hydrometeors", Radio Science, vol. 38, № 5, pp. 11-1 – 11-7, 2003.