

ОБЗОРЫ

УДК 535.36

МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНЫЕ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УХОДЯЩЕГО МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДОЖДЕВЫХ ОСАДКОВ

© Авторы, 2018

doi: 10.25210/jfop-1801-037047

Илюшин Я. А. — д.ф.-м.н., доцент. Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова. Москва.
E-mail: ilyushin@physics.msu.ru

Кутуза Б. Г. — д.ф.-м.н., проф., зав.лаб. Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН; Российский новый университет. Москва. E-mail: kutuza@cplire.ru

Аннотация

В работе обсуждаются вопросы формирования и регистрации пространственного и углового распределения теплового радиоизлучения дождевых осадков в микроволновом диапазоне. Проводится численное моделирование переноса теплового радиоизлучения в трехмерной дождевой ячейке при различной интенсивности осадков с учетом несферической формы падающих дождевых капель и распределения их по размерам. Показана определяющая роль трехмерной неоднородности полей дождевых осадков в формировании поля их собственного теплового радиоизлучения в микроволновом диапазоне.

Ключевые слова: радиационный перенос, миллиметровые волны, радиометрия, радиозондирование, атмосфера, осадки

Abstract

In the present paper, the problems of formation and observation of spatial and angular distribution of thermal radiation of raining atmosphere in the millimeter wave band are addressed. Radiative transfer of microwave thermal radiation in three-dimensional dichroic medium is simulated numerically. Governing role of three dimensional cellular inhomogeneity of the precipitating atmosphere in the formation of thermal radiation field is shown.

Keywords: radiative transfer, millimeter waves, atmosphere, precipitation, radiometry

Введение

Пассивное зондирование на миллиметровых и субмиллиметровых волнах имеет ряд преимуществ по сравнению с другими техниками наблюдения облачности из космоса. По сравнению с измерениями солнечных отражений и теплового ИК излучения, микроволновая радиометрия более чувствительна к водозапасу и размеру частиц, поскольку длины волн соизмеримы с размерами кристаллов льда в перистых облаках.

В связи с этим, взаимодействие микроволнового излучения с осадками и облаками различных типов активно исследуется [1–3]. Многие из них состоят из несферических частиц, обладающих преимущественной ориентацией. По сравнению с макроскопически изотропными средами, в распространении излучения в таких средах особенно существенную роль играют поляризационные эффекты. При этом облака и осадки характеризуются вертикальной и горизонтальной неоднородностью распределения.

Впервые зоны выпадения осадков над морской поверхностью были зарегистрированы по данным микроволновой радиометрии в 1968 г. на ИСЗ Космос 243 [4]. При этом, по интенсивности излучения на нескольких длинах волн оценивалась интенсивность выпадения осадков. В дальнейшем, картирование осадков над земной поверхностью по мультиспектральным радиометрическим данным проводилось в экспериментах SSM/I [5] и TRMM, а также планируется в рамках проекта GPM (Global Precipitation Mission). Проведенные эксперименты убедительно показали критическую важность одновременных измерений интенсивности и поляризации излучения на нескольких длинах волн миллиметрового и сантиметрового диапазонов, в целях надежной идентификации зон дождевых осадков и оценки их интенсивности.

Целью настоящей работы являются теоретические оценки интенсивности и поляризации теплового радиоизлучения дождевых осадков, при наблюдении их мультиспектральными микроволновыми радиометрами из космоса. Проведение таких оценок приводит к необходимости численного моделирования полей микроволнового излучения в трехмерно-неоднородной среде, обладающей дихроизмом.

Недостатки одномерной плоскостной модели среды в задачах микроволновой радиометрии выявились еще в конце двадцатого столетия. Ранние исследования трехмерных моделей переноса излучения в атмосфере проводились в основном в связи с изучением влияния разорванной облачности на радиационные поля, главным образом при помощи методов Монте-Карло [6,7]. Авторы работы [8] впервые приме-

нили трехмерные модели радиационного переноса к микроволновым исследованиям. В дальнейшем, на основе результатов динамического моделирования облаков [9,10] была построена итерационная дискретно-ординатная схема расчета переноса излучения для произвольного трехмерного объема среды. Сравнения одномерной и трехмерной моделей сред проводились рядом авторов, в т.ч. [3,11–13]. В частности, в работе Лю [12] сообщается, что различия между одномерными и трехмерными расчетами, наблюдаемые преимущественно под наклонными углами визирования, обусловлены в основном чисто геометрическими эффектами. Согласно выводам этой работы, для учета этих геометрических эффектов необходима трехмерная или модифицированная одномерная модель.

Бауэр и др. [14] также обсуждает эффекты трехмерного распределения в наблюдаемых полях радиоярких температур при наблюдении в наклонных направлениях. Там же сделана попытка геометрической коррекции наблюдаемых радиоярких температур на частотах 37.0 и 85.5 ГГц на основе определения центров тяжести весовых функций радиоярких температур. Результаты исследования показывают значительное улучшение в результате геометрической коррекции. Однако, ограничения в применении коррекции могут быть связаны с использованием эмпирических весовых функций, оцененных по единственной реализации события в тропическом океане. Хонг и др. [15] исследовали подобные эффекты, в частности в наклонных конвективных системах, учитывая два противоположных азимутальных направления. Их исследование преимущественно сосредоточено на пространственно рассогласованных радиометрических сигналах между каналами 19 и 85 ГГц при наблюдении наклонных конвективных структур в тропических облаках с избранных направлений. В исследовании использовались два противоположных направления наблюдения для демонстрации азимутальной зависимости полей радиояркой температуры осадков.

В [16] используется приближение Эддингтона для одномерных задач [17] и ранее разработанный алгоритм Монте-Карло для трехмерных задач [3] и проводится сравнительное исследование этих двух подходов. Геометрические эффекты в радиометрии в результате неоднородности распределения осадков и различия направлений наблюдения исследованы в этой работе для различных типов дождевых облаков.

В [18] использована весьма продвинутая для своего времени модель радиационного переноса в среднеширотных перистых облаках ARTS-MC для моделирования наблюдений трех различных космических инструментов: Advanced Microwave Sounding Unit-B (AMSU-B) [19], the Cloud Ice Water Submillimetre Imaging Radiometer (CIWSIR) [20], and the Earth Observing System Microwave Limb Sounder (EOS-MLS) [21]. Результаты не только показывают возможности алгоритмов, но и позволяют оценить влияние неоднородности облаков на радиояркие температуры, наблюдаемые этими инструментами, и поляризационные эффекты, связанные с формой частиц. Неоднородность облаков и поляризационные эффекты имеют соответствующие последствия для оценок ледяных облаков, зависящих от одномерных скалярных прямых моделей радиационного переноса.

Эффект усреднения по полю зрения исследован рядом авторов, применительно к задачам оценки интенсивности осадков [22,23,13] и водозапаса в недождевых облаках [24].

Для идентификации влияния неоднородности облаков, проводились сравнения между реальными трехмерными моделями радиационного переноса и соответствующими эффективными одномерными моделями. Основные различия возникают по двум причинам. Во-первых, усреднение наблюдаемых интенсивностей по полю зрения прибора при большой оптической толщине вызывает систематическое расхождение с одномерными моделями с эквивалентной оптической толщиной, усредненной по полю зрения. Во-вторых, эффекты, возникающие от переноса излучения в поперечных направлениях в неоднородной среде, не отражены одномерными моделями.

Жидкокапельные водяные облака не представляют серьезных проблем для моделирования, поскольку в миллиметровом диапазоне длин волн в них практически полностью преобладает поглощение. Напротив, перистые облака имеют малый коэффициент поглощения [25] и значительный коэффициент рассеяния. Аэрозольное рассеяние требуется рассматривать в инфракрасном диапазоне. Молекулярное рассеяние Рэлея, существенное в оптическом диапазоне, может полностью игнорироваться в инфракрасном и микроволновом диапазонах длин волн.

Обзор ранее разработанных общедоступных моделей радиационного переноса показал, что ни одна из них не удовлетворяет в полной мере предъявляемым требованиям. В частности, трехмерные статистические модели [3,12] применяются только для макроскопически изотропных и зеркально симметричных сред, в которых можно пренебречь эффектами поляризации. Трехмерная дискретно-ординатная модель SHDOM [26] и VDOM [27] реализованы в декартовой геометрии и по этой причине неприменимы в случае касательного зондирования. Другие дискретно-ординатные модели, например MWMOD [28] и VDISORT [29], используют одномерную плоскопараллельную геометрию.

Другой хорошо известный подход на основе приближения Эддингтона [17] также неприменим к задачам касательного зондирования, поскольку работает только в плоскопараллельной атмосфере. Простая одномерная плоскопараллельная модель, использующая итеративный дискретно-ординатный метод [30], описана в работе [31]

По мере смещения приоритетов дистанционного зондирования в сторону более глубокого понимания микрофизики облаков, микроволновые расчеты радиационного переноса в атмосфере Земли продолжают привлекать значительное внимание исследователей. В дополнение к уточнению нелинейных соотношений между интенсивностью дождевых осадков и наблюдаемых из космоса радиоярких температур, (особенно с учетом эффекта заполнения, связанного с трехмерно неоднородной структурой облаков [13]), большой интерес связан с субмиллиметровым радиозондированием ледяных облаков (в частности, определение водности и ледности, размеров частиц [32,33] и определение типа гидрометеоров при известном объеме частиц [34]. Для достижения поставленных целей, значительное внимание было уделено поляризационным эффектам в рассеянии/излучении на частицах и поверхностях и эффектам, связанным с несферическими частично ориентированными частицами. Эти частицы могут обладать уникальными поляризметрическими сигнатурами [35], которые могут значительно облегчить процедуру инверсии. Заметим, что радиометры-поляриметры нового поколения, например Windsat, позволяют полностью измерять четыре параметра вектора Стокса, и для полноценной интерпретации требуют соответствующих алгоритмов и подходов. С другой точки зрения, влияние облаков может быть вредным. Так, в касательном зондировании земного лимба, ледяные облака могут значительно искажать результаты измерений газовых компонент атмосферы, а дождевые капли могут сильно ослаблять сигналы коммуникационных систем. В любом случае, эффекты поляризации/деполяризации должны аккуратно оцениваться. Это может быть сделано с помощью достоверного моделирования переноса излучения.

Первым шагом в этом направлении стало появление усовершенствованных трехмерных моделей облачности и алгоритмов переноса поляризованного излучения для таких моделей. Были разработаны компьютерные коды для расчетов сферических и хаотично ориентированных осесимметричных частиц. Коды обратного и прямо-обратного статистического моделирования (Монте-Карло) оказались весьма эффективными в этой области [3,12]. Эти методы, однако, непригодны для ориентированных частиц с недиагональной матрицей экстинкции, играющих важную роль в переносе поляризованного излучения в стратиформных осадках [36]. В таких ситуациях были апробированы обратные алгоритмы Монте-Карло [37], в частности, для конфигураций зондирования планетарного лимба.

Для решения векторного уравнения переноса поляризованного излучения, были разработаны одномерные численные модели [38,39,46]. К сожалению, в этих кодах атмосфера считается горизонтально однородной с бесконечно протяженными в горизонтальных направлениях плоскопараллельными слоями. Следующим шагом в развитии микроволновых кодов переноса излучения являются алгоритмы трехмерного моделирования с полным учетом поляризации. В работе Хаффермана [27] представлена трехмерная модель поляризованного радиационного переноса на основе метода дискретных ординат (ДО). Роберти и Куммеров [40] разработали код прямого статистического моделирования для ориентированных несферических гидрометеоров, но только для плоскопараллельных слоистых моделей среды. Более того, в этом коде анизотропные эффекты учитываются только в распространении, но не в процессе рассеяния. Это ограничение приводит к нефизическим представлениям фотонов, вектор Стокса которых лежит вне сферы Пуанкаре [41].

В [43] разработан трехмерный алгоритм прямого статистического моделирования для четырех компонент вектора Стокса для исследования трехмерных облаков из несферических частиц воды и льда. Как все алгоритмы прямого моделирования, например типа [42], этот код отличается надежностью и простотой. Эффекты анизотропии среды учитываются в нем как при распространении, так и в процессе рассеяния. Недостатком алгоритма, связанным с его относительной простотой является достаточно длительное время расчета, в связи с чем его практическое применение ограничено оптическими толщинами среды, не превышающими нескольких единиц.

В работе [44] представлена трехмерная (3D) модель переноса поляризованного излучения, разработанная для оценок влияния cirrus clouds на результаты измерений инструмента Earth Observing System Microwave Limb Sounder EOS-MLS. Этот инструмент размещен на ИСЗ Aura, запущенном в 2004 г. Модель радиационного переноса использует обратный алгоритм Монте-Карло, и является частью пакета Atmospheric Radiative Transfer Simulator 1.1.x. В этой работе модель используется для изучения ряда аспектов проблем рассеяния, отсутствующих в актуальной на тот момент штатной расчетной модели EOS-MLS для облачного неба, в т.ч. ориентированных несферических частиц атмосферных осадков и неоднородной трехмерной структуры облаков. В этой работе представлен собственно алгоритм и типичные результаты моделирования, показывающие значительное влияние эффектов поляризации и трехмерной неоднородности. Хотя модель была изначально разработана в связи с проектом EOS-MLS, она также непосредственно применима к надирным и наземным наблюдениям.

В [30] описан один из алгоритмов рассеяния трехмерной поляризационной модели радиационного переноса ARTS, которая была разработана для исследования, в том числе, влияния cirrus перистых облаков на микроволновое зондирование лимба. Модель использует итерационный метод дискретных ординат для решения векторного уравнения переноса излучения. Применение метода дискретных ординат усложня-

ется сферической геометрией модели атмосферы, которая необходима при моделировании зондирования лимба планеты. В работе обсуждаются соответствующие вычислительные приемы, такие как оптимизация сетки и методы интерполяции. Представлены результаты для одномерной и трехмерной моделей сферической атмосферы при зондировании лимба и в надир. Они показывают эффект влияния размера, формы и ориентации облачных частиц на поляризацию микроволнового излучения в атмосфере. Указанные эффекты при касательном зондировании многократно сильнее, чем при надирном зондировании. Размер частиц оказывается одним из важнейших параметров во всех расчетах. Для хаотически ориентированных частиц наблюдение поляризации излучения не существенно. В то же время, для горизонтально ориентированных частиц со случайными азимутальными углами ориентации, важна регистрация поляризации наблюдаемого излучения. Более того, форма частиц играет существенную роль лишь в случае их преимущественной ориентации. Результаты моделирования показывают, что для неоднородных облачных слоев требуется применение трехмерных моделей радиационного переноса.

В [45] также проведено сравнение численных результатов одномерной и трехмерной моделей радиационного переноса микроволнового излучения в осадках, и показаны значительные несоответствия, в основном в части поляризации. В настоящей работе с помощью разработанной вычислительной модели [1] моделируется эксперимент по микроволновой радиометрии дождевых ячеек, и обсуждается возможность оценки интенсивности осадков по данным одновременных измерений на нескольких длинах волн.

1. Модель среды

В настоящей работе для практических расчетов нами принята вычислительная модель, ранее разработанная в работе [1]. В этой модели дождевая ячейка представлена в виде куба $3 \times 3 \times 3$ км, равномерно заполненного падающими каплями [2], распределенными по размерам согласно распределению Маршалла-Пальмера [46]. Выбранные размеры близки к типичным размерам реальных дождевых ячеек [47] и к характерным масштабам пространственной неоднородности стохастических моделей переноса излучения в дождевых осадках [48].

Подстилающая поверхность приближенно считается плоской изотропно излучающей серой (неабсолютно черной) поверхностью, частично отражающей падающее на нее излучение по ламбертовскому закону. Собственное тепловое излучение поверхности незначительно поляризовано в вертикальной плоскости [49].

Термодинамическая температура атмосферы в моделях ячейки и плоского слоя неоднородна и падает с высотой $T_2 = (300 - 7z)$ К, где z — высота в км. Подстилающая поверхность также считается черной либо серой в пределах площади основания кубической ячейки. Вне этой площади поверхность считается абсолютно черной. Все расчеты дождевых ячеек с серой подстилающей поверхностью были проведены с коэффициентом ламбертовского отражения $R = 0.25$. Все расчеты электрических свойств дождевых капель по приведенным выше формулам проводились для температуры воды $T = 0^\circ$ С. Методика и результаты расчетов радиационных свойств дождевых капель изложены в работе [1].

Поглощение жидкокапельными облаками и молекулами атмосферных газов учитывается в виде отдельного вклада в общее поглощение в среде. Принимая для полного интегрального содержания водяного пара и водозапака жидкокапельного облака в ячейке типичные значения 2 г/см^2 и 0.5 кг/м^2 соответственно, с учетом молекулярного поглощения кислородом в расчетах были приняты величины дополнительного истинного поглощения 0.33, 0.066 и 0.013 Нп/км, соответственно для длин волн 3, 8 и 22.5 мм [1].

Комплексная диэлектрическая проницаемость жидкой воды определяется формулой Дебая [50,51,53]

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_0}{1 + i\Delta\lambda / \lambda}, \quad (1)$$

где

$$\Delta\lambda = 2\pi\tau_p \frac{\varepsilon_s + 2}{\varepsilon_0 + 2}, \quad (2)$$

где ε_s — статическая диэлектрическая проницаемость воды (на частотах $\nu \ll 1/\tau_p$), $\varepsilon_0 \approx 4.9$ — оптическая диэлектрическая проницаемость воды (на частотах $\nu \gg 1/\tau_p$), время релаксации [51]

$$\tau_p = \exp \left\{ 9.8 \left(\frac{273}{T + 273} - 0.955 \right) \right\} \cdot 10^{-12} \text{ с}. \quad (3)$$

Статическая диэлектрическая проницаемость воды описывается приближенной формулой [49]

$$\varepsilon_s(T) = 88.045 - 0.4147T + 6.295 \cdot 10^{-4} T^2 + 1.075 \cdot 10^{-5} T^3. \quad (4)$$

Геометрическую модель дождевых капель несферической формы можно найти, например, в [52]. С хорошей степенью приближения можно считать, что падающие капли имеют форму сплюснутого сфероида с вертикально ориентированной осью симметрии. Отношение осей сфероида приближенно задается формулой [50]

$$\frac{b}{a} = 1 - 0.091 \bar{a}, \quad (5)$$

где a — радиус сферической капли эквивалентного объема в мм.

Распределение капель по размерам в дождевых осадках задается формулой Маршалла-Пальмера [46]

$$n(\bar{a}) = N_0 \exp(-q\bar{a}), \quad (6)$$

где $N_0 = 16000 \text{ м}^{-3} \text{ мм}^{-1}$, $q = 8.2 R^{-0.21}$, R — интенсивность дождя, мм в час.

Сечения ослабления и рассеяния для сфероидальных частиц фиксированной ориентации могут быть вычислены методом Т-матриц с помощью общедоступных компьютерных кодов [54]. Таким образом, в рамках построенной модели могут быть вычислены радиационные характеристики среды (поглощение и рассеяние электромагнитных волн заданной частоты и поляризации единицей объема).

Графики рассчитанных зависимостей ослабления и поглощения микроволнового излучения различных диапазонов в дождевых осадках приведены в работах [1,45]. Результаты расчетов свидетельствуют о выраженном дихроизме среды, в особенности в направлениях, близких к горизонтали.

2. Перенос излучения в анизотропной рассеивающей среде

Пространственно-угловое распределение интенсивности и поляризации теплового излучения в среде дождевых осадков подчиняется векторному уравнению переноса излучения

$$(\vec{\Omega} \cdot \nabla) \mathbf{I}(\vec{r}, \vec{\Omega}) = -\hat{\sigma}_e \mathbf{I}(\vec{r}, \vec{\Omega}) + \bar{\sigma}_a B_\lambda(T) + \frac{1}{4\pi} \int_{4\pi} \hat{\chi}(\vec{\Omega}, \vec{\Omega}') \mathbf{I}(\vec{r}, \vec{\Omega}') d\vec{\Omega}', \quad (7)$$

где $\vec{\Omega} = (\mu_x, \mu_y, \mu_z)$ — единичный вектор произвольного направления, $\mathbf{I}(\vec{z}, \vec{\Omega}) = \{I, Q, U, V\}$ — вектор параметров Стокса поляризованного излучения, $\hat{\sigma}_e = \hat{\sigma}_e(\vec{\Omega})$ — матрица ослабления поляризованного излучения в среде, $\bar{\sigma}_a$ — вектор истинного поглощения излучения в среде, $\hat{\chi}(\vec{\Omega}, \vec{\Omega}')$ — матрица рассеяния, $B_\lambda(T)$ — функция Планка. Формулы для вычисления компонент вектора поглощения $\bar{\sigma}_a$ приведены в [46].

В атмосфере Земли для миллиметровых и более длинных волн удовлетворительно выполняется закон Рэлея-Джинса для теплового радиоизлучения. Поэтому, параметры Стокса теплового излучения земной атмосферы выражаются непосредственно через эквивалентную температуру черного тела (радиояркостную температуру).

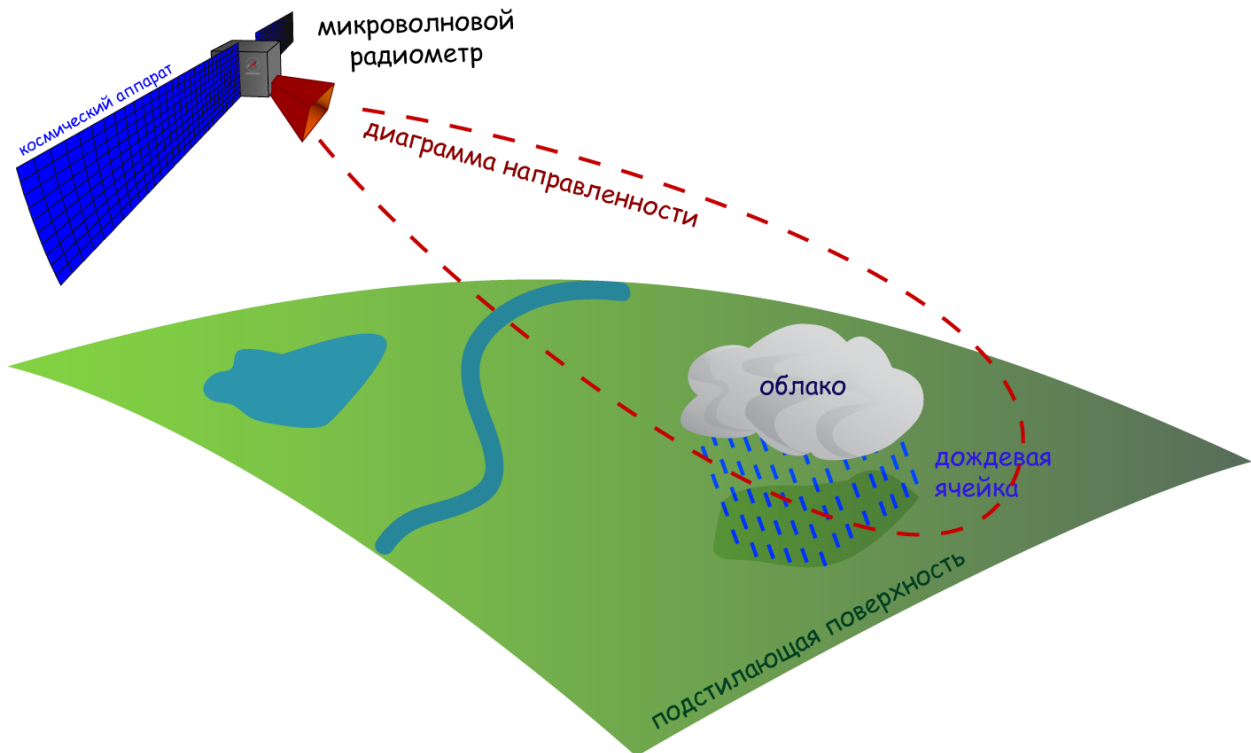


Рис. 1. Схема эксперимента по радиометрии микроволнового излучения осадков из космоса.

Моделирование пространственных и угловых распределений интенсивности и поляризации микроволнового излучения в среде с осадками заключается в численном решении уравнения (7) в соответствующей области среды вместе с граничными условиями, определяемыми излучением внешних источников, падающим на границы области. В принятой здесь расчетной модели граничные условия учитывают вклад излучения подстилающей поверхности и частичное отражение от нее, а также излучение поглощающей окружающей атмосферы [1].

2.1. Уравнение переноса излучения в трехмерной дождевой ячейке

Уравнение переноса излучения в трехмерной среде решалось методом дискретных ординат. Соответствующее трехмерное уравнение в дискретных ординатах

$$\mu_{xi} \frac{\partial}{\partial x} \mathbf{I}_i + \mu_{yi} \frac{\partial}{\partial y} \mathbf{I}_i + \mu_{zi} \frac{\partial}{\partial z} \mathbf{I}_i = -\hat{\sigma}_e \mathbf{I}_i + 2\pi \sum_{l,j} x(\vec{\Omega}_i, \vec{\Omega}_j) a_j \mathbf{I}_j + S F_i(z), \quad (8)$$

где $\vec{\Omega}_i = \{\mu_{xi}, \mu_{yi}, \mu_{zi}\}$ — единичный вектор направления i -го узла сферической квадратурной формулы, вместе с дискретизованными граничными условиями, входящими в краевую задачу, решалось конечно-разностным методом (схема со встречными разностями, [56]) последовательными итерациями с выходом решения на стационарный режим. Интеграл рассеяния на сфере приближенно вычислялся по гауссовой квадратурной формуле 29-го порядка точности G29 [55].

Усредненный вклад ячейки в поток поляризованного излучения, наблюдаемый радиометром из космоса, определяется интегралом по площади проекции поверхности верхней и двух боковых граней прямоугольной ячейки, нормированным на суммарную площадь этой проекции (рис. 2).

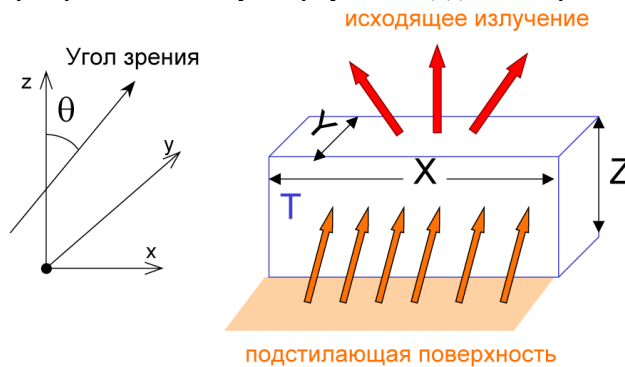


Рис. 2. Схематическое изображение радиотепловой вычислительной модели дождевой ячейки.

3. Результаты моделирования

На рис. 3 представлены результаты численного моделирования наблюдаемых распределений интенсивности теплового радиоизлучения по видимой поверхности дождевой ячейки на длине волны 15.4 мм. Наблюдаемые распределения приведены на рисунках для ряда значений интенсивности дождя для черной ($R = 0$) и серой ($R = 0.25$) подстилающей поверхности. При малых интенсивностях дождя (небольшие оптические толщины объекта) практически через объект наблюдается на просвет тепловое излучение подстилающей поверхности, мало искаженное ослаблением и рассеянием в незначительной толще осадков. По мере роста интенсивности дождя влияние оптической толщины осадков растет, особенно в средней части видимой проекции дождевой ячейки. Наблюдаемое в центральной области проекции излучение при умеренных и средних интенсивностях дождя формируется преимущественно в толще осадков. На краях видимой проекции ячейки оптическая толщина мала, и вклад подстилающей поверхности в наблюдаемое излучение значителен.

На рис. 4 приведены аналогичные распределения для поляризации излучения (второй параметр Стокса Q). Так же как и на рис. 3, в центральной области видимой проекции ячейки видна область преимущественного вклада осадков в наблюдаемое поле теплового излучения. С ростом интенсивности дождя, степень влияния дождевой среды на поле радиотеплового излучения дождевой ячейки увеличивается, что проявляется в различной поляризации центральных и краевых областей проекции дождевой ячейки.

На рис. 5 представлены средние наблюдаемые радиояркостные температуры ($T = I / 2$) по наблюдаемой поверхности дождевой ячейки [1] (на рис. 6 — средние значения параметра Стокса Q , соответственно). На рис. 5 введены следующие обозначения: кривые — одномерная модель плоскостной рассеивающей среды. Жирные кривые — коэффициент ламбертовского диффузного отражения подстилающей поверхности $R = 0.25$. Тонкие кривые — абсолютно черная подстилающая поверхность $R = 0$. Сплошные кривые — дополнительно учтено поглощение жидкокапельными облаками, водяным паром и кислородом атмосферного воздуха. Пунктирные кривые — учет дополнительного поглощения отсутствует. Трехмерная модель кубической ячейки среды: длины волны $\lambda = 3,8$ и 22 мм, интенсивность дождя $RR = 1, 5, 10$ и 20 мм/ч. Круговые маркеры — абсолютно черная подстилающая поверхность, дополнительное поглощение отсутствует. Крестовые маркеры — абсолютно черная подстилающая поверхность, присутствует дополнительное поглощение. Треугольные и прямоугольные маркеры — коэффициент ламбертовского отражения подстилающей поверхности $R = 0.25$, дополнительное поглощение в среде присутствует и отсутствует, соответственно. Тепловое излучение абсолютно черной поверхности $I_{1b} = 2T_{1b}$, $T_{1b} = 300$ K, $Q_{1b} = 10$ K. Тепловое излучение серой (ламбертовской) поверхности $I_1 = 2T_1$, $T_1 = 225$ K, $Q_1 = 7.5$ K.

Stokes parameter I wave length 15.4 mm G29 node 89 of 302 $\theta = 69^\circ \varphi = 22^\circ$

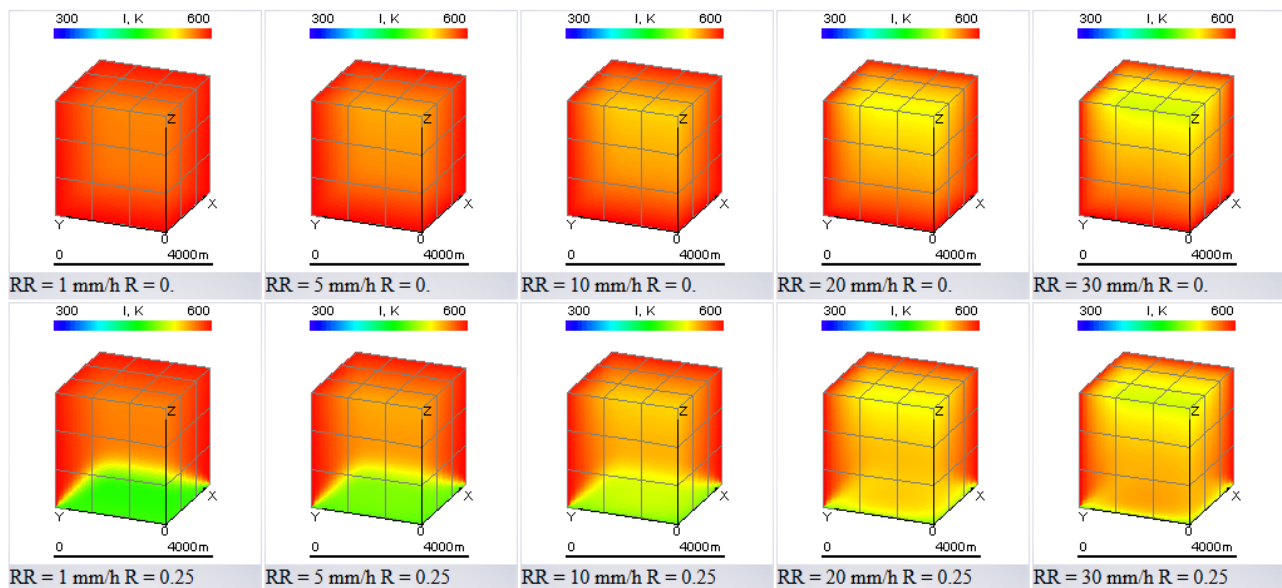


Рис. 3. Распределение интенсивности излучения I по наблюдаемой поверхности дождевых ячеек. Длина волны 15.4 мм, интенсивность дождя 1–30 мм/ч. Верхний ряд — черная подстилающая поверхность ($R=0$), нижний ряд — серая подстилающая поверхность ($R=0.25$).

Stokes parameter Q wave length 15.4 mm G29 node 89 of 302 $\theta = 69^\circ \varphi = 22^\circ$

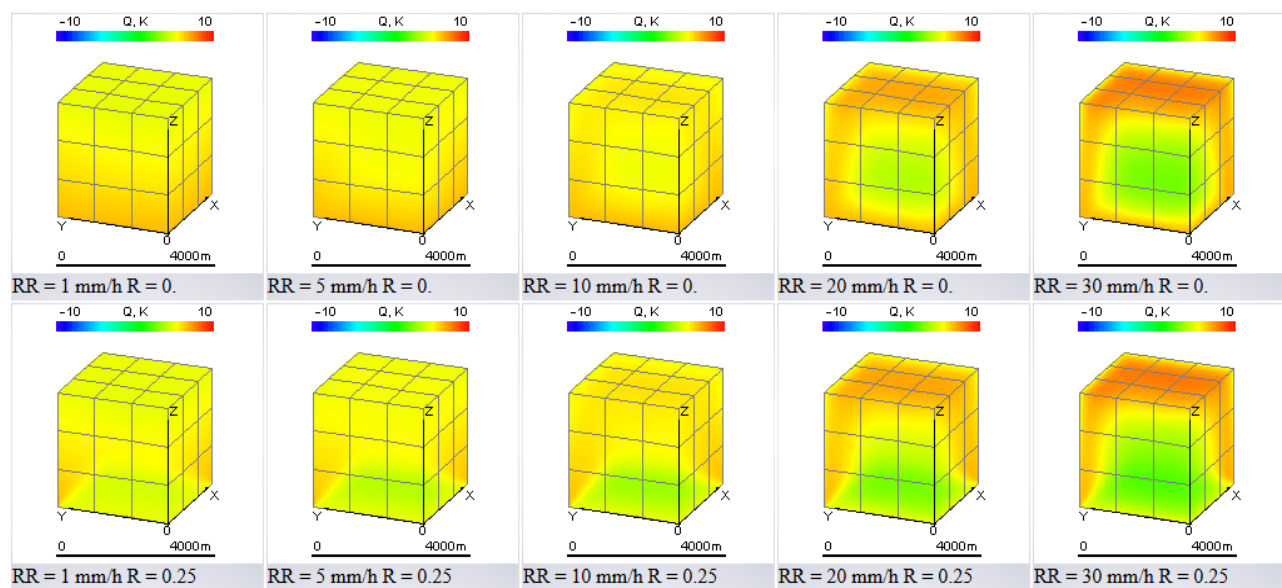


Рис. 4. Распределение второго параметра Стокса Q по наблюдаемой поверхности дождевых ячеек. Длина волны 15.4 мм, интенсивность дождя 1–30 мм/ч. Верхний ряд — черная подстилающая поверхность ($R=0$), нижний ряд — серая подстилающая поверхность ($R=0.25$).

Можно видеть, что яркостная температура зависит в основном от длины волны, в то время как зависимость от интенсивности дождя выражена относительно слабо. Напротив, зависимости поляризации как от длины волны, так и от интенсивности дождя ярко выражены и представляют большой исследовательский интерес.

На рис. 6 введены обозначения. Кривые — одномерная модель плоскостной рассеивающей среды. Жирные кривые — коэффициент ламбертовского диффузного отражения подстилающей поверхности $R=0.25$. Тонкие кривые — абсолютно черная подстилающая поверхность $R=0$. Сплошные кривые — дополнительно учтено поглощение жидкокапельными облаками, водяным паром и кислородом атмосферного воздуха. Пунктирные кривые — учет дополнительного поглощения отсутствует. Трехмерная модель кубической ячейки среды: длина волны $\lambda = 3.8$ и 22 мм, интенсивность дождя $RR = 1, 5, 10$ и 20 мм/ч. Круговые маркеры — абсолютно черная подстилающая поверхность, дополнительное поглощение отсут-

ствует. Крестовые маркеры — абсолютно черная подстилающая поверхность, присутствует дополнительное поглощение. Треугольные и прямоугольные маркеры — коэффициент ламбертовского отражения подстилающей поверхности $R = 0.25$, дополнительное поглощение в среде присутствует и отсутствует, соответственно. Тепловое излучение абсолютно черной поверхности $I_{1b} = 2T_{1b}$, $T_{1b} = 300$ К, $Q_{1b} = 10$ К. Тепловое излучение серой (ламбертовской) поверхности $I_1 = 2T_1$, $T_1 = 225$ К, $Q_1 = 7.5$ К.

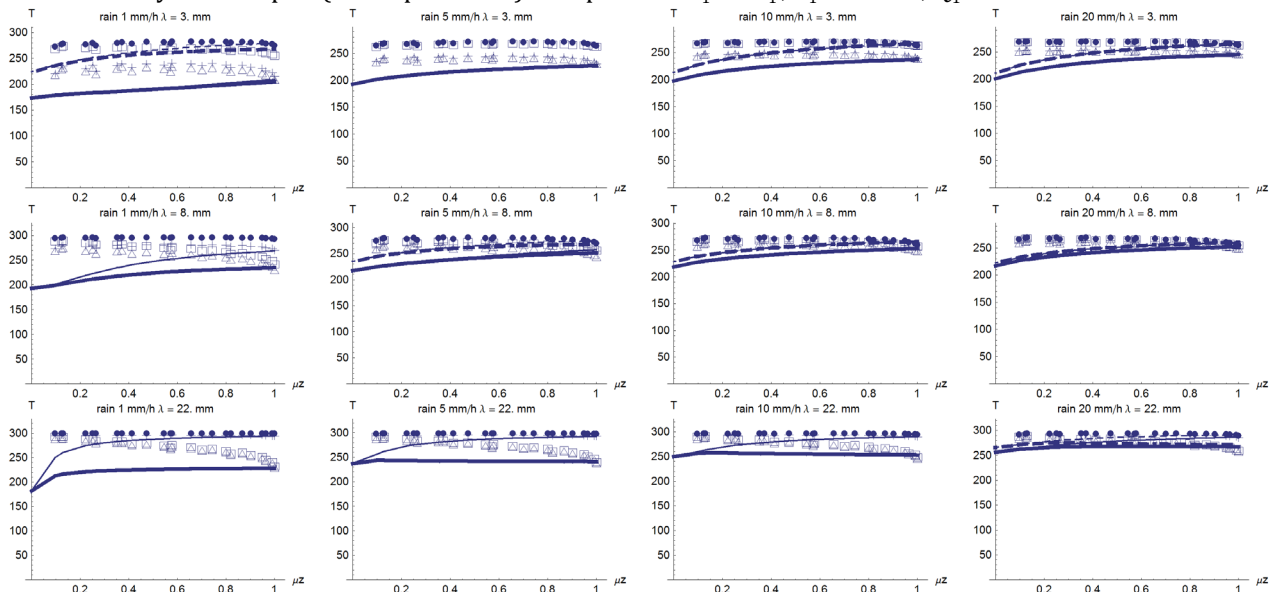


Рис. 5. Средняя радиояркостьная температура $T = I / 2$ по наблюдаемой поверхности кубической дождевой ячейки $3 \times 3 \times 3$ км в зависимости от косинуса зенитного угла $\mu_z = \cos \theta$.

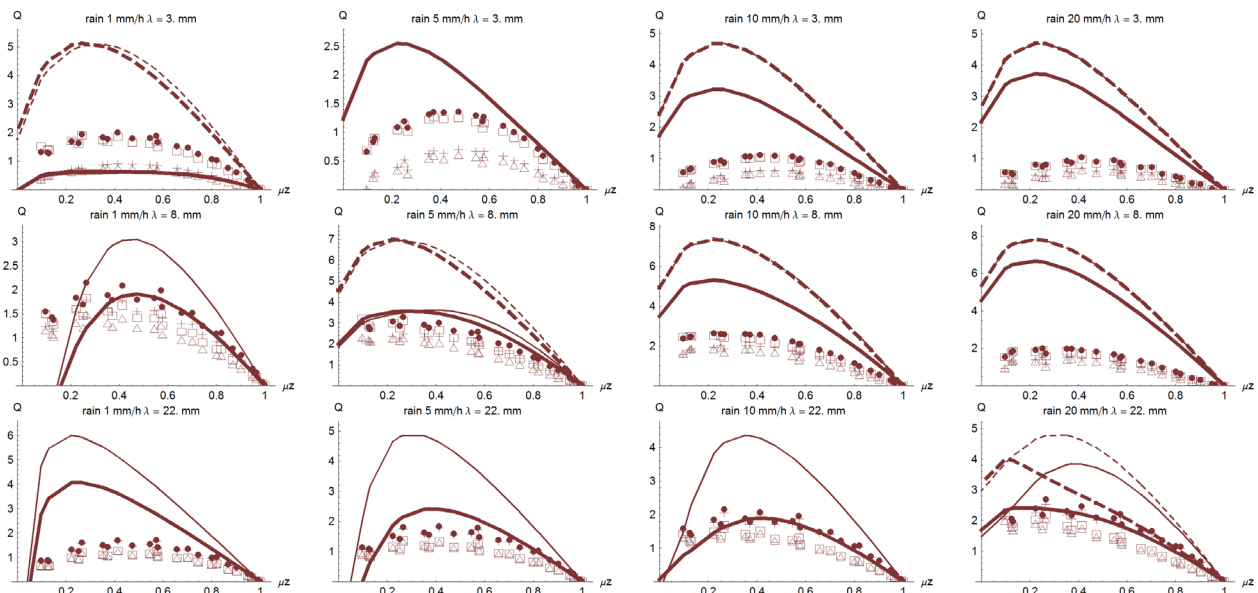


Рис. 6. Второй параметр Стокса теплового излучения Q в среднем по наблюдаемой поверхности кубической дождевой ячейки $3 \times 3 \times 3$ км в зависимости от косинуса зенитного угла $\mu_z = \cos \theta$.

Более того, различный характер зависимостей параметра от интенсивности отмечается для каждого конкретного значения длины волны из тех, для которых проводилось моделирование. Индивидуальные различия указанных зависимостей приводят к тому, что набор усредненных значений интенсивности и поляризации наблюдаемого теплового излучения на нескольких длинах волн составляет характерную сигнатуру, уникальным образом идентифицирующую объект (дождевую ячейку) с определенной интенсивностью дождевых осадков внутри нее.

Это, в свою очередь, открывает перспективы для создания системы обнаружения и идентификации областей выпадения дождевых осадков по данным пассивного микроволнового зондирования из космоса с возможностью оценки интенсивности дождя в ячейках.

4. Обсуждение результатов расчетов и выводы

В работе проведено компьютерное моделирование теплового излучения дождевой ячейки путем прямого численного решения уравнения переноса. 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. Полученный материал может представлять интерес при интерпретации спутниковых СВЧ радиометрических измерений осадков. Расчеты подтверждают наличие поляризации у ячейки дождя, в зависимости от интенсивности дождя и угла наблюдения составляющей 2–3 градуса Кельвина в среднем по наблюдаемой поверхности ячейки. Пространственное разрешение существующих орбитальных СВЧ радиометров составляет 15–20 км, что существенно превышает размер дождевой ячейки. В этом случае в поле зрения СВЧ радиометра попадает одновременно несколько ячеек, интенсивность дождя в которых сильно изменчива в пространстве и во времени. Учитывая большой вклад поляризации подстилающей поверхности, на его фоне нет возможности оценить эффект поляризации излучения осадков, поскольку при большом размере поля зрения нельзя разделить вклады дождевых капель и подстилающей поверхности в поляризацию наблюдаемого излучения. Для того чтобы использовать поляризационный эффект кучевых (конвективных) дождевых облаков для интерпретации данных зондирования, необходимо существенно улучшить пространственное разрешение радиометра, с тем чтобы размер поля зрения на поверхности был сравнимым или меньшим размера дождевой ячейки. Это может быть сделано с помощью миллиметрового интерферометра с синтезированной апертурой, а также с использованием больших антенн (размером 4–5 м) с возможностью механического или электрического сканирования.

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) № 15–02–05476 "Разработка новых методов и средств метеорологического радиолокационного зондирования атмосферных осадков в миллиметровом диапазоне". Авторы благодарят администрацию НИВЦ МГУ им. М. В. Ломоносова за предоставленный доступ к вычислительным ресурсам высокопроизводительных параллельных суперкомпьютерных комплексов СКИФ-ГРИД "Чебышев" и "Ломоносов" [57].

Список литературы

1. Илюшин Я. А., Кутуза Б. Г. Длительность пространственной структуры осадков на поляризационные характеристики уходящего микроволнового излучения атмосферы // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2016. Т. 52. № 1. С. 83–91.
2. Battaglia, A., Davis, C. P., Emde, C., and Simmer, C. Microwave Radiative Transfer Intercomparison Study for 3-D Dichroic Media // Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. 2007. Vol. 105. No. 1. P. 55–67.
3. Roberti, L., Haferman, J., and Kummerow, C. Microwave Radiative Transfer Through Horizontally Inhomogeneous Precipitating Clouds // Journal of Geophysical Research. 1994. Vol. 99. No. D8. P. 16.707–16.718.
4. Башаринов А. Е., Гурвич А. С., Егоров Т. С. Радиоизлучение Земли, как планеты. М.: Наука, 1974 г. 188 с.
5. Spencer, R. W., Goodman, H. M., and Hood, R. E. Precipitation Retrieval Over Land and Ocean with the SSM/I: Identification and Characteristics of the Scattering Signal // J. Oceanic Technol. 1989. Vol. 6. P. 254–273.
6. Каргин Б. А., Краснокутская Л. Д., Фейгельсон Е. М. Отражение и поглощение лучистой энергии Солнца облачными слоями // Изв. АН СССР, Физика атмосферы и океана. 1972. Т. 8. № 5. С. 505–517.
7. McKee, T. B., and Cox, S. K. Scattering of Visible Radiation by Finite Clouds // J. Atmos. Sci. 1974. No. 31. P. 1885–1892.
8. Weinman, J. A., Davies, R. Thermal Microwave Radiances From Horizontally Finite Clouds of Hydrometeors // J. Geophys. Res. 1978. Vol. 83. No. C6. P. 3099–3107, Doi:10.1029/JC083iC06p03099.
9. Tao W. K., Simpson, J., and Soong, S. T. Statistical Properties of a Cloud Ensemble: a Numerical Study // J Atmos Sci. 1987. No. 44. P. 3175–3187.
10. Tripoli, G. J. A Nonhydrostatic Mesoscale Model Designed to Simulate Scale Interaction // Mon. Wea. Rev. 1992. No. 120. P. 1342–1359.
11. Haferman, J. L., Krajewski, W. F., and Smith, T. F. Three-Dimensional Aspects of Radiative Transfer in Remote Sensing of Precipitation: Application to the 1986 COHMEX Storm // J. Appl. Meteorol. Dec. 1994. Vol. 33. No. 12. P. 1609–1622.
12. Liu, Q., Simmer, C., Ruprecht, E. Three-Dimensional Radiative Transfer Effects of Clouds in the Microwave Spectral Range // Journal of Geophysical Research Atmospheres. 1996. Vol. 101(D2). Art. No. 95JD03421. P. 4289–4298.
13. Kummerow, C. Beamfilling Errors in Passive Microwave Rainfall Retrievals // J. Appl. Meteorol. Apr. 1998. Vol. 37. No. 4. P. 356–370.
14. Bauer, P., Schanz, L., and Roberti, L. Correction of Three-Dimensional Effects for Passive Microwave Remote Sensing of Convective Clouds // J. Appl. Meteorol. Dec. 1998. Vol. 37. No. 12. P. 1619–1632.
15. Hong, Y., Haferman, J. L., Olson, W. S., and Kummerow, C. D. Microwave Brightness Temperatures From Tilted Convective Systems // J. Appl. Meteorol. Jul. 2000. Vol. 39. No. 7. P. 983–998.
16. Sung-Woo Kim, Dong-Bin Shin, and Yeji Choi. Effects of the Three-Dimensional Hydrometeor Distributions of Precipitating Clouds on Passive Microwave Rainfall Estimations // IEEE Transactions on Geoscience And Remote Sensing 2016.
17. Kummerow, C. on the Accuracy of the Eddington Approximation for Radiative Transfer in the Microwave Frequencies // J. Geophys. Res. Feb. 1993. Vol. 98. P. 2757–2765.
18. Davis, C. P., Evans, K. F., Buehler, S. A., Wu, D. L., and Pumphrey, H. C.: 3-D Polarised Simulations of Space-Borne Passive mm/Sub-mm Midlatitude Cirrus Observations: a Case Study // Atmos. Chem. Phys. 2007. No. 7. P. 4149–4158. doi:10.5194/Acp-7-4149-2007, .

19. *Atkinson, N.C.* Calibration, Monitoring and Validation of AMSU-B // *Advances in Space Research*. 2001. Vol. 28. No. 1. P. 117–126.
20. *Buehler, S.A.* Cloud Ice Water Submillimeter Imaging Radiometer (CIWSIR) Mission. 2005.
21. *Waters, J.W., Froidevaux, L., Harwood, R.S., Jarnot, R.F., Pickett, H.M., Read, W.G., Siegel, P.H., Cofield, R.E., Filipiak, M.J., Flower, D.A., Holden, J.R., Lau, G.K., Livesey, N.J., Manney, G.L., Pumphrey, H.C., Santee, M.L., Wu, D.L., Cuddy, D.T., Lay, R.R., Loo, M.S., Perun, V.S., Schwartz, M.J., Stek, P.C., Thurstans, R.P., Boyles, M.A., Chandra, K.M., Chavez, M.C., Chen, G.-S., Chudasama, B.V., Dodge, R., Fuller, R.A., Girard, M.A., Jiang, J.H., Jiang, Y., Knosp, B.W., Labelle, R.C., Lam, J.C., Lee, K.A., Miller, D., Oswald, J.E., Patel, N.C., Pukala, D.M., Quintero, O., Scaff, D.M., Van Snyder, W., Tope, M.C., Wagner, P.A., and Walch, M.J.* The Earth Observing System Microwave Limb Sounder (EOS MLS) on the Aura Satellite // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2006. Vol. 44. No. 5. P. 1075–1092.
22. *Wilheit, T.T., Chang, A.T.C., Rao, M.S.V., Rogers, E.B., Theon, J.S.* Satellite Technique for Quantitatively Mapping Rainfall Rates Over the Oceans // *Journal of Applied Meteorology*. 1977. Vol. 16. No. 5. P. 551–560.
23. *McCollum, J.R., Krajewski, W.F.* Investigations of Error Sources of the Global Precipitation Climatology Project Emission Algorithm // *Journal of Geophysical Research Atmospheres*. 1998. Vol. 103. No. D22. Art. no. 98JD02580. P. 28711–28719.
24. *Lafont, D., Guillemet, B.* Subpixel Fractional Cloud Cover and Inhomogeneity Effects on Microwave Beam-Filling Error // *Atmospheric Research*. 2004. Vol. 72. No. 1–4. P. 149–168.
25. *Mishchenko, M. I., Travis, L. D., and Lacis, A. A.* Scattering, Absorption, and Emission of Light by Small Particles, Cambridge Univ. Press, New York. 2002.
26. *Evans, K. F.* The Spherical Harmonics Discrete Ordinate Method for Three-Dimensional Atmospheric Radiative Transfer // *J. Atmos. Sci.* 1998. No. 55. P. 429–466.
27. *Haferman, J. L., Smith, T. F., and Krajewski, W. F.* A Multi-Dimensional Discrete-Ordinates Method for Polarised Radiative Transfer. Part 1: Validation for Randomly Oriented Axisymmetric Particles // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*. 1997. No. 58. P. 379–398.
28. *Simmer, C.* Handbuch Zu MWMOD, Kieler Strahlungstransport-Modell Fuer Den Mikrowellenbereich. 1993.
29. *Schulz, F. M., and Stamnes, K.* 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. No. 65. P. 609–620.
30. *Emde, C., Buehler, S.A., Davis, C., Eriksson, P., Sreerekha, T. R., and Teichmann, C.* 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. No. 109. D24207. Doi:10.1029/2004JD005140.
31. *Sreerekha, T. R., Buehler, S. A., and Emde, C.* A Simple New Radiative Transfer Model for Simulating the Effect of Cirrus Clouds in the Microwave Spectral Region // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*. 2002. No. 75. P. 611–624.
32. *Evans, K.F., Walter, S.J., Heymsfield, A.J., and McFarquhar, G.M.* Sub-Millimeter-Wave Cloud Ice Radiometer: Simulations of Retrieval Algorithm Performances // *J. Geophys. Res.* 2002. No. 107(D3).
33. *Czekala, H.* Effects of Ice Particle Shape and Orientation on Polarized Microwave Radiation for Off-Nadir Problems // *Geophys. Res. Lett.* 1998. No. 25. P. 1669–1672.
34. *Czekala, H.* Discrimination of Cloud and Rain Liquid Water Path by Ground-Based Polarized Microwave Radiometry // *Proceedings of the Eighth Specialist Meeting on Microwave Radiometry and Remote Sensing Applications*, Rome, Italy. 2004.
35. *Liu, Q., Simmer, C.* Polarization and Intensity in Microwave Radiative Transfer // *Beitr. Phys. Atmos.* 1996. No. 69. P. 535–45.
36. *Evans, K.F., Stephens, G.L.* Microwave Radiative Transfer Through Clouds Composed of Realistically Shaped Ice Crystals. II. Remote Sensing of Ice Clouds // *J. Atmos. Sci.* 1995. No. 52. P. 2058–2072.
37. *Davis, C.* A New 3-D Polarized Radiative Transfer Model for Remote Sensing in Cloudy Atmosphere. In: *Proceedings of the Eighth Specialist Meeting on Microwave Radiometry and Remote Sensing Applications*, Rome, Italy; 2004.
38. *Evans, K.F., Stephens, G.L.* A New Polarized Atmospheric Radiative Transfer Model // *JQSRT*. 1991. No. 46. P. 413–423.
39. *Wauben, W.M.F., Hovenier, J.W.* Polarized Radiation of an Atmosphere Containing Randomly-Oriented Spheroids // *JQSRT*. 1992. No. 47. P. 491–504.
40. *Roberti, L., Kummerow, C.* Monte Carlo Calculations of Polarized Microwave Radiation Emerging From Cloud Structures // *J. Geophys. Res.* 1999. No. 104. P. 2093–2104.
41. *Tsang, L., Kong, J.A., Shin, R.T.* Theory of Microwave Remote Sensings' Guide. New York: Wiley-Interscience; 1989.
42. *Battaglia, A., Kummerow, C.* Forward Montecarlo Computations of Polarized Microwave Radiation // *Proceedings of the 13th International Conference on Clouds and Precipitation*, Reno Area, Nevada, USA. 2000. P. 256–259.
43. *Battaglia, A., Mantovani, S.* Forward Monte Carlo Computations of Fully Polarized Microwave Radiation in Non-Isotropic Media // *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. 2005. No. 95. P. 285–308.
44. *Davis, C.E., Harwood, R.* 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*. May 2005. Vol. 43. No. 5. P. 1096–1101. Doi:10.1109/TGRS.2004.837505
45. *Ilyushin, Y.A., Kutuza, B.G., Sprenger, A.A., and Merzlikin, V.G.* Intensity and Polarization of Thermal Radiation of Three-Dimensional Rain Cells in the Microwave Band // *AIP Conference Proceedings*. 2017. Vol. 1810. Paper No. 040003.
46. *Czekala, H., Simmer, C.* Microwave Radiative Transfer with Nonspherical Precipitating Hydrometeors // *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. 1998. Vol. 60. No. 3. P. 365–374.
47. *Begum, S., Otung, I. E.* Rain Cell Size Distribution Inferred From Rain Gauge and Radar Data in the UK // *Radio Sci.* 2009. Vol. 44. P. RS2015. Doi:10.1029/2008RS003984.
48. *Tsintikidis, D., Haferman, J.L., Anagnostou, E.N., Krajewski, W.F., and Smith, T. F.* Neural Network Approach to Estimating Rainfall From Spaceborne Microwave Data // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 1997. Vol. 35 No. 5. P. 1079–1093.
49. *Ulaby, F. T., Moore, R. K., and Fung, A. K.* Microwave Remote Sensing, Active and Passive, V.1. Addison-Wesley, Reading, MA, 1981.
50. *Евтушенко А. В., Загорин Г. К., Кутуза Б. Г., Собачкин А. А., Хорнбостел А., Шрот А.* Определение вектора Стокса собственного и рассеянного СВЧ излучения атмосферы

- с осадками // Известия Академии наук. Физика атмосферы и океана. 2002. Т. 38. № 4. С. 529–536.
51. Аквилонова А. Б., Кутуза Б. Г. Радиотепловое излучение облаков // Радиотехника и электроника. 1978. Т. 23. N.9. С. 1792–1806.
 52. Czekala H., Havemann S., Schmidt K., Rother T., Simmer C. Comparison of Microwave Radiative Transfer Calculations Obtained with Three Different Approximations of Hydrometeor Shape // Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. 1999. Vol. 63. No. 2–6. P. 545–558.
 53. Башаринов А. Е., Кутуза Б. Г. Определение температурной зависимости времени релаксации молекул воды в облаках и возможности оценки эффективной температуры капельных облаков по СВЧ радиометрическим измерениям // Изв. ВУЗов, Радиофизика. 1974. Т. XVII. № 1. С. 52–57.
 54. Moroz, A. Improvement of Mishchenko's T-Matrix Code for Absorbing Particles // Appl. Opt. 2005. Vol. 44. P. 3604–3609.
 55. Лебедев В. И. Квадратурные формулы для сферы 25–29 порядка точности // Сибирский математический журнал. 1977. Т. 18. № 1. С. 132–142.
 56. Рихтмайер Р., Мортон К. Разностные методы решения краевых задач. М.: Мир, 1972. 418 с.
 57. 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. М.: Издательский дом "Открытые системы". 2012. № 7. С. 36–39.

Поступила 23 октября 2017.

MULTISPECTRAL POLARIZATION FEATURES OF THE OUTGOING MICROWAVE RADIATION OF THE RAIN

YA.A. ILYUSHIN, B.G. KUTUZA

doi: 10.25210/jfop-1801-037047

Authors present results of extensive numerical simulations of active and passive millimeter wave sounding of raining atmosphere. Absorption and scattering in the rain medium have been calculated rigorously from the first principles for different wavelengths and temperatures with public available T-matrix codes. Radiative fields of thermal emissions of the rain in uniform dichroic slab medium of rain and three-dimensional rain cell have been simulated with the discrete ordinate (DO) codes for the vectorial radiative transfer equation (VRTE) for the polarized radiation. The three dimensional cubic rain cell model ($3 \times 3 \times 3$ km), uniformly filled with falling raindrops, is investigated and compared to the flat layered slab model of the raining atmosphere. Non-spherical falling raindrops with a reasonable degree of approximation can be regarded to be oblate spheroids with vertically oriented rotational axis of symmetry. Ratio of axes of the spheroid depends on the raindrop size, while the raindrop sizes are distributed statistically according to Marshall-Palmer distribution. Physical (thermodynamic) temperature in the atmosphere is non-uniform and decreases with height $T_z = (300 - 7z)$ K, where z is a height in km.

Underlying surface in the flat layer model is black (lambertian reflection coefficient $R = 0$) of gray with partial lambertian reflection ($R = 0.25$) surface. In the cubic rain cell model, underlying surface within the square bottom of the cell is also black or gray as well as in the uniform slab model. Thermal radiative emission of the heated underlying surface is slightly vertically polarized. Outside the bottom surface, it is totally black ($R = 0$). Role of three-dimensional inhomogeneous structure of the medium in formation of outgoing radiation field has been revealed and investigated.