УДК 535.2, 535.36
DOI: 10.62955/0135-3748-2026-446
ORCID: 0009-0000-4238-1831

# ПРОСТРАНСТВЕННАЯ СТРУКТУРА ДОЖДЕВЫХ ЯЧЕЕК И ЕЁ ВЛИЯНИЕ НА ПОЛЯРИЗАЦИЮ ТЕПЛОВОГО МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ АТМОСФЕРЫ

**Я.В. Копцов[1], Я.А. Илюшин[1, 2]**

[1]Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, кафедра физики атмосферы, Москва, Россия, Xranitelio@yandex.ru
[2]Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва, Россия

# SPATIAL CONFIGURATION OF RAIN CELLS AND ITS EFFECT ON THE POLARIZATION OF THERMAL MICROWAVE RADIATION OF THE ATMOSPHERE

**Ya.V. Kopcov [1], Ya.A. lyushin [1, 2]**

[1]Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics, Department of Atmospheric Physics, Moscow, Russia
[2]V.A. Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

**Аннотация.** В данной работе рассмотрен метод, основанный на методах дискретных координат и конечных разностей, позволяющий оценивать поляризованное тепловое микроволновое излучение в ячейках с произвольной пространственной структурой, пригодный для масштабных расчётов на параллельных системах. Приведены предварительные результаты расчетов и намечен план дальнейшего анализа.

**Ключевые слова:** Перенос излучения, дождевые облака, метод конечных разностей.

**Abstract.** This paper describes the method based on methods of discrete coordinates and finite differences, which makes it possible to estimate the polarized thermal microwave radiation in cells with an arbitrary spatial structure, suitable for large-scale calculations on parallel systems. The preliminary calculation results are presented and a plan for further analysis is outlined.

**Keywords:** Radiation transfer, rain clouds, finite difference method.

## ВВЕДЕНИЕ

Пространственная структура дождевых ячеек играет ключевую роль в формировании радиационного баланса атмосферы. Неоднородное распределение осадков в ячейках приводит к сложному паттерну поглощения и рассеяния как солнечного, так и теплового излучения. Кроме того, фазовые переходы внутри ячеек (испарение, конденсация, кристаллизация) сопровождаются выделением или поглощением скрытой теплоты, что влияет на энергетический баланс системы «ячейка — окружающая атмосфера».

Космические средства зондирования атмосферы позволяют получать глобальные данные о пространственном распределении дождевых ячеек — особенно это важно для акваторий Мирового океана и труднодоступных районов суши, которые не охвачены сетью наземных наблюдательных станций.

Для анализа данных микроволновой радиометрии облаков и осадков применяется теория переноса излучения с учётом трёхмерной структуры дождевых ячеек. Решение обратной задачи зондирования — то есть обнаружение дождевых осадков, их идентификация и определение характеристик — строится на сравнении результатов прямого численного решения векторного уравнения переноса излучения (ВУПИ) для моделей ячеистой структуры с наблюдательными данными. Затем выполняется итеративный поиск наилучшего соответствия между модельными расчётами пространственного распределения интенсивности и поляризации излучения и реальными наблюдениями. Поэтому ключевой элемент методики обработки данных зондирования — это способ решения ВУПИ с учётом пространственной неоднородности среды.

Алгоритм, используемый для этой цели, должен одновременно обеспечивать высокую точность воспроизведения поляризационных эффектов и производительность расчётов. Эти требования становятся ещё более жёсткими, если необходимо проводить оперативный анализ данных в реальном времени с учётом сложной пространственной конфигурации дождевых ячеек.

В данной работе представлен метод, объединяющий подходы дискретных координат и конечных разностей. Он позволяет оценивать поляризованное тепловое микроволновое излучение в ячейках с произвольной пространственной структурой, включая:

— учёт неоднородности распределения водности внутри ячейки;

— моделирование эффектов рассеяния на несферических частицах с заданной ориентацией;

— расчёт многократного взаимодействия излучения между элементами ячеистой структуры;

— воспроизведение угловых зависимостей интенсивности и поляризации.

Метод подходит для масштабных расчётов на параллельных вычислительных системах и позволяет адекватно воспроизводить наблюдаемые поляризационные характеристики излучения дождевых полей. В статье приведены предварительные результаты расчётов для моделей дождевых ячеек различной геометрии и обозначен план дальнейшего анализа влияния пространственной структуры на поляризационные параметры микроволнового излучения.

## УРАВНЕНИЕ ПЕРЕНОСА ИЗЛУЧЕНИЯ И МОДЕЛЬ

Рассматривается уравнение переноса поляризованного излучения для дождевой ячейки:

$$\frac{dI(\vec{r},\vec{s})}{ds} = -\hat{\sigma}_T I(\vec{r},\vec{s}) + \frac{1}{4\pi}\int x(\vec{s},\vec{s'})I(\vec{r},\vec{s'})d\vec{s'} + \underline{\sigma}_a(\vec{\Omega})B_\lambda(T_2(z)),$$

где I – вектор стокса, $x(\vec{s},\vec{s'})$– индикатриса рассеяния, $\vec{s}$ – вектор направления, $T_2(z)$ термодинамическая температура атмосферы, $\hat{\sigma}_t$ – коэффициент полного поглощения, — коэффициент поглощения, $B_\lambda(T)$— функция Планка для равновесного теплового излучения.

Граничные условия на нижней (поверхность Земли, z = 0) и верхней (верхняя кромка ячейки, z = $z_0$) границе:

$$I_i(0,\mu_i > 0) = \{2T_1 + 2T_D, Q_1, 0{,}0\}$$
$$I_i(z_0,\mu_i < 0) = \{0,\ 0,\ 0,\ 0\}$$

Граничное условие на боковой грани ячейки сводится к заданию интенсивности и поляризации потоков излучения, приходящих на боковую грань от подстилающей поверхности и поглощающей нагретой атмосферы, окружающей ячейку с боковых направлений.

Согласно методу установления стационарные задачи заменяется на соответственное нестационарное уравнение, решение которого сходится к решению первоначальной задачи при $t\to\infty$, а метод дискретных ординат состоит в том, что интеграл рассеивания аппроксимируется суммой с помощью квадратурной формулы.

Уравнение (1) распадается на уравнения:

$$\frac{\mathrm{d}I_n(x,y,z,t)}{c\,\mathrm{d}t} + \mu_{l,i}\frac{\mathrm{d}I_n(x,y,z,t)}{\mathrm{d}l} + \mu_{z,i}\frac{\mathrm{d}I_n(x,y,z,t)}{\mathrm{d}z} = -\hat{\sigma}_{z,n}I_n(x,y,z,t) + \Lambda\sum_m a_m x_{nm} I_m(x,y,z,t) + \underline{\sigma}_{a,n}B_\lambda(T_2(z))$$

где $\boldsymbol{a_m}$ и $\mu_{\alpha,i}$– веса и направляющие косинусы по оси $\alpha$, используемой квадратурой формулы, $L_n$ – потоки излучения в дискретных направлениях.

Земная подстилающая поверхность считается горизонтальной, плоской, серой R поверхностью, частично отражающей излучение по Ламбертовскому закону с коэффициентом диффузного отражения R. Термодинамическая температура атмосферы в моделях ячейки и плоского слоя неоднородна и падает с высотой:

$$T_2(z) = T_2(0) + T_2\,z$$

Геометрической моделью дождевых капель является фигура сплюснутого сфероида и распределение капель по размеру задается формулой Маршалла–Пальмера.

Такой подход позволяет адекватно воспроизводить поляризационные эффекты, возникающие из-за неоднородной структуры дождевых ячеек, и учитывать влияние формы и ориентации гидрометеоров на перенос микроволнового излучения.

## ПРИМЕР РАСЧЕТОВ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В ходе работы был разработан вычислительный код, реализующий описанный метод. Код обладает высокой гибкостью и может быть легко модифицирован для решения аналогичных задач переноса излучения:

— в ячейках любой геометрии (например, кубической, цилиндрической, произвольной);

— при различных граничных условиях;

— для изотропных и анизотропных сред;

— с учётом поляризации излучения.

Кроме того, алгоритм допускает эффективное распараллеливание, что позволяет применять его на современных суперкомпьютерах для масштабных расчётов.

Метод был протестирован для ячеек прямоугольной формы и различных типов сеток в горизонтальных плоскостях, включая:

— прямоугольные сетки;

— триангулированные (неструктурированные) сетки.

Результаты демонстрируют универсальность разработанного программного кода для произвольных сеток.

Расчёты в цилиндрических ячейках с основаниями различной формы позволили выявить эффекты, обусловленные геометрией границ ограниченной облачности, на характеристики теплового радиоизлучения. Полученные результаты существенно отличаются от предсказаний плоскослоистой модели — как по интенсивности излучения, так и по распределению поляризационных параметров.

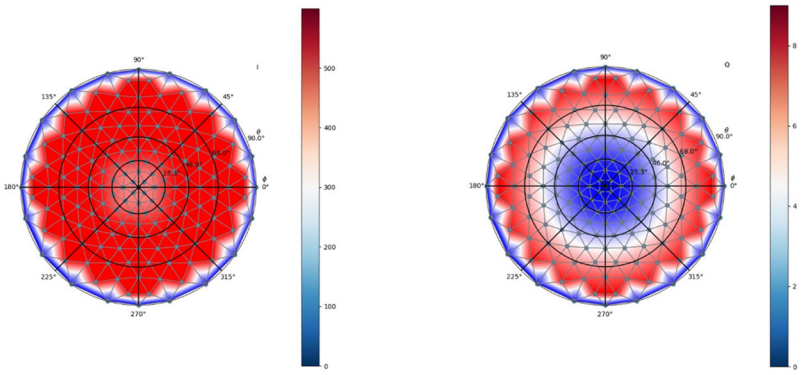


*Рис. 1.* Типичное угловое распределение первого и второго параметра Стокса восходящего теплового излучения дождевого слоя в верхней полусфере направлений на длине волны 3 мм, скорость выпадения осадков 10 мм/ч.

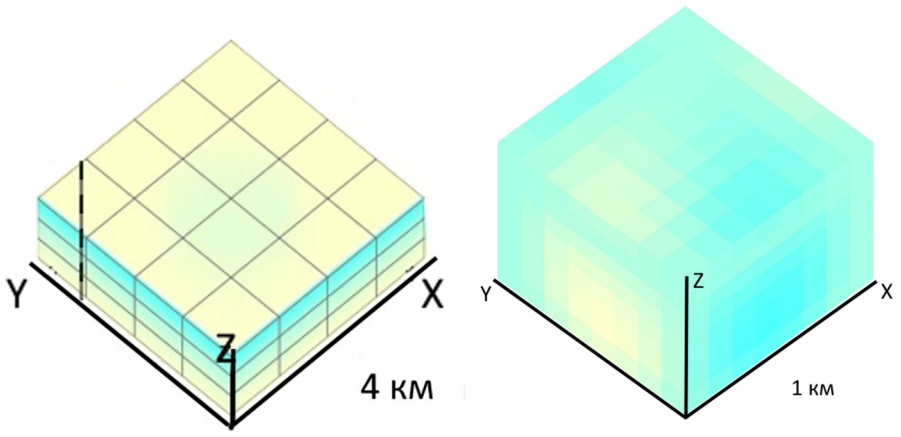


*Рис. 2.* Пример распределения интенсивности теплового излучения ячейки в заданном направлении с цилиндрической неоднородностью в центре(слева) и однородной(справа)

Для задач дистанционного зондирования из космоса выполнен анализ пространственного и углового распределения параметров Стокса для дождевых ячеек различной формы. Особое значение имеет изучение второго Q и третьего U параметров Стокса, которые несут информацию о линейной поляризации излучения и его азимутальной асимметрии.

Типичное угловое распределение излучения в центре верхнего основания показано на рис. 1., а распределений интенсивности дождевой ячейки на рис. 2.

Предварительные расчёты показали заметное влияние геометрических параметров ячейки (в т.ч. эффективного размера) на характеристики излучения. Эти результаты требуют дальнейшего углублённого исследования.

Полученные результаты демонстрируют зависимость характера поляризации теплового радиоизлучения дождевого слоя от длины волны. Установлено, что поляризационные характеристики микроволнового излучения существенно варьируются в зависимости от длины волны, что имеет важное значение для интерпретации данных спутникового зондирования.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведённого исследования разработан вычислительный метод и соответствующий программный код для моделирования переноса поляризованного теплового микроволнового излучения в трёхмерных дождевых ячейках произвольной геометрии.

Алгоритм допускает эффективное распараллеливание, что позволяет применять его на суперкомпьютерах для масштабных расчётов и обработки больших массивов данных.

Проведённое тестирование на моделях прямоугольной и цилиндрической геометрии показало работоспособность алгоритма и его способность воспроизводить сложные поляризационные эффекты. Расчёты продемонстрировали, что форма границ дождевых ячеек существенно влияет на характеристики теплового радиоизлучения. Установлено, что поляризационные характеристики микроволнового излучения существенно зависят от длины волны. Показано, что трёхмерные модели дождевых ячеек дают более точные результаты по сравнению с упрощёнными плоскослоистыми моделями, особенно при анализе поляризационных эффектов и неоднородных структур.

Полученные зависимости позволяют точнее интерпретировать данные микроволнового зондирования атмосферы, учитывая реальную геометрию дождевых ячеек. Учёт трёхмерной структуры и поляризационных эффектов даёт возможность более точно оценивать интенсивность осадков и содержание жидкой воды в облаках.

Исследование проведено в рамках государственного задания Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования сверхвысокопроизводительными вычислительными ресурсами МГУ имени М.В. Ломоносова.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Рихтмайер Р., Мортон К. Разностные методы решения краевых задач. М.: Мир, 1972. 418 с.

Czekala H., Simmer C. Microwave radiative transfer with non-spherical precipitating hydrometeors // Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. 1998. Vol. 60. P. 365–374.

Janssen M. A. Atmospheric remote sensing by microwave radiometry. A Wiley-Interscience Publication. 1993. ISBN 0-471-62891-3.

Гончарский А. В., Черепащук А. М., Ягода А. Г. Численные методы решения обратных задач астрофизики. М.: Наука, 1978. 335 с.

Ulaby F. T., Moore R. K., Fung A. K. Microwave Remote Sensing, Active and Passive. Vol. 1. Reading, MA: Addison-Wesley, 1981.

Voevodin Vl., Antonov A., Nikitenko D., Shvets P. et al. Supercomputer Lomonosov-2: Large Scale, Deep Monitoring and Fine Analytics for the User Community // Supercomputing Frontiers and Innovations. 2019. Vol. 6, No. 2. P. 4–11. DOI: 10.14529/jsfi19020.