

# Polarization properties of thermal radio emission from rain atmosphere in the microwave range

Копцов Я.В. (1), Илюшин Я.А. (1,2)

(1) МГУ имени М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия

(2) Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва, Россия

# Цели

Цель настоящей работы является оценка величины третьего параметра Стокса для дождевых осадков и исследование эффектов, связанных с наклоном осей падающих дождевых капель несферической формы.

Для объяснения наблюдаемого поляризационного эффекта принята модель наклонных несферических дождевых капель.

Оценка вычислительной сложности задачи переноса поляризованного излучения и эффективности параллельной реализации на суперкомпьютере «Ломоносов-2».

# Nimbus 6



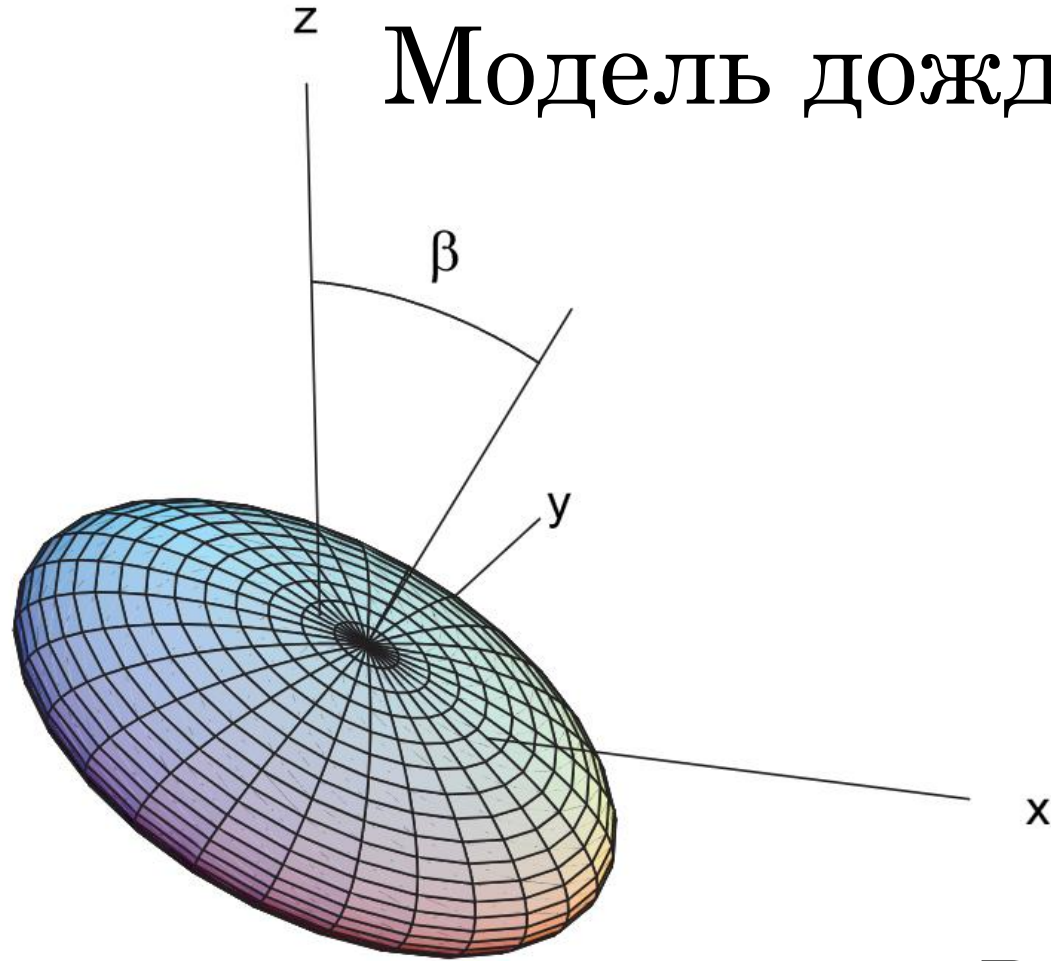
Электрически сканирующий микроволновый радиометр(ESMR) был прибором, перевозимым спутником Nimbus 5 и 6. Прибор ESMR сканирует траекторию движения спутника, что позволяет получить широкий диапазон углов падения

# Размеры и форма дождевых капель (модель Пруппахера-Питера)

$$\bullet \frac{b}{a} = 1 = 0.091 \bar{a}$$



# Модель дождевой капли



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

Геометрическая модель  
сфероидальной дождевой  
капли с наклонной осью

Распределение капель по  
размерам (Распределение  
Маршалла-Пальмера)

# Модель излучательных характеристик среды

Земная подстилающая поверхность считается горизонтальной, плоской и абсолютно черной  $R = 0$ .

Термодинамическая температура атмосферы в моделях ячейки и плоского слоя неоднородна и падает с высотой

$$T_2(z) = T_2(0) + \text{grad } T_2 z,$$

где  $T_2(0) = 300 \text{ K}$ ,  $\text{grad } T_2 = -7 \text{ K/км}$ ,  $z$  — высота.

Геометрическую модель дождевых капель является фигура сплюснутого сфероида и распределение капель по размеру задается формулой Маршалла—Пальмера.

Все расчеты электрических свойств дождевых капель проводились для температуры воды  $T=0$ .

# Модель переноса излучения в атмосфере

- Решается уравнению переноса излучения в цилиндрической ячейке:

$$\mu_z \frac{dI(z, \vec{\Omega})}{dz} = -\hat{\sigma}_e I(z, \vec{\Omega}) + \frac{1}{4\pi} \int x(\vec{\Omega}, \vec{\Omega}') I(z, \vec{\Omega}') d\vec{\Omega}' + \bar{\sigma}_a(\vec{\Omega}) B_\lambda(T_2(z)),$$

Граничные условия на нижней и верхней грани, соответственно:

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

$$I_i(z_0) = \{0, 0, 0, 0\}, \mu_i < 0$$

где  $I$  – вектор Стокса,  $x(\Omega, \vec{\Omega}')$  – индикатриса рассеяния,  $\vec{\Omega}$  – вектор направления,  $\vec{\Omega}_0$  – вектор направления падающего излучения,  $T_D$  радиояркостьная температура диффузного отражения поверхности,  $T_2(z)$  термодинамическая температура атмосферы.

# Радиояркостьная температура ламбертовского отражения

$T_D$  радиояркостьная температура диффузного (ламбертовского) отражения, определяемая равенством

$$T_D \int_0^1 \mu d\mu = -R \int_{-1}^0 T(\mu) \mu d\mu$$

при  $z = 0$ . В дискретных координатах формула принимает вид

$$T_D \sum_{\mu_i > 0} \mu_i a_i = -R \sum_{\mu_i < 0} T_i \mu_i a_i$$

где  $R$  - коэффициент диффузного отражения подстилающей поверхности.

# Вычислительная постановка

- **Размерность задачи**

- Вектор Стокса: 4 компоненты  $\times N = 302$  узла квадратуры  $G_{29} \times$  пространственные слои  $\times 3$  длины волны (3, 8, 15 мм)  $\times 6$  углов наклона ( $0-5^\circ$ )  $\times$  набор интенсивностей осадков.
- Матрица рассеяния  $4 \times 4$  пересчитывается для каждого из 302 направлений, а итерационный процесс по сшивке решений на границах слоёв повторяется многократно (сотни итераций на сценарий).
- Полный перебор параметров ( $3 \times 6 \times$  шаг интенсивности осадков) требует большого числа независимых расчётов ячейки. Каждый расчёт включает матричные операции с вектором Стокса по 302 направлениям —  $O(N^2)$  на итерацию и доля времени  $\sim 98\%$  в итерации, итераций — сотни-тысячи

# Ломоносов-2



| Компонент                  | Характеристика                                             |
|----------------------------|------------------------------------------------------------|
| Архитектура                | Гетерогенная: CPU + GPU для гибкого распределения нагрузки |
| Вычислительные узлы        | ~1 700 узлов                                               |
| CPU на узел                | 2 × Intel Xeon E5-2697v3 (14 ядер, до 2,6 ГГц)             |
| GPU на узел                | 4 × NVIDIA Tesla K40M                                      |
| Пиковая производительность | ~5 петафлопс ( $5 \times 10^{15}$ оп./с)                   |
| Производительность Linpack | ~2,4–2,5 петафлопса                                        |
| Оперативная память         | 64 ГБ на узел                                              |
| Сеть                       | Infiniband FDR (56 Гбит/с)                                 |
| Файловая система           | Параллельная Lustre, 1,2 ПБ                                |
| ОС и управление            | CentOS + SLURM                                             |

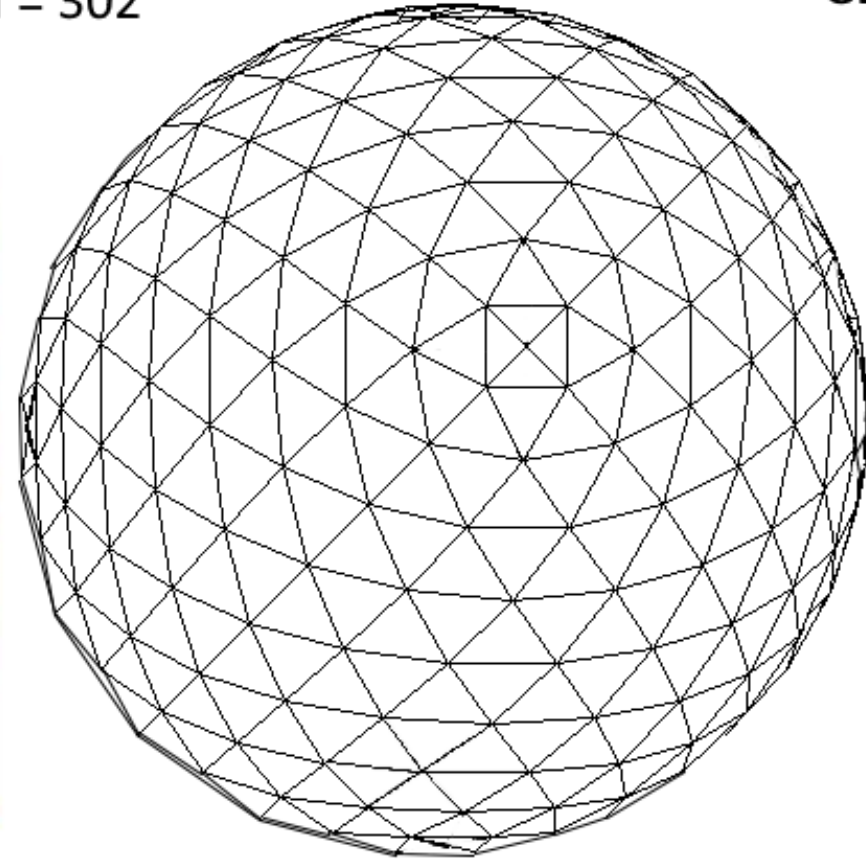
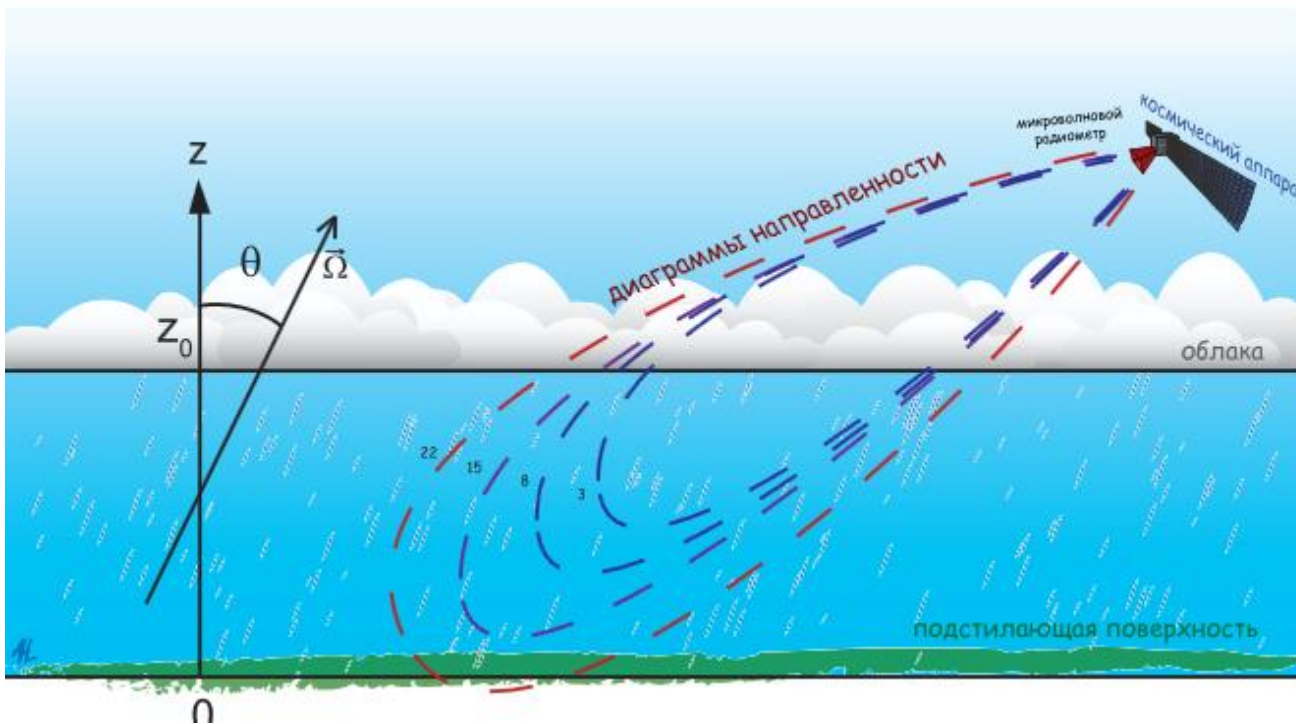
# Распараллеливание кода

- В параллельном суперкомпьютере "Ломоносов-2" на каждом вычислительном узле доступно 28 вычислительных ядер. Это, в свою очередь, означает, что таким образом можно легко достичь ускорения, пропорционального количеству независимых потоков, без применения каких-либо специальных методов программирования.
- Приведение задачи к итерационному процессу в точках и разбиение расчета производных на отдельные шаги позволяет применять простейшие методы распараллеливания достаточно эффективно, что необходимо для анализа атмосферного переноса излучения в облачной атмосфере, требующего множественных расчётов из-за значительности геометрических объемов атмосферных процессов и большой вариативности форм облаков.

# Модель переноса излучения в атмосфере. Схема 1

$N = 302$

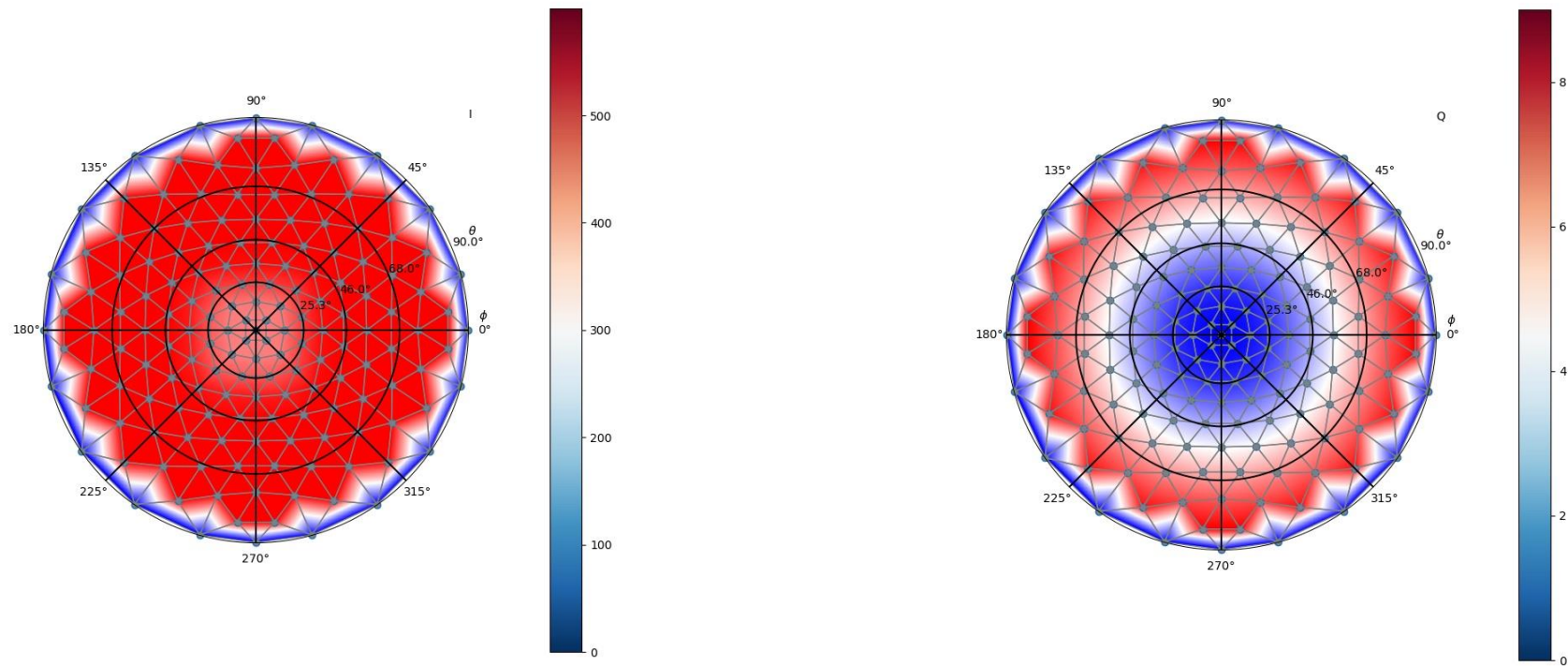
G29



геометрия

сферическая квадратурная формула G29

# Типичная интенсивность $I$ и второй параметр стокса $Q$ .

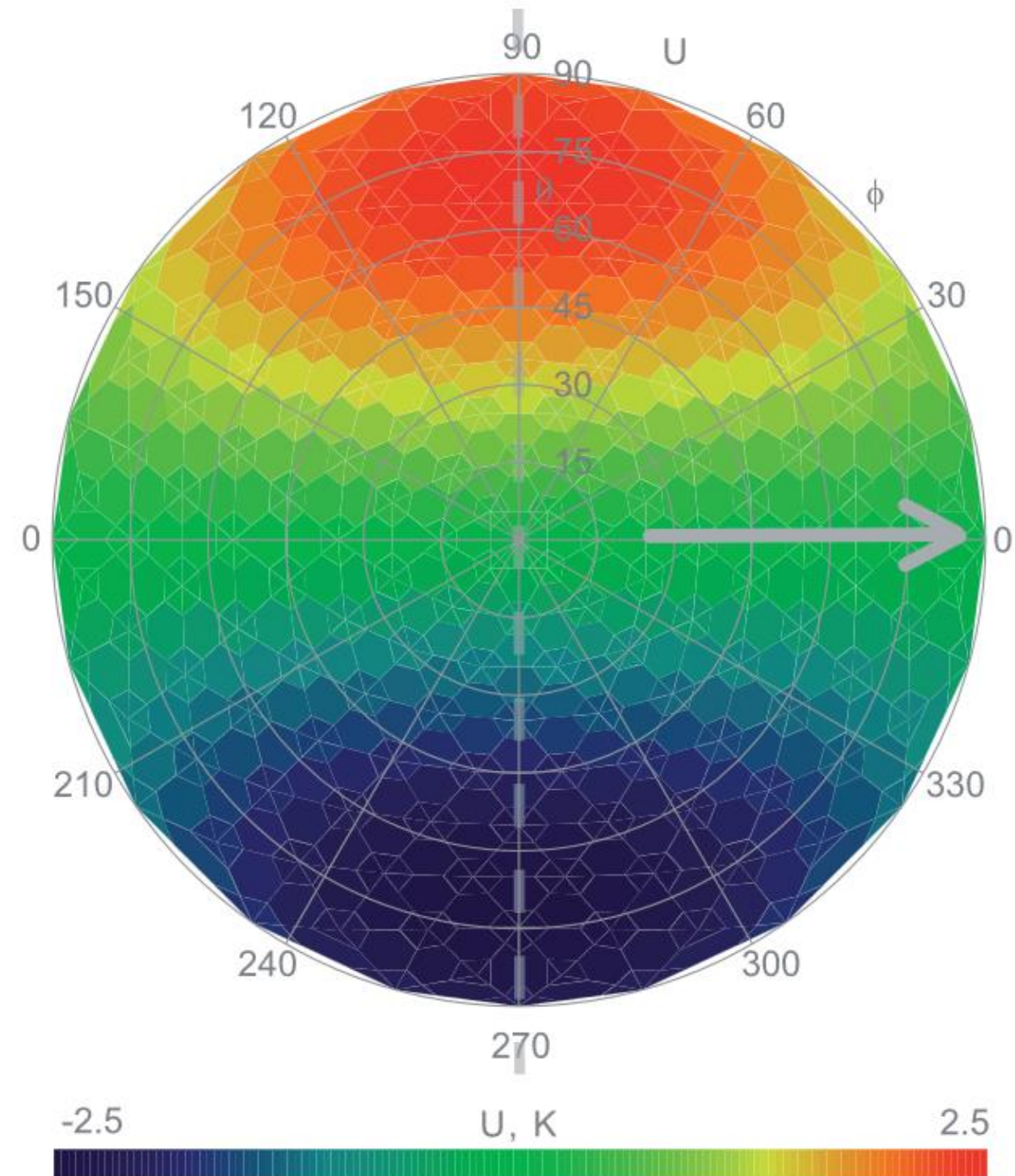


Типичное угловое распределение первого и второго параметра Стокса восходящего теплового излучения дождевого слоя в верхней полусфере направлений

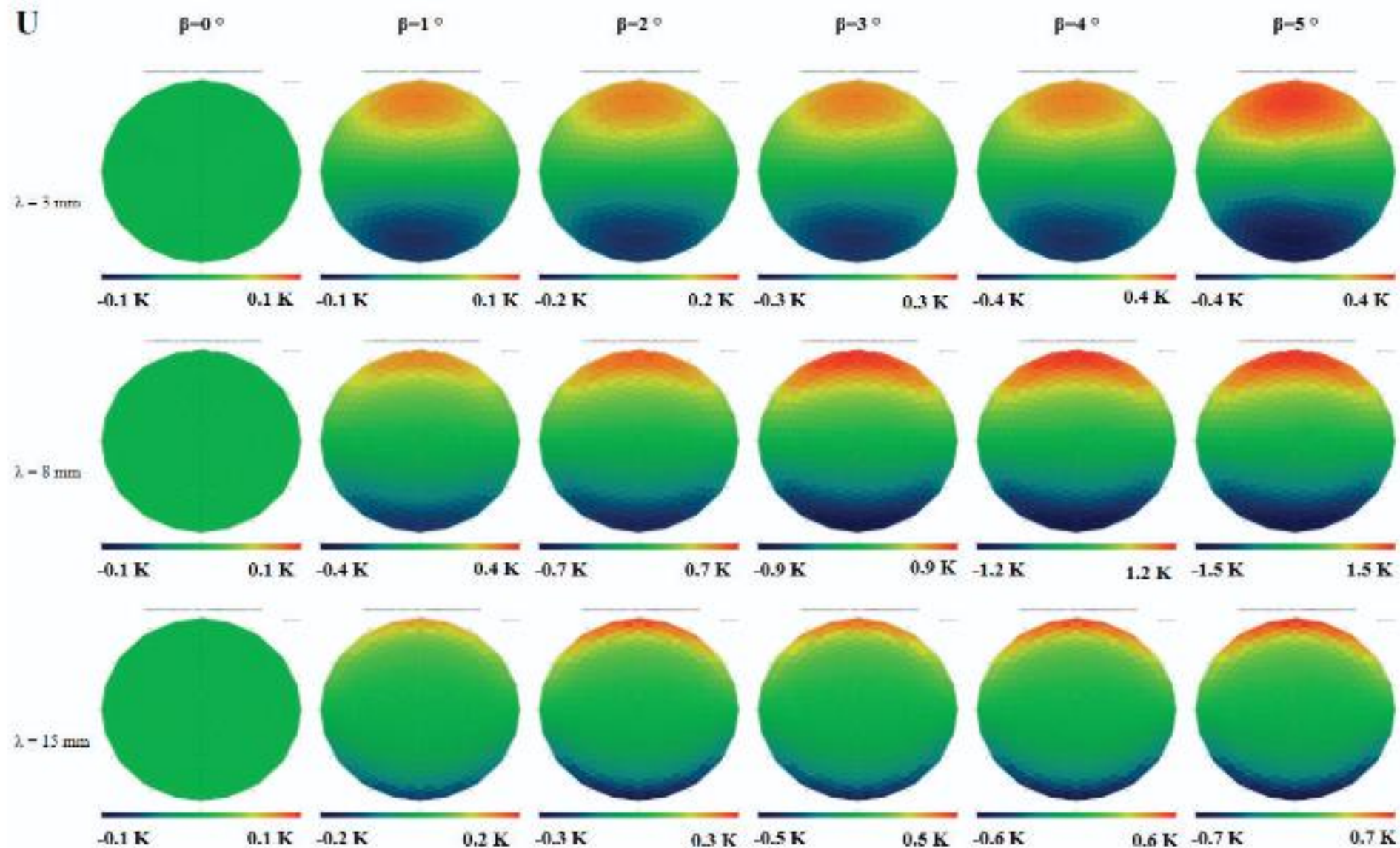
длина волны - 3 мм, скорость выпадения осадков 10 мм/ч.

## Пример расчёта.

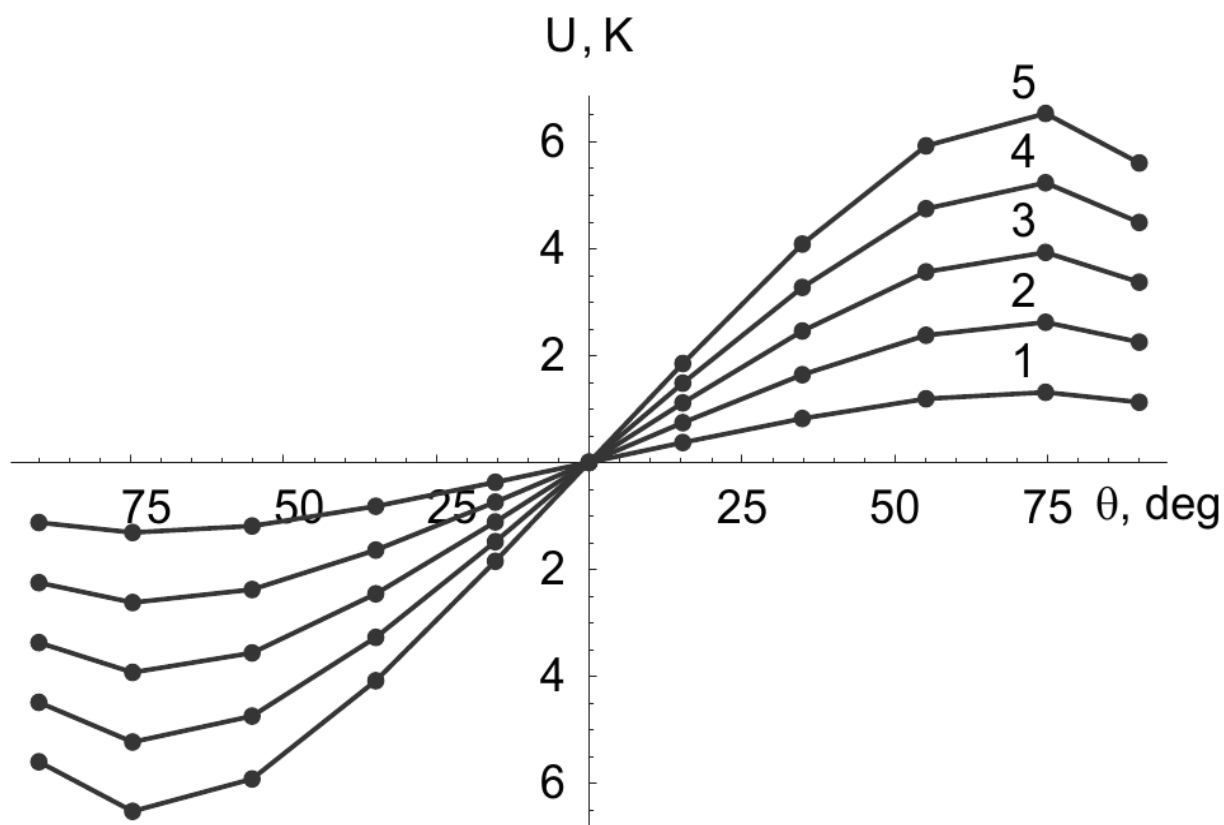
Типичное угловое распределение  
третьего параметра Стокса  
восходящего теплового излучения  
дождевого слоя в верхней  
полусфере направлений  
длина волны - 8 мм, скорость  
выпадения осадков 10 мм/ч. Угол  
наклона осей дождевых капель  $2^\circ$



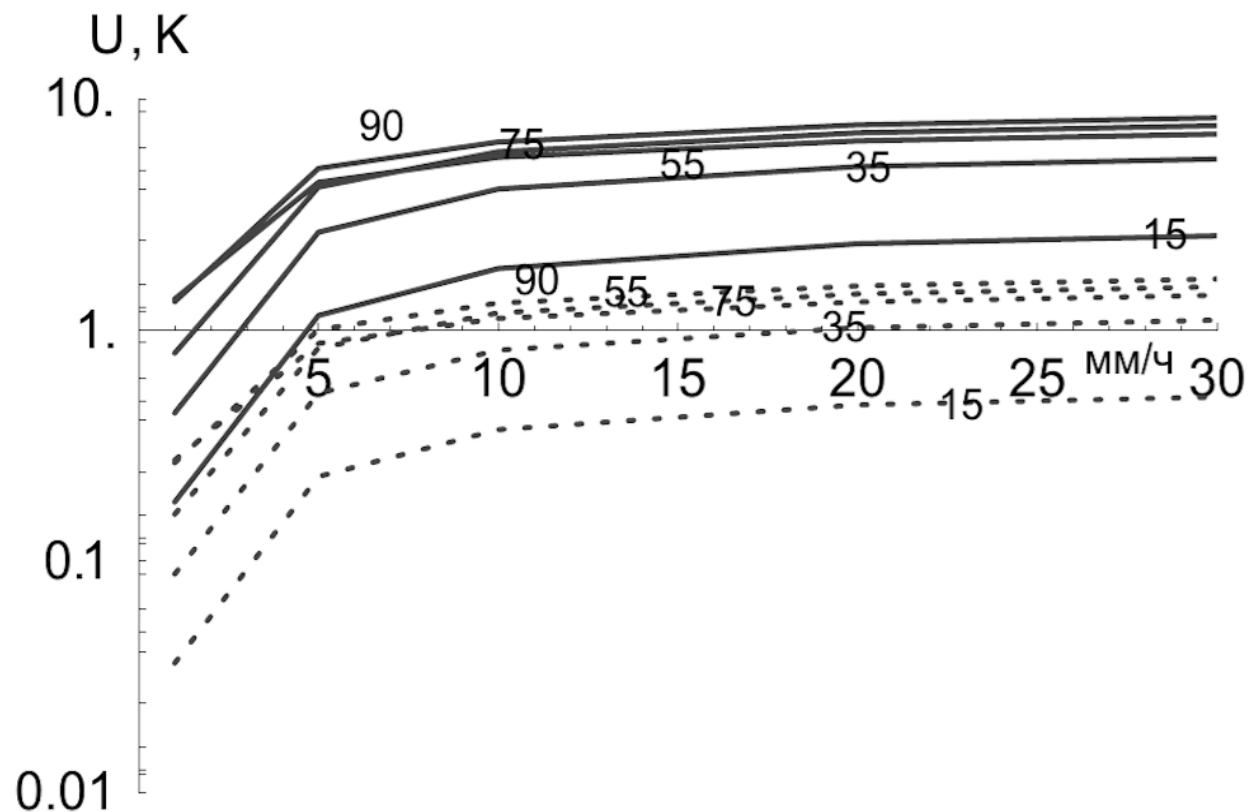
# Таблица результатов. Длина волны 8 мм



# Угловые распределения третьего параметра Стокса



Угловые распределения третьего параметра Стокса в направлении оси наклона дождевых капель



Зависимость третьего параметра Стокса от интенсивности выпадения осадков при различных зенитных углах наблюдения.

Длина волны - 8 мм, скорость выпадения осадков 10 мм/ч, угол наклона капель от  $1^\circ$  до  $5^\circ$ . Углы наклона капель показаны цифровыми метками при кривых

# Результаты

- В ходе исследования проведён детальный анализ зависимости поляризации излучения от длины волны и интенсивности осадков.
- Показано, что третий параметр Стокса может служить индикатором наклона дождевых капель и предоставлять дополнительную информацию для определения зон дождей над сушей и океаном. Практическая значимость работы заключается в возможности использования полученных результатов для повышения точности определения зон дождей и оценки интенсивности осадков при дистанционном зондировании.
- Продемонстрирована эффективность использования суперкомпьютерных вычислений для многопараметрического анализа поляризационных характеристик дождевой атмосферы — полный перебор по длинам волн, углам наклона и интенсивностям осадков выполнен на платформе «Ломоносов-2» (НИВЦ МГУ).

# Список литературы

- Wilheit T. T., Chang A. T., Rao M. S. V., Rodgers E. B. and Theon J. A. A satellite technique for quantitatively mapping rainfall rates over the oceans. *d. Appl. Meteorol.* 16. 551-560. 1977.
- Savage R. C., Weinman J. A. *Preliminary calculations of the upwelling radiance from rainclouds at 37.0 and 19.35 GHz. Bull. elmer. Meteorol. Soc.* 56. 1272-1274. 1975.
- Tsang L. *Polarimetric passive microwave remote sensing of random discrete scatterers and rough surface. J. Electromagn. Waves Appl.* 5, 1. 41-57. 1991.
- Илюшин Я. А., Кутуза Б. Г. Влияние пространственной структуры осадков на поляризационные характеристики уходящего микроволнового излучения атмосферы // *Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана.* 2016. 52, 1. 83–91.
- Voevodin Vl., Antonov A., Nikitenko D., Shwets P., Sobolev S., Sidorov I., Stefanov K., Voevodin Vad. and Zhumatiy S. *Supercomputer Lomonosov-2: Large Scale, Deep Monitoring and Fine Analytics for the User Community. In Journal: Supercomputing Frontiers and Innovations.* 6, 2. 2019. 4–11.  
DOI:10.14529/jsfi190201

Спасибо за внимание