

Численное моделирование распространения импульсов лазерного излучения в тонких облачных слоях



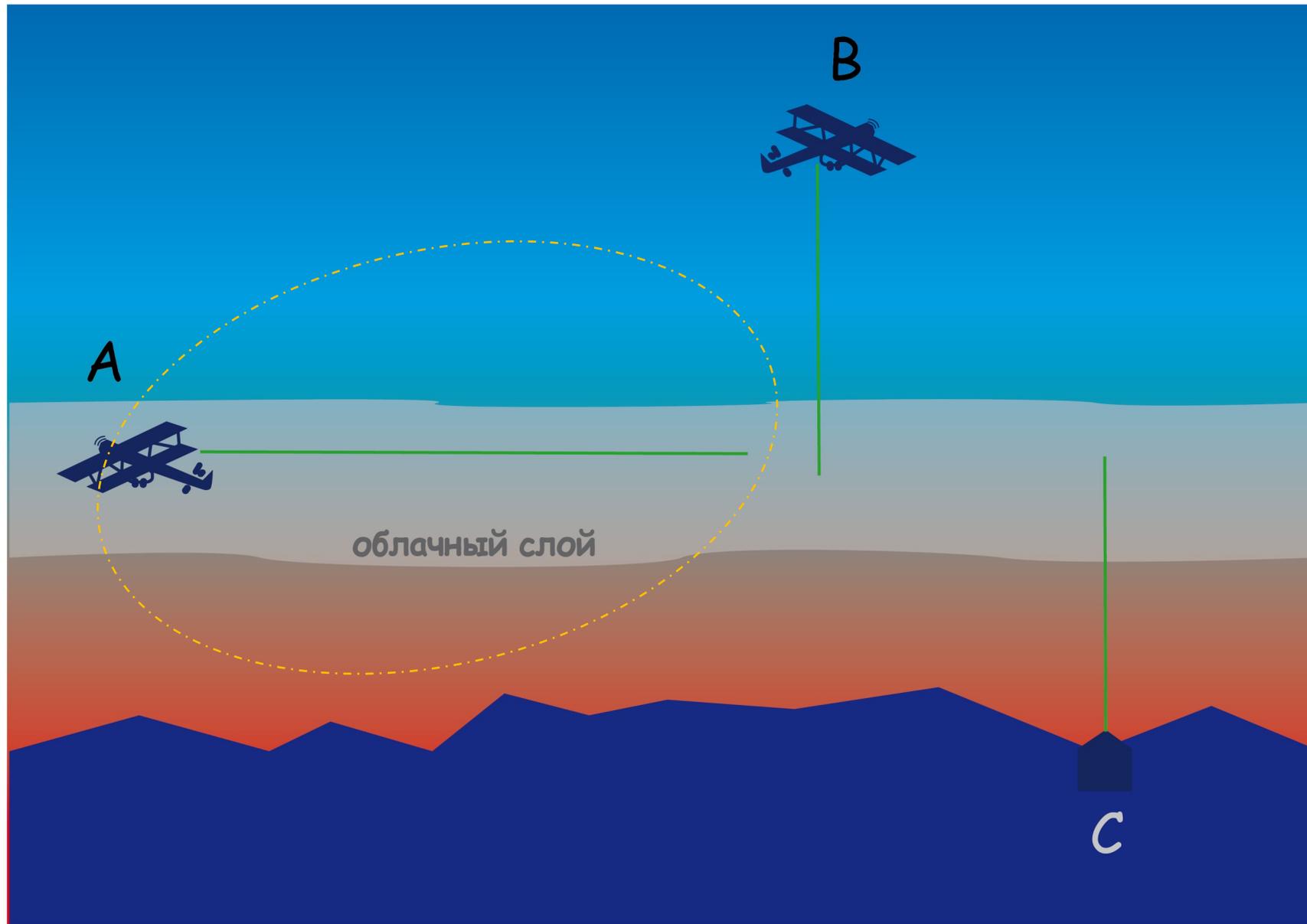
Чжао Хунли
Научный руководитель
Д.Ф.-М.Н. ИЛЮШИН Я.А.

МГУ имени М.В. Ломоносова
Физический факультет
Кафедра физики атмосферы

Цель

- Теория переноса излучения(RT) - это хорошо отлаженная теория для оценки энергетических параметров радиационных полей в случайных средах. Она широко применяется как для решения проблем радиационного теплообмена, так и для анализа и интерпретации данных дистанционного зондирования.
- Целью данной работы является исследование распространения импульсов лазерного излучения в облачных слоях в связи с актуальными в настоящее время приложениями дистанционного зондирования и навигации.

Лидарное зондирование тонкого облачного слоя

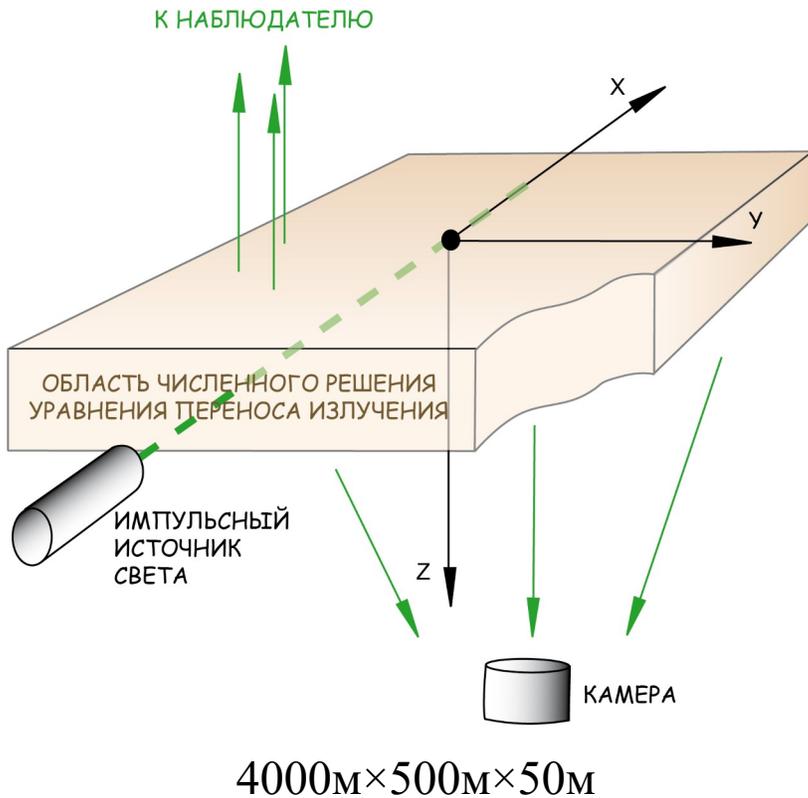


Численные методы

Метод дискретных ординат

Метод Монте-Карло

Метод дискретных ординат. Численное решение векторного уравнения переноса излучения



Пространственное и угловое распределение интенсивности и поляризации излучения в среде подчиняются векторному уравнению переноса излучения (ВУПИ)

$$\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{I}(\vec{r}, \vec{\Omega}, t)}{\partial t} + (\vec{\Omega} \cdot \nabla) \mathbf{I}(\vec{r}, \vec{\Omega}, t) = -\varepsilon \mathbf{I}(\vec{r}, \vec{\Omega}, t) + \frac{1}{4\pi} \int_{4\pi} \hat{\chi}(\vec{\Omega}, \vec{\Omega}') \mathbf{I}(\vec{r}, \vec{\Omega}', t) d\vec{\Omega}' + \mathbf{e}(\vec{r}, \vec{\Omega}, t)$$

Импульсный пучок лазерного излучения аппроксимируем импульсным точечным мононаправленным (ТМ) источником:

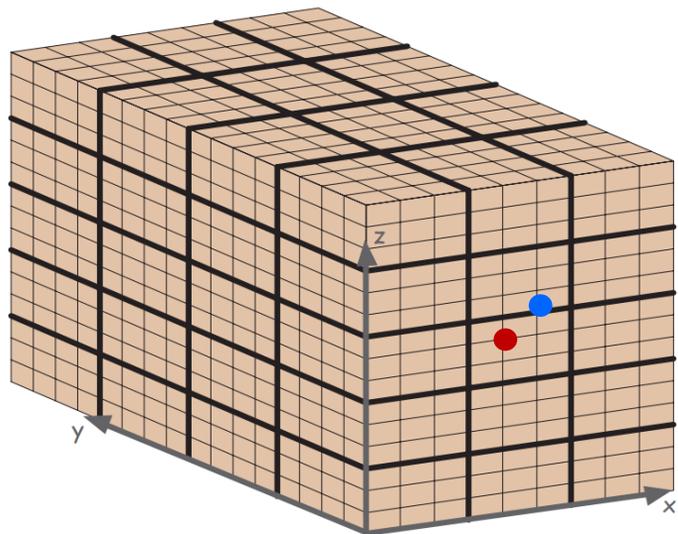
$$\mathbf{I}(\vec{r}, \vec{\Omega}, t) = \mathbf{I}_0 \exp(-\varepsilon z) \delta(\vec{\Omega}) \delta(x) \delta(y) \delta(z - ct)$$

Соответствующий **дискретизированный УПИ** равен

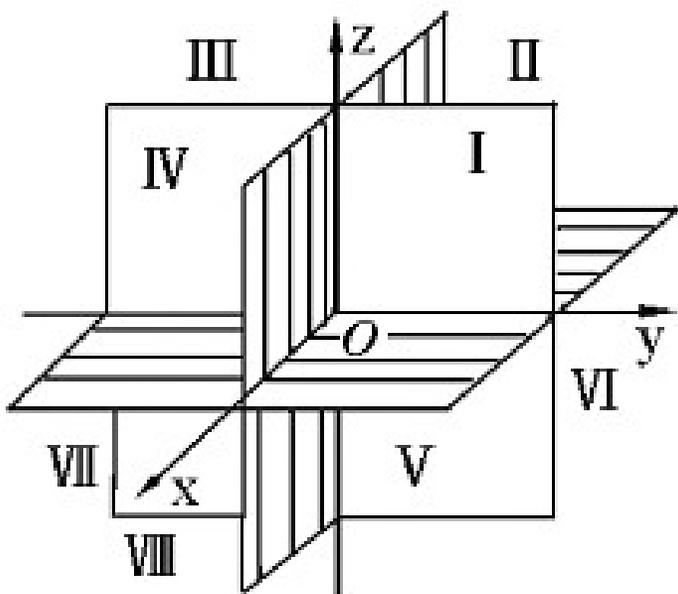
$$\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{I}_i}{\partial t} + \mu_{xi} \frac{\partial \mathbf{I}_i}{\partial x} + \mu_{yi} \frac{\partial \mathbf{I}_i}{\partial y} + \mu_{zi} \frac{\partial \mathbf{I}_i}{\partial z} = -\varepsilon \mathbf{I}_i + \sum_{l,j} \hat{\chi}(\vec{\Omega}_i, \vec{\Omega}_j) a_j \mathbf{I}_j + \mathbf{e}_i(\vec{r}, t)$$

Функция источника

$$\mathbf{e}_i(\vec{r}, t) = \frac{\mathbf{I}_0}{4\pi} \exp(-\varepsilon z) \delta(x) \delta(y) \delta(z - ct) \hat{\chi}(\vec{\Omega}_i, \vec{\Omega}_0)$$



1. Дискретизация по углу: дискретизация переменных направления в уравнении переноса излучения по ограниченному числу угловых направлений.
2. Дискретизация пространства: режим против ветра. То есть при обновлении значения определенной точки будут учитываться только данные светового поля предыдущего временного шага или предыдущей позиции. Этот метод больше подходит для работы с направленными физическими явлениями, такими как жидкости или волны.



Вычислите направляющие косинусы всех дискретных углов в каждой точке сетки.

Квадрант света в трехмерном пространстве определяется на основе значения косинуса направления распространения света. На основе этих значений различают распространение света в разных квадрантах и рассчитывают интенсивность, рассеяние и поглощение света.

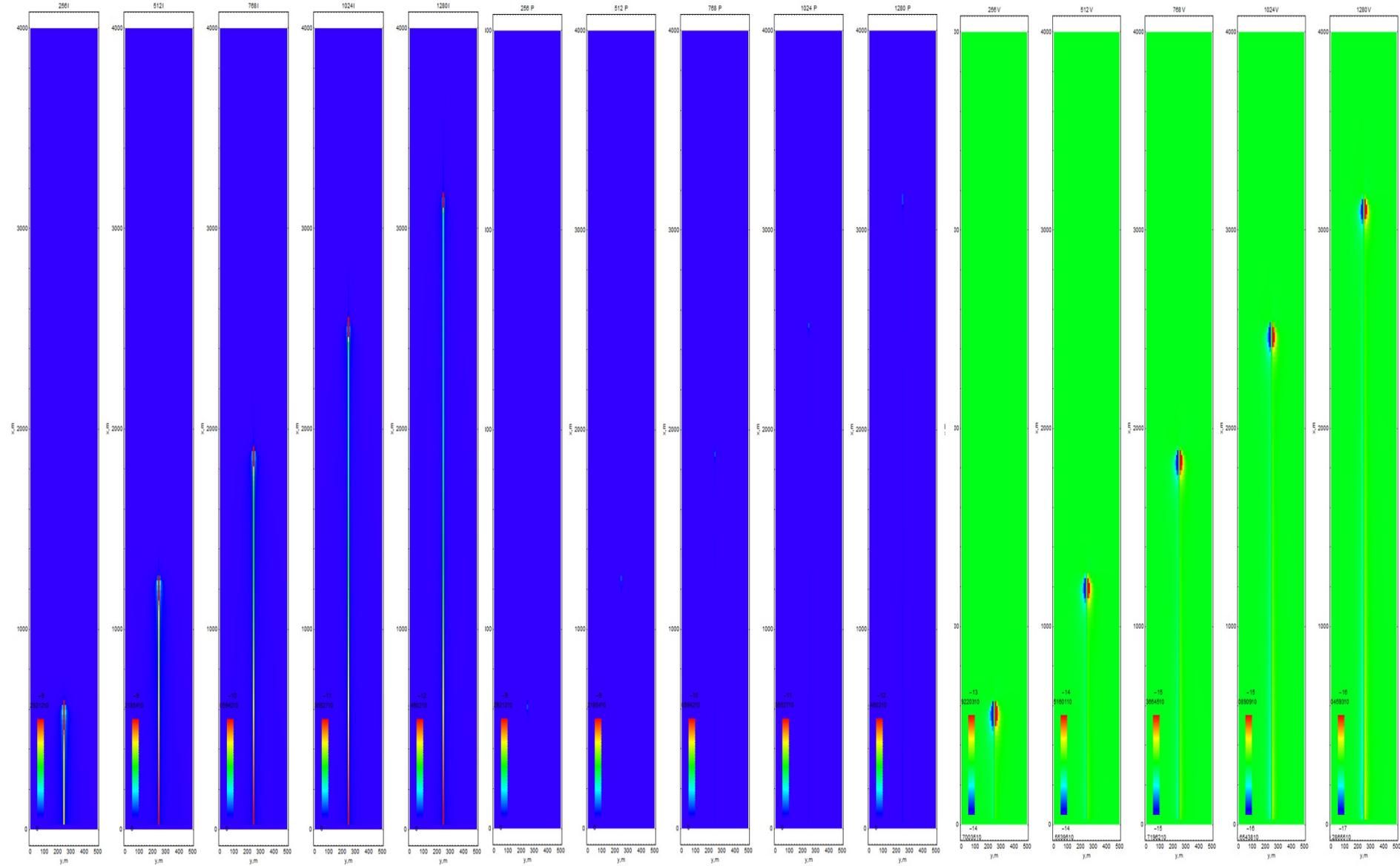
OpenMP

Интерфейс обмена сообщениями с открытым исходным кодом для высокопроизводительных вычислений.

`#pragma omp Parallel for` в языке программирования C++ – это инструкция, используемая OpenMP для распараллеливания цикла `for`. Это позволяет выполнять несколько итераций цикла параллельно в разных потоках, тем самым ускоряя выполнение программы.

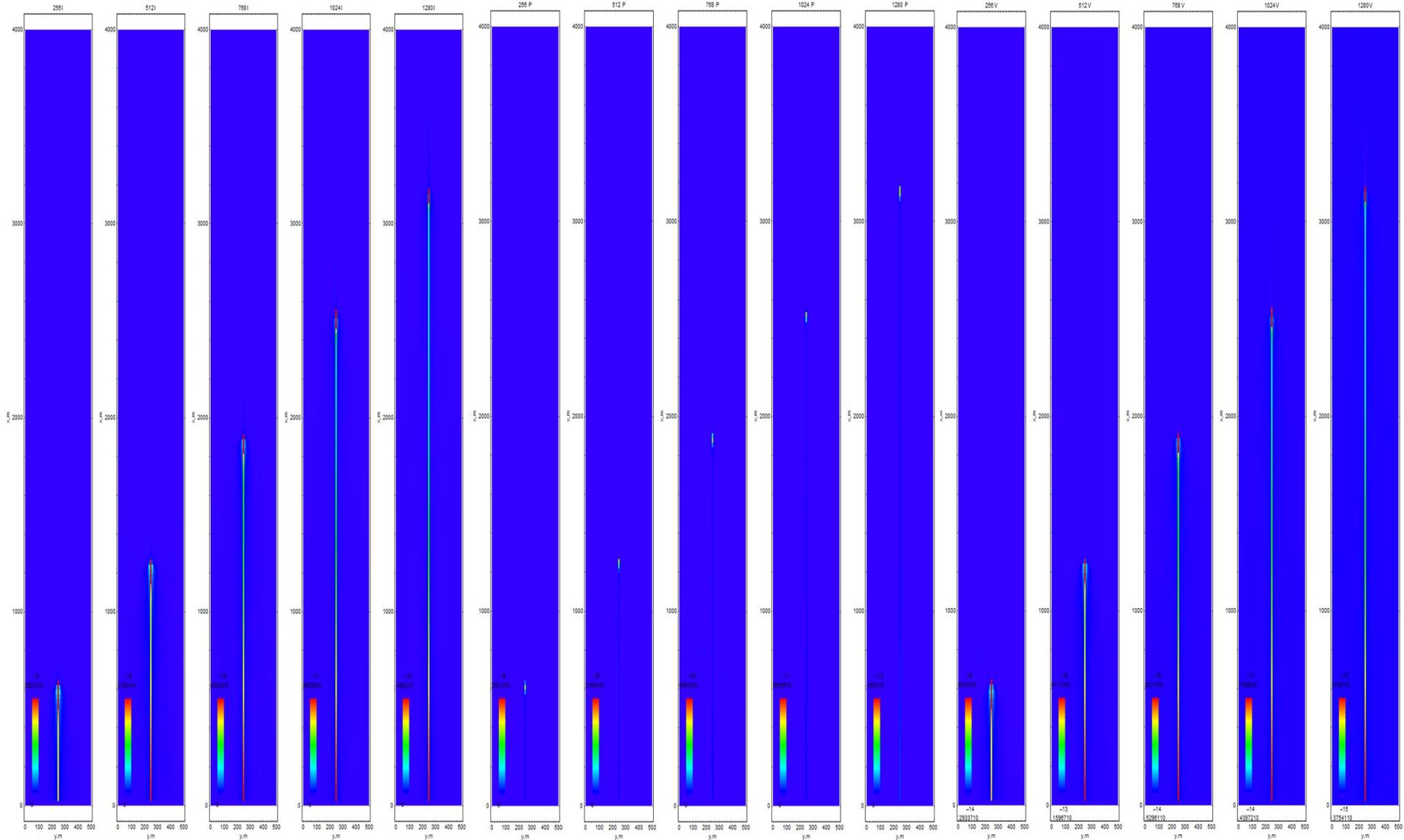
- Создание сетки: точки сетки обрабатываются параллельно в
- Перекрестная обработка данных: используя два массива («LprevD0» и «LnextD0») для хранения данных предыдущей и текущей итерации соответственно, можно избежать проблем конкуренции данных между потоками.
- Обработка индексов. Использование макросов для определения индексов обеспечивает согласованный доступ к данным и позволяет избежать конфликтов потоков. Такая организация доступа к памяти

Неполяризованное падающее излучение



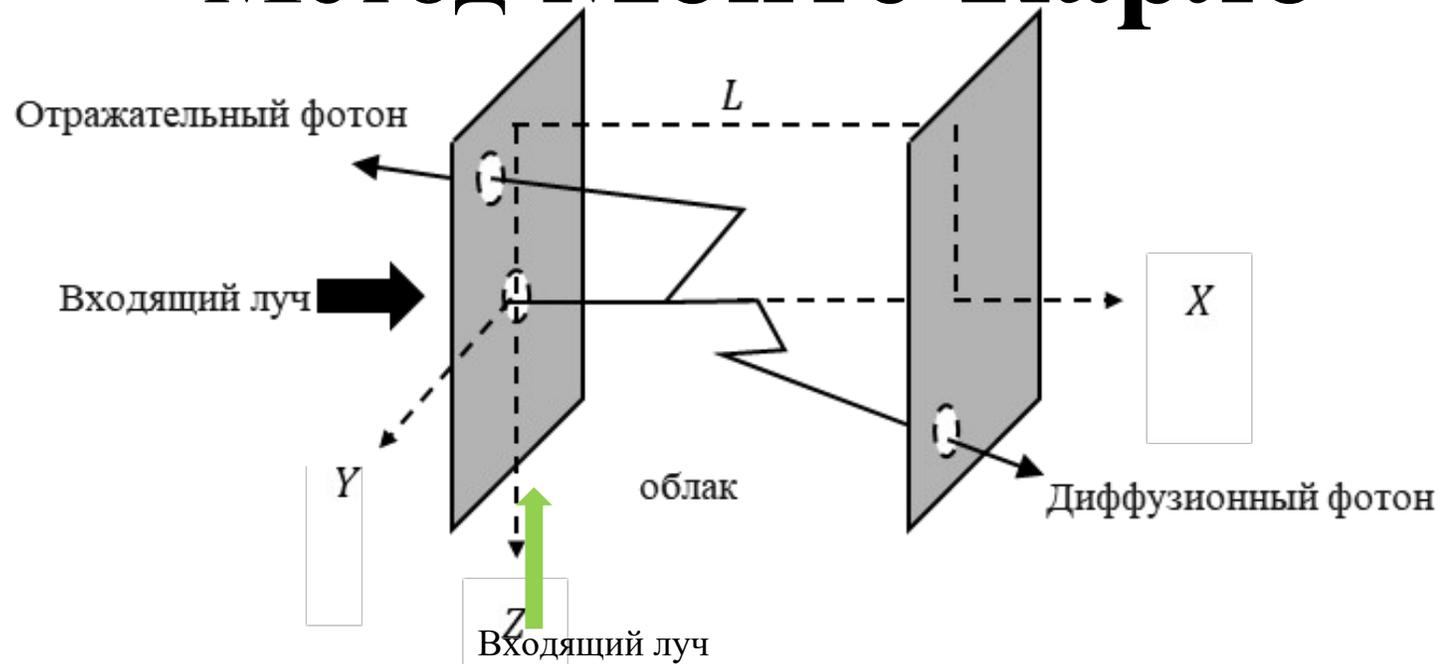
Параметры Стокса - I (налево), $P = I_r$ (в середине), V (направо)

Круговая поляризация



Параметры Стокса - I (налево), $P = I_r$ (в середине), V (направо)

Метод Монте-Карло



- Нестационарное световое поле в случайной рассеивающей среде без учета поляризации излучения удовлетворяет скалярному уравнению переноса излучения (УПИ)

$$\frac{\partial I}{c \partial t} + (\boldsymbol{\Omega} \cdot \nabla) I = -\varepsilon I + \frac{\Lambda \varepsilon}{4\pi} \oint I(\mathbf{r}, \boldsymbol{\Omega}') x(\boldsymbol{\Omega}, \boldsymbol{\Omega}') d\boldsymbol{\Omega}' + e(\mathbf{r}, \boldsymbol{\Omega})$$

- Для расчетов была принята широко распространенная индикатриса рассеяния Хеньи-Гринштейна

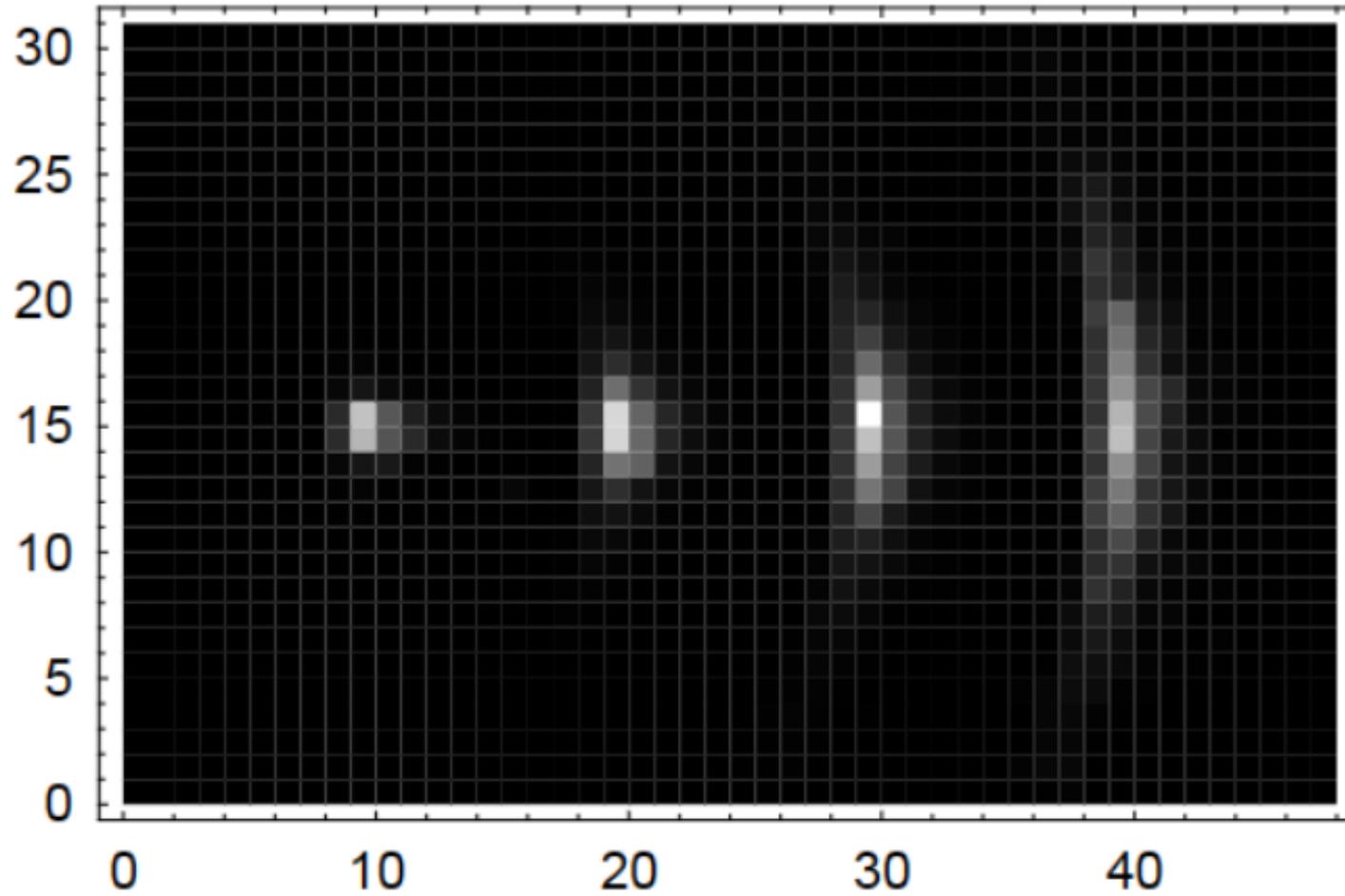
$$x(\boldsymbol{\Omega}, \boldsymbol{\Omega}') = \frac{1 - g^2}{(1 + g^2 - 2g \cos \theta)^{3/2}}$$

Метод Монте-Карло.

Распространение луча в плоскопараллельном облачным слое

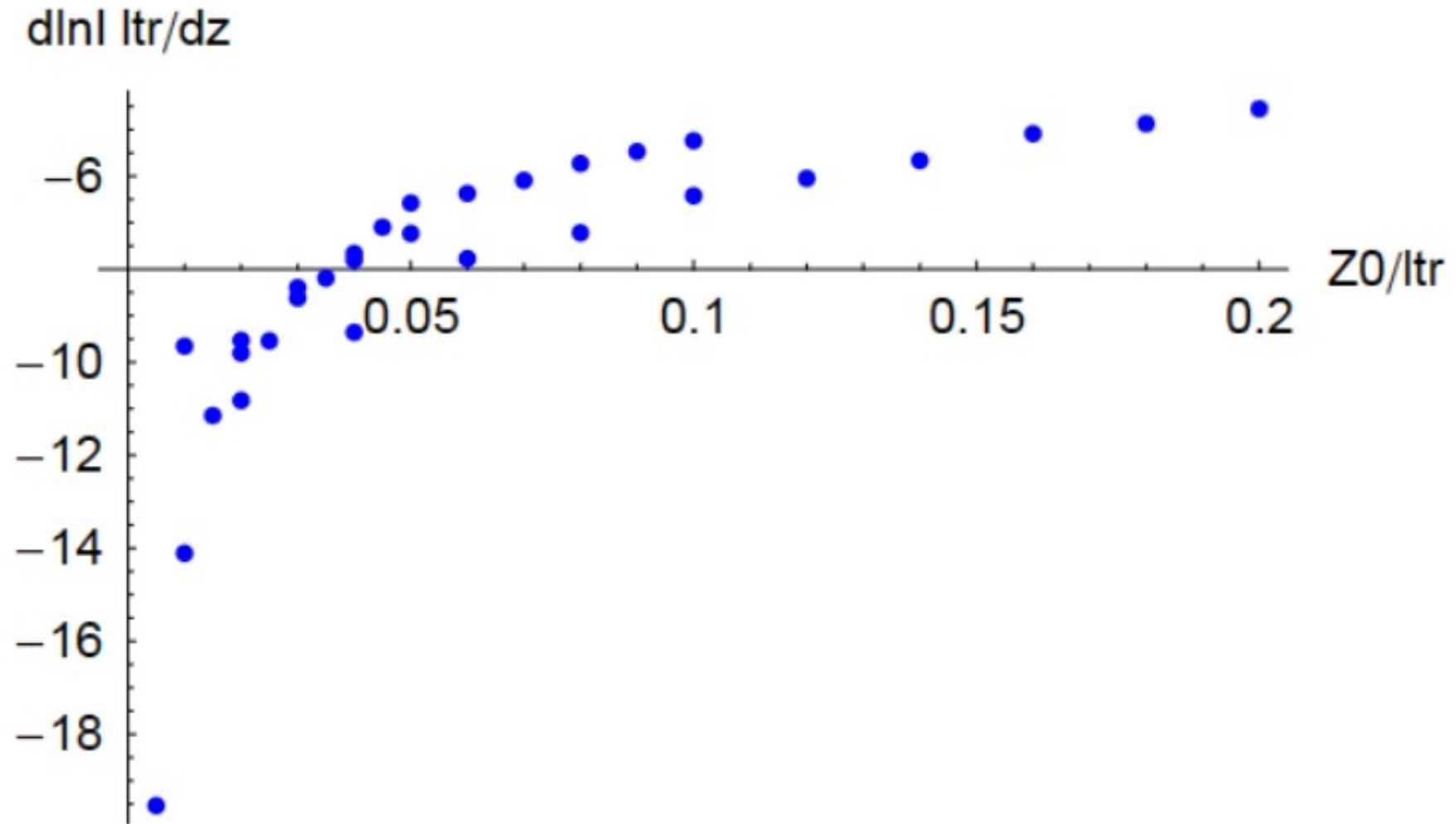
Излучение выходящее через границу среды в несколько разных последовательных моментов

$$Z_0 = 0.5 \text{ g} = 0.99$$



По осям координаты на поверхности облачного слоя в единицах длины свободного пробега

Показатель спада интенсивности выходящего излучения с расстоянием в зависимости от
толщины облачного слоя



Выводы

- Исследована возможность лазерного импульсного зондирования облачных слоев в горизонтальных направлениях.
- Для различных состояний поляризации падающего импульса исследована поляризация поля рассеянного излучения в слое облаков.
- Сделаны численные оценки спада интенсивности рассеянного поля со временем и пройденным расстоянием в зависимости от толщины облачного слоя.
- Показана возможность оценки толщины облачного слоя по наблюдениям динамики спада интенсивности рассеяния.

Спасибо за внимание!