



Перенос солнечного излучения в разорванной горизонтально неоднородной облачности при наблюдении из космоса

Т.В. Русскова, ИОА СО РАН, г. Томск



Исходная задача

- современные прогностические математические модели, например, WRF (Weather Research And Forecasting Model), не позволяют достоверно определить роль облаков в будущих изменениях климата и их обратные связи. Одной из основных причин является использование **упрощенной параметризации** облаков. В частности, в моделях практически не учитывается пространственная неоднородность различных разновидностей облаков, а используются **1D-приближения**. Их применение существенно снижает точность восстановления таких параметров облачности, как высота ее верхней и нижней границ, **оптическая толщина** и **эффективный радиус частиц**, что негативно сказывается на точности моделирования переноса солнечного излучения согласно данным проекта CERES (Climate change and European aquatic RESources).
- **3D эффекты**, обусловленные взаимодействием солнечного излучения с облачностью, являются одним из главных факторов, влияющих на погрешности восстановления оптических характеристик облаков по данным спутникового зондирования. Дело в том, что 3D эффекты могут проявиться не в одном, а сразу в нескольких спутниковых пикселях, что не учитывают традиционные 'однопиксельные' подходы.
- благодаря достигнутому уровню развития вычислительных возможностей в настоящее время предпринимаются попытки восстановить параметры горизонтально неоднородных облаков с использованием **искусственных нейронных сетей**.
- в отличие от классических методов нейросетевой подход позволяет учесть яркости соседних пикселей, используя их как дополнительные входные признаки. Это обеспечивает возможность восстановления параметров облачности даже если размер наблюдаемого пикселя настолько большой, что можно пренебречь влиянием горизонтального переноса излучения между ним и окружающими его пикселями.



Общая схема алгоритма восстановления с использованием нейросетевой технологии

Предлагаемый подход к восстановлению оптико-микрофизических характеристик облаков (оптической толщины, эффективного радиуса частиц) основывается на реализации и использовании:

I. модели неоднородного облачного поля

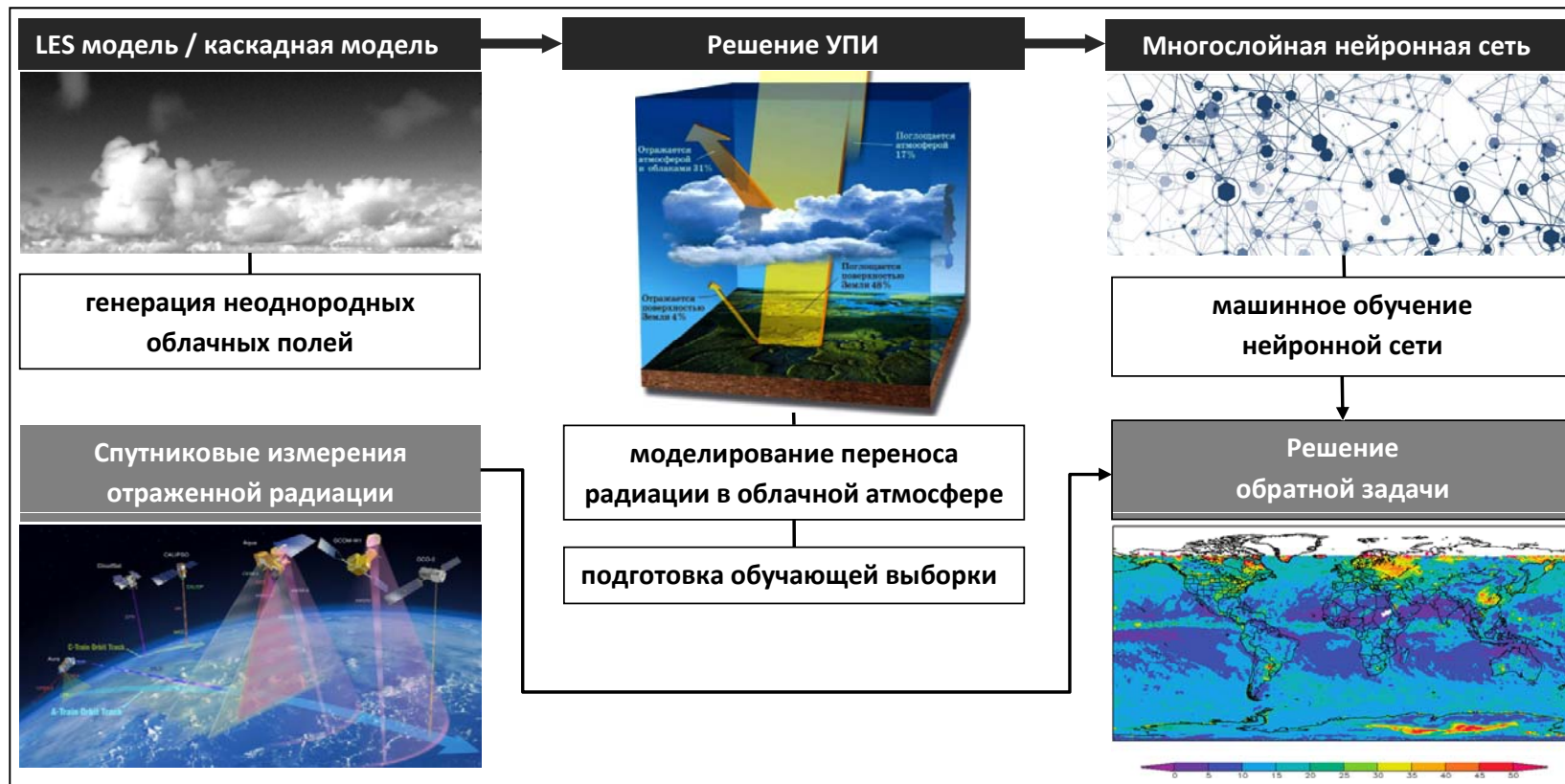
| I этап

II. модели переноса излучения (решение уравнения переноса излучения – УПИ)

| текущий этап

III. нейросетевой модели

| следующий этап



Цель работы

1. Реализовать весовую модификацию алгоритма метода Монте-Карло для моделирования переноса солнечного излучения в разорванной облачности при наблюдении из космоса
2. Рассчитать интенсивность отраженной радиации с учетом 'межпиксельного' взаимодействия для различных независимых реализаций горизонтально неоднородной разорванной облачности, построенных для некоторого диапазона средних значений оптической толщины облачного поля, эффективного радиуса частиц и балла облачности, при разной высоте Солнца над горизонтом и визировании 'в надир'
3. Сформировать базу данных интенсивности отраженной радиации для обучения нейронной сети



Модель переноса солнечного излучения

Скалярное стационарное интегро-дифференциальное уравнение переноса излучения

$$\vec{\omega} \nabla I(\lambda, \vec{r}, \vec{\omega}) = -\sigma(\lambda, \vec{r}, \vec{\omega}) I(\lambda, \vec{r}, \vec{\omega}) + \sigma_s(\lambda, \vec{r}, \vec{\omega}) \int_{4\pi} I(\lambda, \vec{r}, \vec{\omega}') g(\lambda, \vec{r}, \vec{\omega}', \vec{\omega}) d\vec{\omega}' + \varepsilon_0(\lambda, \vec{r}, \vec{\omega})$$

σ , σ_s , g – коэффициенты ослабления и рассеяния излучения и индикатриса рассеяния излучения соответственно, ε_0 – плотность распределения внутренних источников, I – интенсивность излучения

Метод решения – весовой алгоритм простой локальной оценки метода Монте-Карло

- ✓ численная модель успешно протестирована с использованием данных международного проекта **I3RC** <https://earth.gsfc.nasa.gov/climate/model/i3rc/testcases>
- ✓ основные характеристики модели:
 - плоскопараллельная модель атмосферы
 - учет вертикальной неоднородности оптической модели атмосферы
 - учет аэрозольного рассеяния и поглощения, рэлеевского рассеяния
 - учет молекулярного поглощения
 - изотропная подстилающая поверхность
 - положение в пространстве облачного слоя определяется высотой его нижней границы и геометрической толщиной слоя
 - правило 'внешней смеси' при расчете оптических характеристик в слоях перемешивания аэрозольных и облачных частиц
 - периодические граничные условия



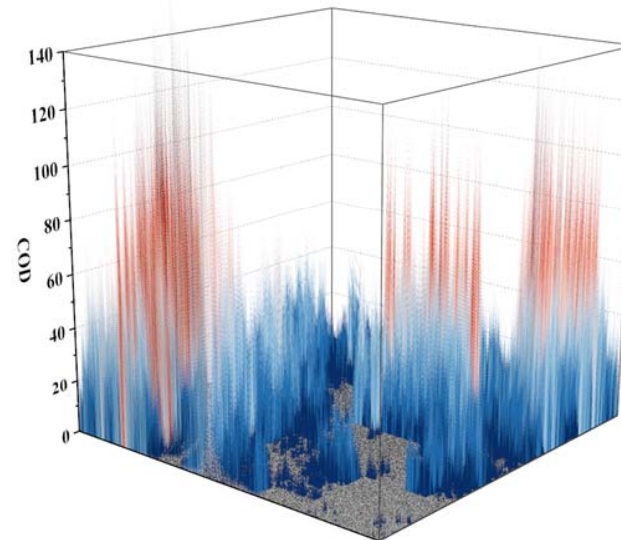
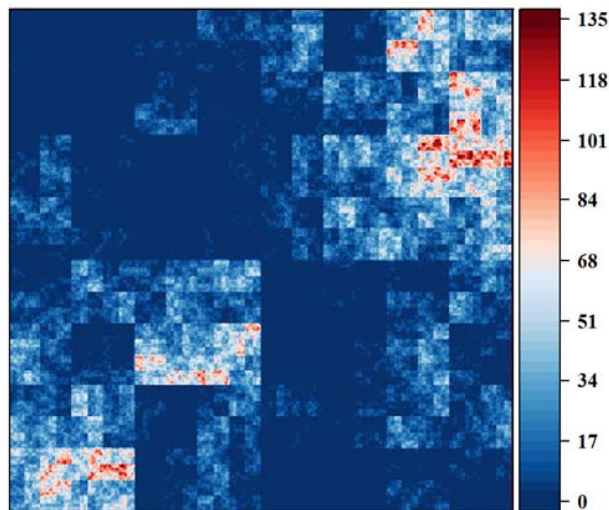
Модель поля горизонтально неоднородной облачности

Для моделирования 2D распределений оптической толщины τ жидкокапельной облачности на участке $S = [0, L] \times [0, L]$ используется трехпараметрическая фрактальная модель (модель ограниченных каскадов), для которой

$$0 < \tau_{\min} \leq \tau \leq \tau_{\max} < \left[\langle \tau \rangle \exp\left(\frac{1-2p}{1-2^{-H}}\right) \right] < \infty,$$

p – параметр, определяющий стандартное отклонение содержания жидкой воды (LWC) в облаках, а H – масштабный параметр. Для построения облачного поля используется рекуррентная процедура, интерпретируемая как последовательное распределение $\langle \text{LWC} \rangle L^2$ или $\langle \tau \rangle L^2$ в пределах S с использованием случайных весов таких, что

$$\sum_{i_1, i_2, \dots, i_n=1}^4 W_{n, i_1}(x, y) W_{n, i_2}(x, y) \cdots W_{n, i_n}(x, y) = 4^n, n > 1, \text{ где } n \text{ – уровень каскада.}$$



Пример 2D распределения оптической толщины поля разорванной облачности для уровня каскада $n=9$ и балла облачности 0.57 на участке $51.2 \times 51.2 \text{ км}^2$

Исходные данные

- спектральный канал: 0.67 мкм
- диапазон изменения средней по участку S оптической толщины $\langle \tau \rangle$: [5, 8, 10, 15, 20, 30]
- эффективного радиуса $\langle r_{\text{eff}} \rangle$, мкм: [6, 8, 10, 15, 20]
- балла облачности f : [0.5 – 1]
- зенитного угла Солнца (ЗУС), град: [30, 50, 70]
- модель микроструктуры облаков: Stratus Maritime (OPAC /M. Hess et al.)
- распределение частиц по размерам: модифицированное Гамма-распределение



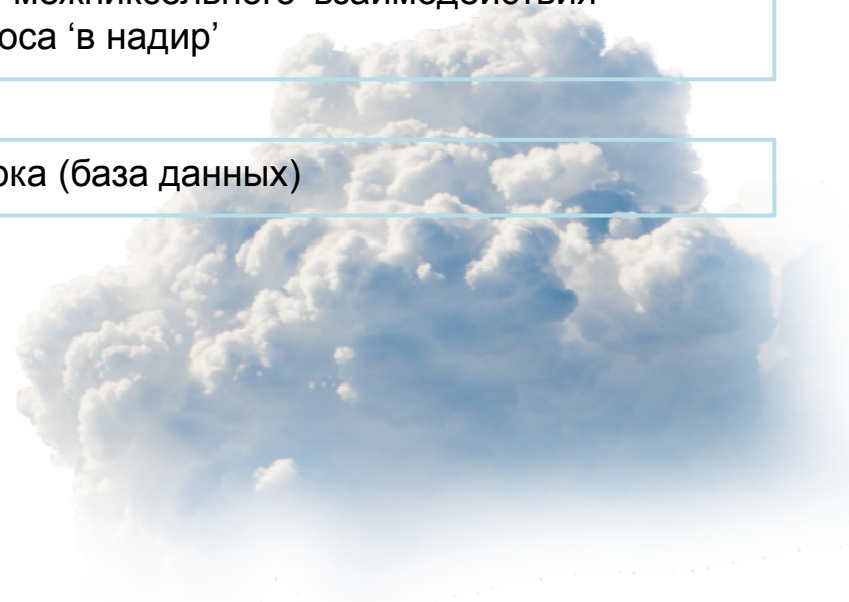
для каждой комбинации значений входных параметров моделируется несколько **независимых** реализаций горизонтально неоднородных полей разорванной облачности



для **каждой** реализации облачного поля методом Монте-Карло моделируется распределение интенсивности отраженной радиации с учетом 'межпиксельного' взаимодействия при визировании из космоса 'в надир'



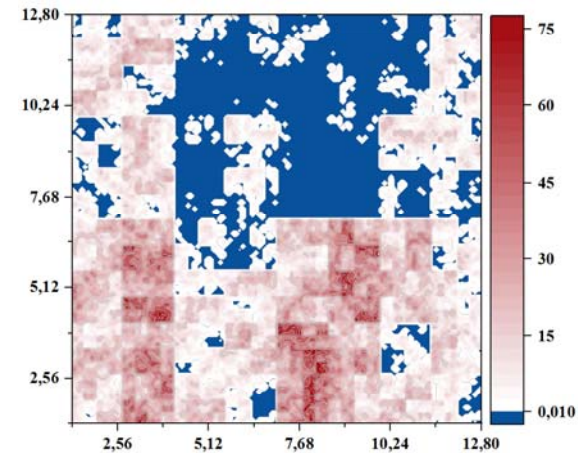
формируется обучающая выборка (база данных)



Результаты моделирования

Пример реализации облачного поля для $\langle \tau \rangle = 10$, $r_{\text{eff}} = 10$ мкм

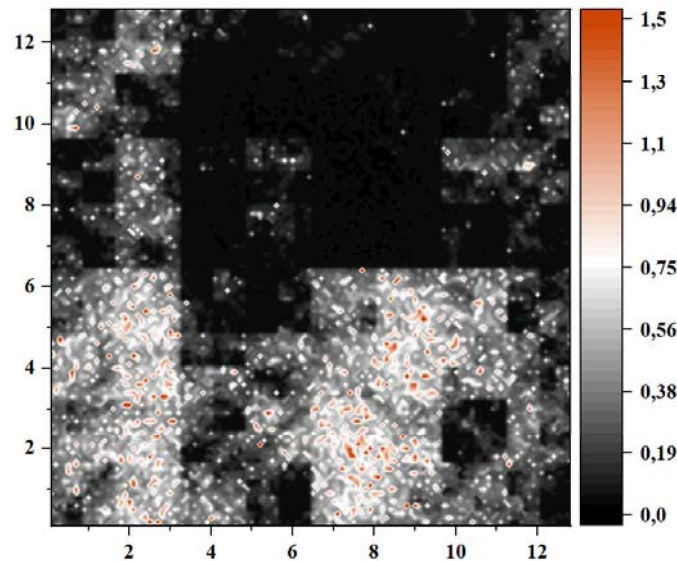
- балл облачности 0.65
- максимальное оцениваемое значение оптической толщины 112.8
- пространственное разрешение $d = 100$ м
- длина участка 12.8 км



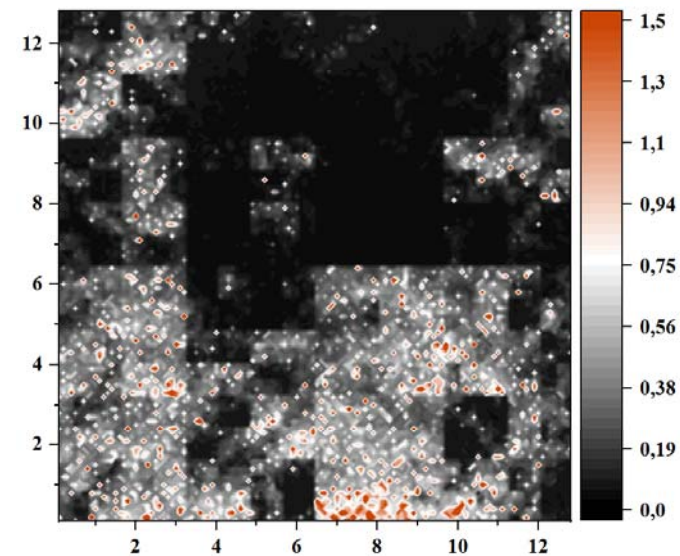
Интенсивность отраженной солнечной радиации при разных зенитных углах Солнца (ЗУС) и визировании 'в надир'

- облачность Stratus Maritime на высоте от 1 до 2 км
- альbedo подстилающей поверхности 0

ЗУС = 30°



ЗУС = 70°



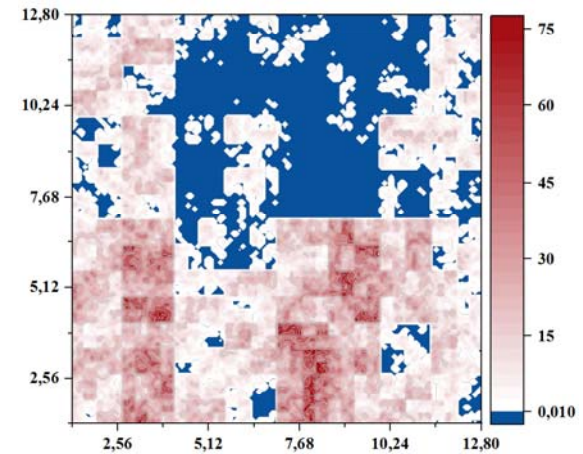
Результаты моделирования

Пример реализации облачного поля для $\langle \tau \rangle = 10$, $r_{\text{eff}} = 10$ мкм

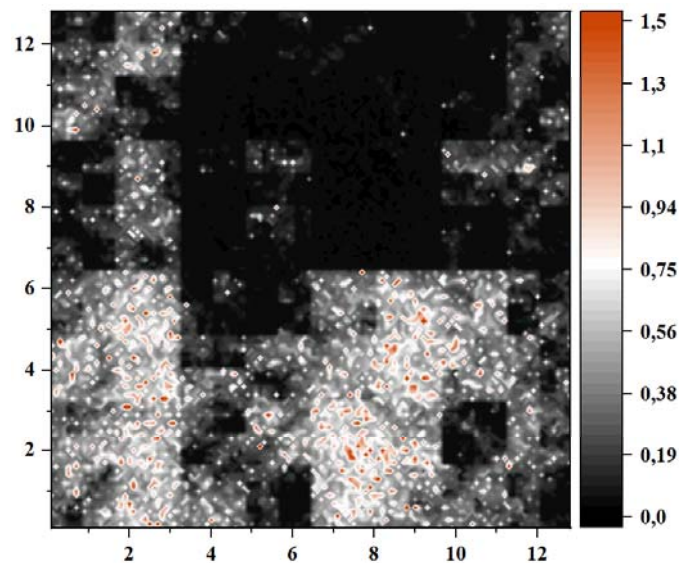
- балл облачности 0.65
- максимальное оцениваемое значение оптической толщины 112.8
- пространственное разрешение $d = 100$ м
- длина участка 12.8 км

Интенсивность отраженной солнечной радиации при **разном пространственном разрешении** и визировании 'в надир'

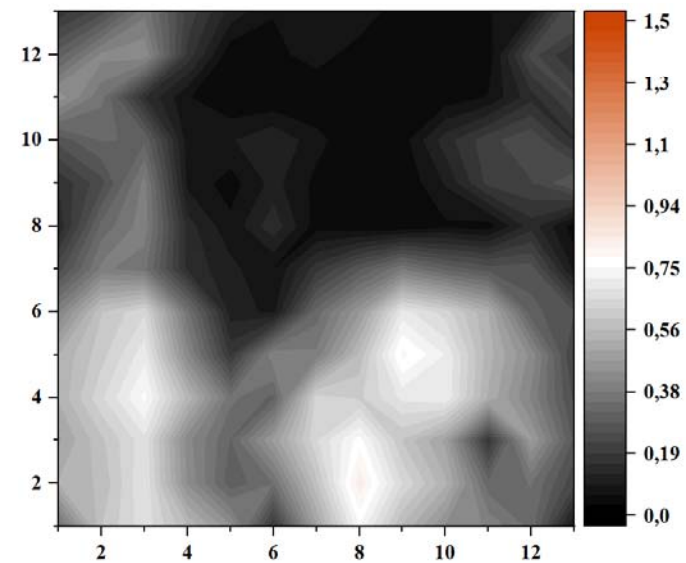
- облачность Stratus Maritime на высоте от 1 до 2 км
- альbedo подстилающей поверхности 0



$d = 100$ м , ЗУС = 30°



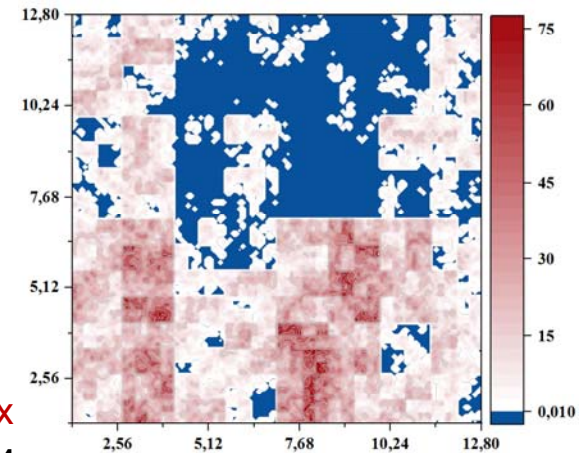
$d = 1$ км, ЗУС = 30°



Результаты моделирования

Пример реализации облачного поля для $\langle \tau \rangle = 10$, $r_{\text{eff}} = 10$ мкм

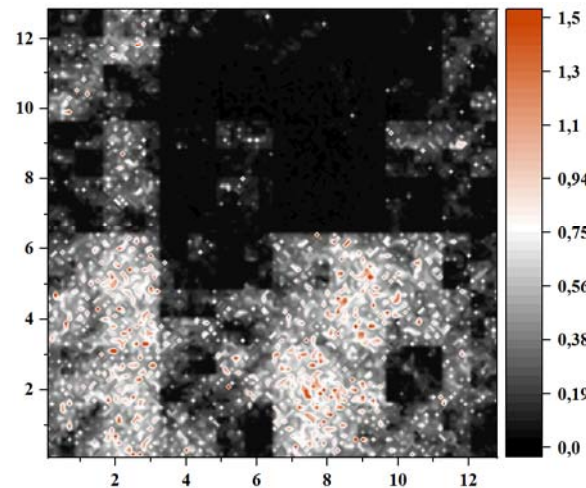
- балл облачности 0.65
- максимальное оцениваемое значение оптической толщины 112.8
- пространственное разрешение $d = 100$ м
- длина участка 12.8 км



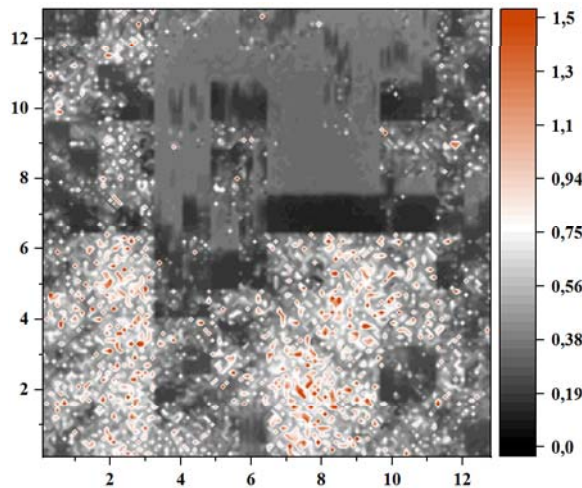
Интенсивность отраженной солнечной радиации при разных значениях альбедо подстилающей поверхности и визировании 'в надир'

- облачность Stratus Maritime на высоте от 1 до 2 км

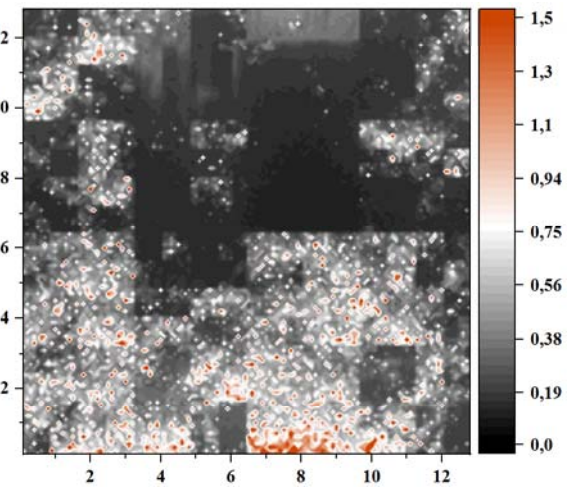
Альбедо 0, ЗУС = 30°



Альбедо 0.3, ЗУС = 30°



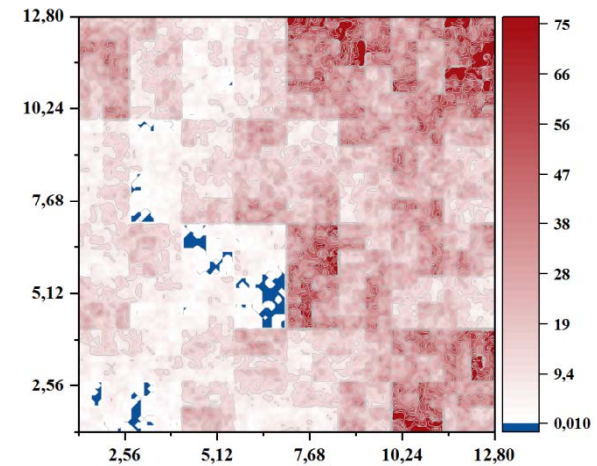
Альбедо 0.3, ЗУС = 70°



Результаты моделирования

Пример реализации облачного поля для $\langle \tau \rangle = 20$, $r_{\text{eff}} = 10$ мкм

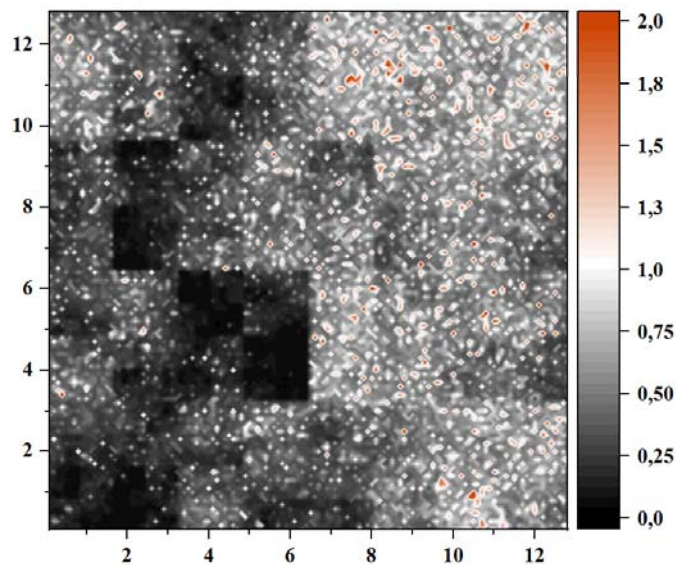
- балл облачности 0.95
- максимальное оцениваемое значение оптической толщины 225.8
- пространственное разрешение $d = 100$ м
- длина участка 12.8 км



Интенсивность отраженной солнечной радиации **при высоком балле облачности** и визировании 'в надир'

- облачность Stratus Maritime на высоте от 1 до 2 км
- альbedo подстилающей поверхности 0

ЗУС = 30°



ЗУС = 70°

