

Стохастический закон Бера-Ламберта для неоднородного растительного покрова

Н.В. Шабанов

СПДЗЗ-2017
Москва, ИКИ РАН
17 ноября 2017 г.

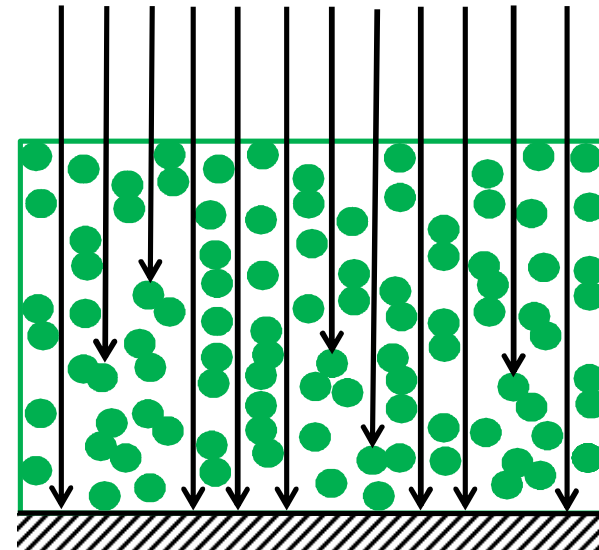
Цель работы

Закон Бера-Ламберта- это простейшее Уравнение Переноса (УП) используемое для моделирования нерассеянного излучения в однородной среде. Применяется для многих приложений ДЗЗ по расчету LAI и проективного покрытия. Цель работы- разработать новую формулировку закона для реалистичной неоднородной 3D среды.

Прямое пропускание света
несомкнутым пологом леса



Модель для однородной среды

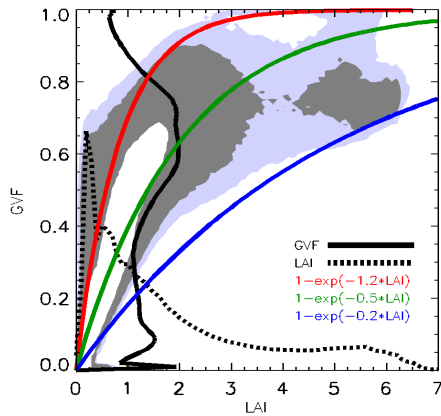


закон Бера-Ламберта для однородной среды:

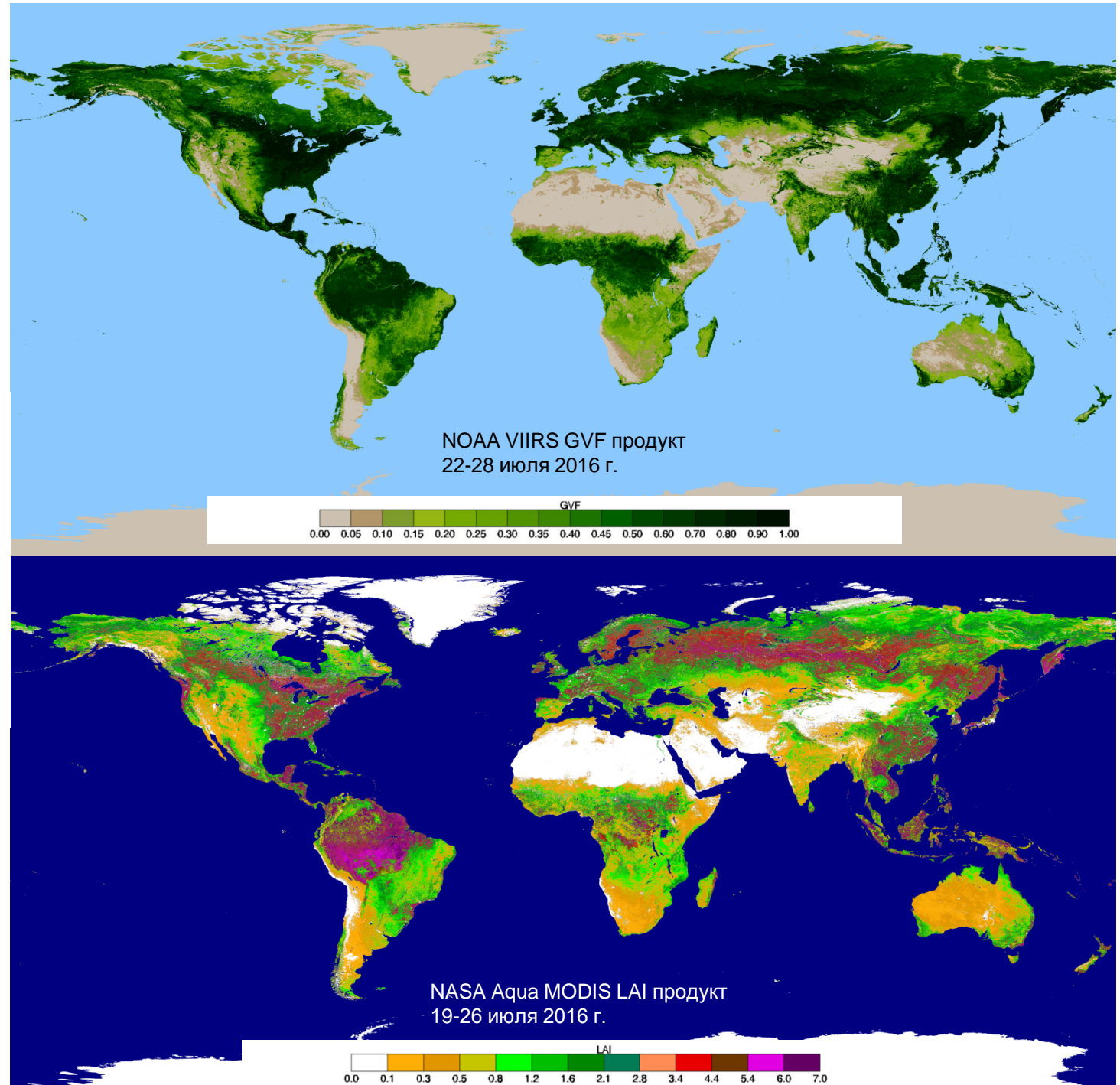
$$t(\text{LAI}, \theta) = \exp\left[-G \cdot \text{LAI} / \cos(\theta)\right],$$

- t- коэффициент пропускания – **интерпретируется** как вероятность наличия просветов(=1- проективное покрытие). **Но в однородной среде нет просветов!!!**
- LAI- индекс листовой поверхности – суммарная площадь листьев на единицу площади земной поверхности

GVF (Green Vegetation Fraction)- площадь проективного покрытия, доля покрытия пиксела зеленой растительностью при наблюдении в надир (1-вероятность просветов).



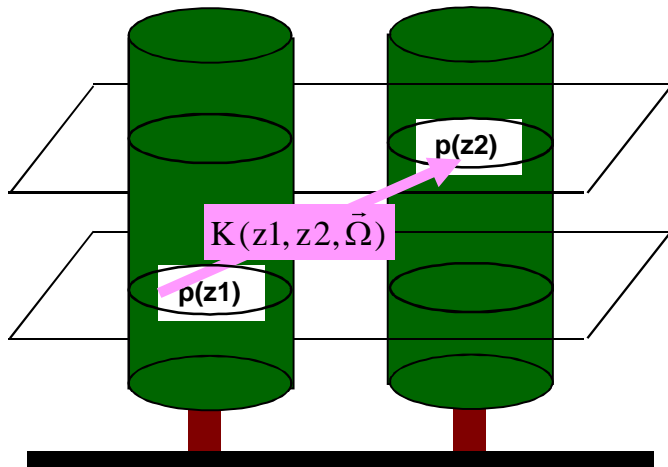
LAI (Leaf Area Index)- индекс листовой поверхности, суммарная площадь поверхности листьев на единицу площади земной поверхности.



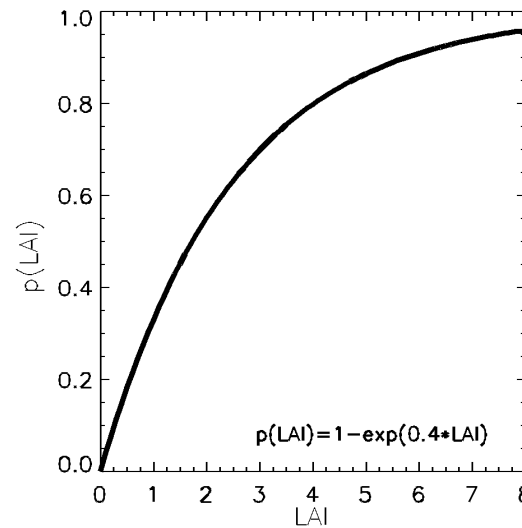
Основные понятия Стохастического Уравнения Переноса

Для решения поставленной задачи применяется Стохастическое УП – это 1D УП, однако оно учитывает неоднородность среды посредством 1-го и 2-го моментов структуры. Парная корреляционная функция была разработана, однако влияние функции $p(\text{LAI})$ было недооценено.

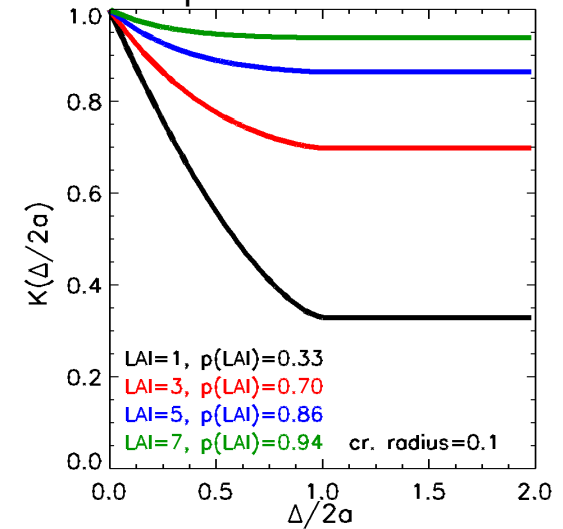
Кроны моделируются цилиндрами (радиус a) распределенными по Пуассону



$p(\text{LAI})$ - вероятность наличия фитоэлементов



K - условная парная корреляционная функция фитоэлементов



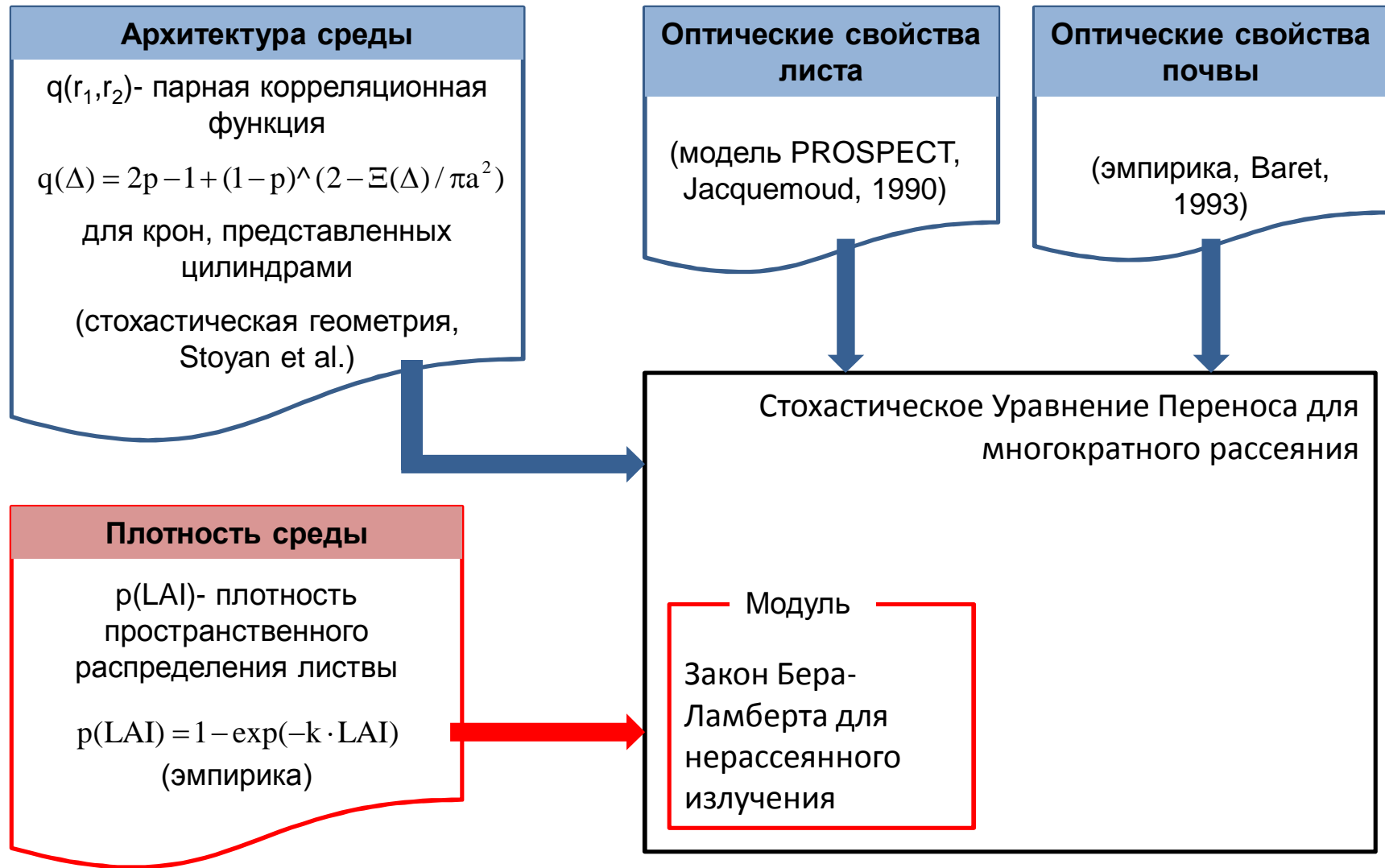
$$U(z, \vec{\Omega}) = \lim_{R \rightarrow \infty} \frac{1}{S \cap T_z} \iint I(x, y, z, \vec{\Omega}) dx dy$$

-Средняя интенсивность излучения по фитоэлементам

$$\bar{I}(z, \vec{\Omega}) = \lim_{R \rightarrow \infty} \frac{1}{S_R} \iint_{S_R} I(x, y, z, \vec{\Omega}) dx dy$$

-Средняя интенсивность излучения по всему пространству

Структура модели Стохастического Уравнения Переноса



Красным выделены блоки, изучаемые в данной работе

Оригинальный закон Бера-Ламберта

Однородная среда:

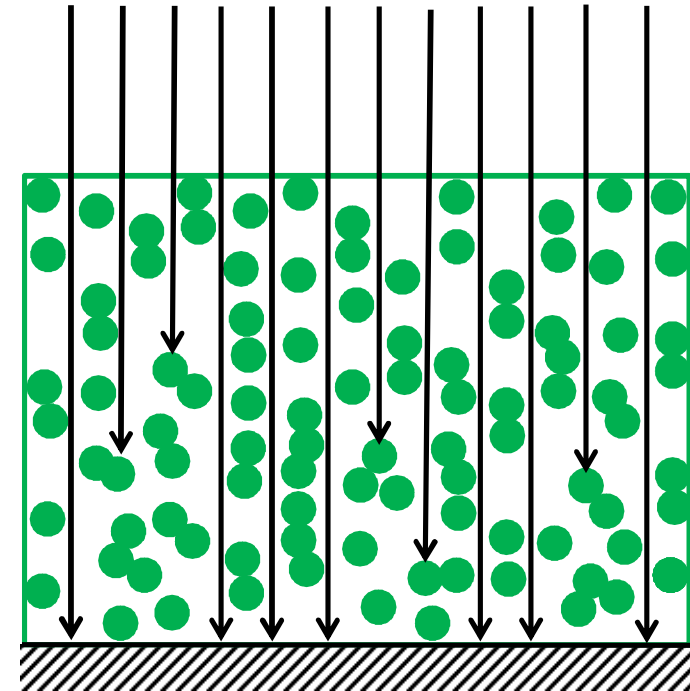
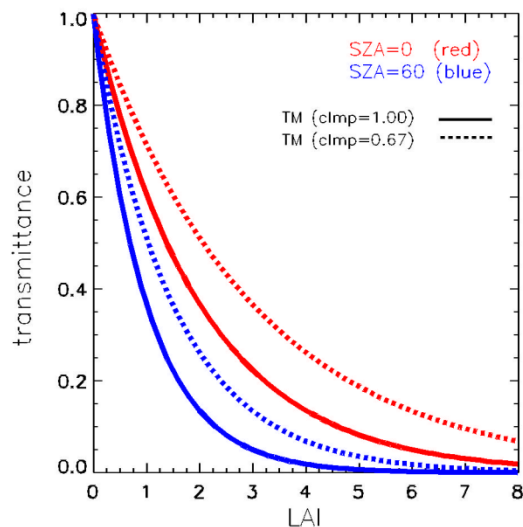
$$t(\text{LAI}, \theta) = \exp\left[-\gamma \cdot G \cdot \text{LAI} / \cos(\theta)\right].$$

γ -clumping index, поправочный коэффициент для “аппроксимации” неоднородности среды (Nilson, 1971)

$\gamma = 1$ -стандартная однородная среда

$\gamma < 1$ -аппроксимирует лучшее пропускание

Оригинальный закон Бера-Ламберта описывает только “просачивание” сквозь однородную среду



Однородная среда

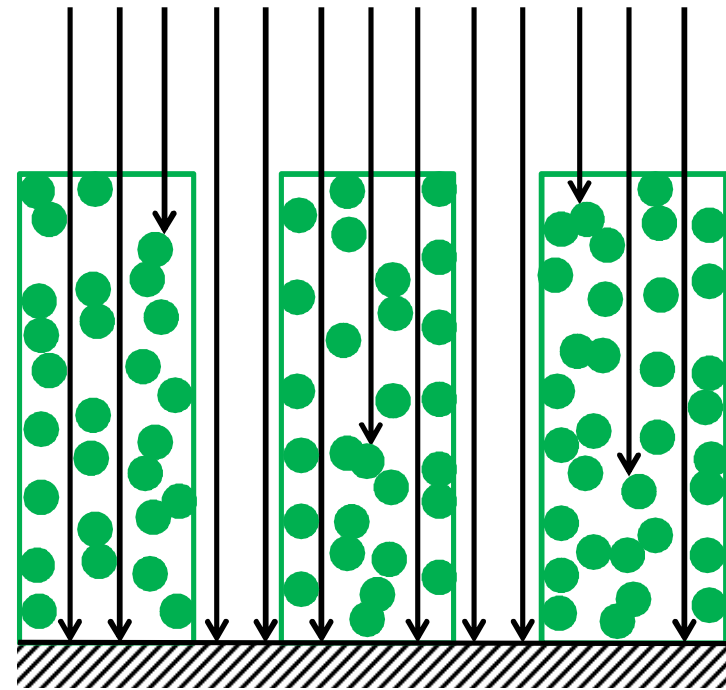
Поправочный коэффициент не меняет природы уравнения- оно остается применимым для однородной среды (доказано в данной работе). Концептуально можно считать что поправка описывает эффект группировки молекул однородной среды- но на макро уровне среда остается однородной (нет крон)!

Стохастический закон Бера-Ламберта

Неоднородная среда:

$$\left\{ \begin{aligned} U_{\delta}(z) + \frac{d_L \cdot G}{\cos(\theta)} \int_0^z d\xi K(z, \xi, \theta) U_{\delta}(\xi) &= 1, \\ I_{\delta}(z) &= 1 - \frac{d_L \cdot G}{\cos(\theta)} \int_0^z d\xi p(\xi) U_{\delta}(\xi). \end{aligned} \right.$$

Стохастический закон Бера-Ламберта моделирует пропускание в среде с макро-неоднородностями-
1) "просачивание" сквозь однородную среду, 2)
прямое пропускание между кронами.



Стохастическая среда

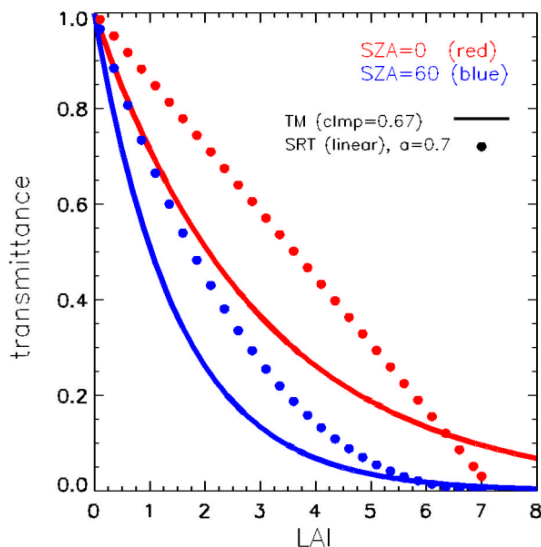
Аналитическое решение для направления в надир:

$$t(\text{LAI}) \Big|_{\text{SZA}=0} = I_{\delta}(\text{LAI}) \Big|_{\text{SZA}=0} = \underbrace{p(\text{LAI}) \exp[-G \cdot \text{LAI} / p(\text{LAI})]}_{\text{Просачивание}} + \underbrace{[1 - p(\text{LAI})]}_{\text{Прямое пропускание}}$$

Влияние выбора модели $p(\text{LAI})$ на коэффициент пропускания

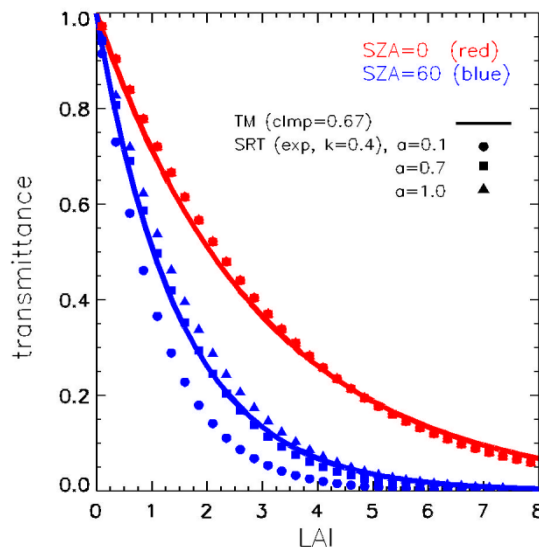
А) Линейная модель

$$p(\text{LAI}) = \text{LAI} / \text{LAI}_{\max}$$



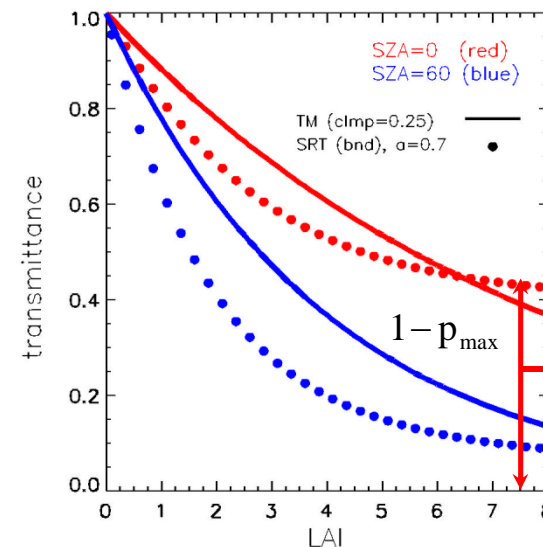
Б) Экспоненциальная модель

$$p(\text{LAI}) = 1 - \exp(-k \cdot \text{LAI})$$

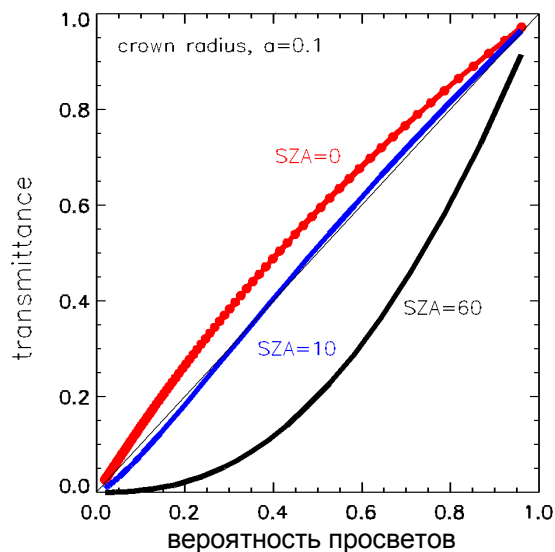


В) Экспоненциальная модель-2

$$p(\text{LAI}) = p_{\max} [1 - \exp(-k \cdot \text{LAI})]$$

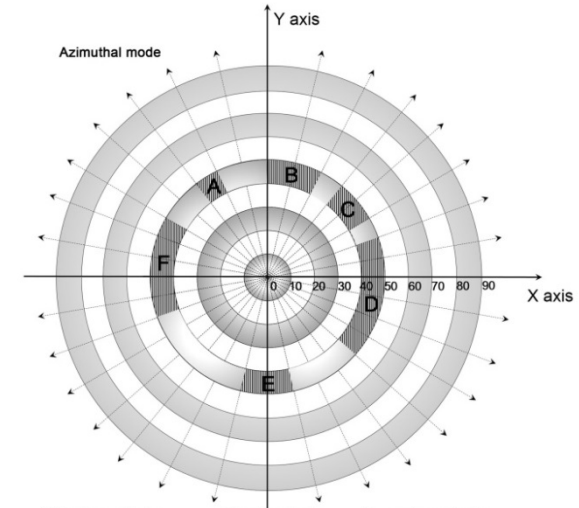
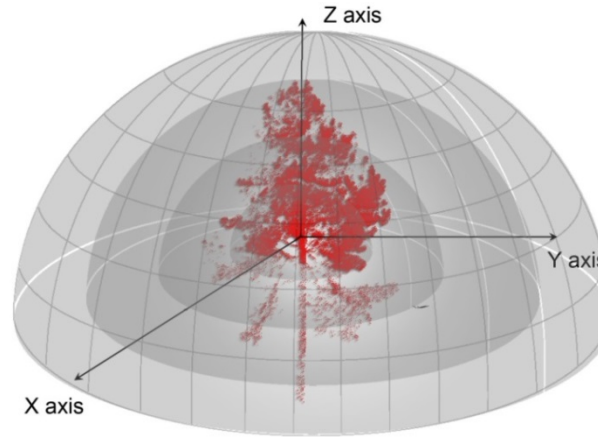
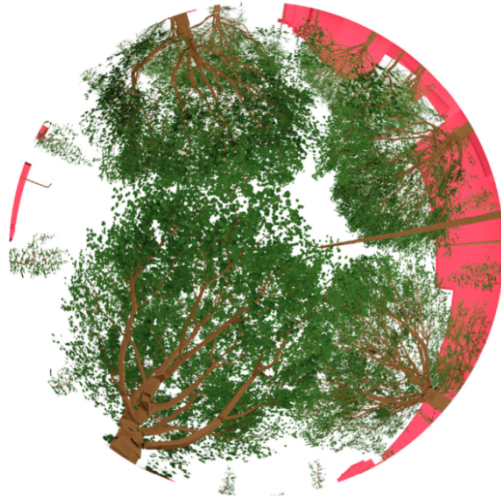


- А) Использовалась ранее, но не подходит для естественной среды.
- Б) Оптимальна для естественной среды.
- В) Подходит для разреженной искусственной среды (например парки)



Применение к обработке DHP данных

DHP измерения направленной вероятности просветов:



Моделирование направленной вероятности просветов:

Однородная среда:

(предполагается что вероятность просветов = коэффициенту пропускания)

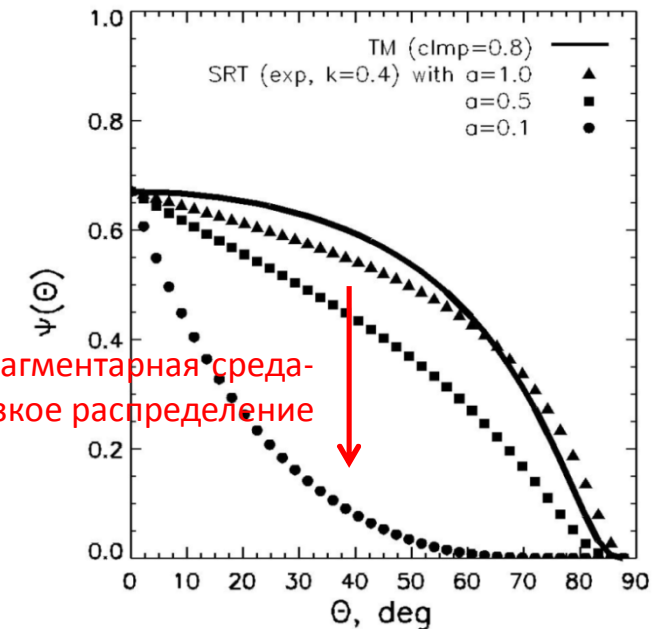
$$t(\text{LAI}, \theta) = \exp[-\gamma \cdot G \cdot \text{LAI} / \cos(\theta)]$$

Неоднородная среда:

(вероятность просветов выводится из стохастических моментов структуры q и $p(\text{LAI})$)

$$\psi(\text{LAI}, \theta) = [1 - p(\text{LAI})]^{(1 + \text{tg}(\theta) / \pi a)}$$

Более фрагментарная среда -
более узкое распределение

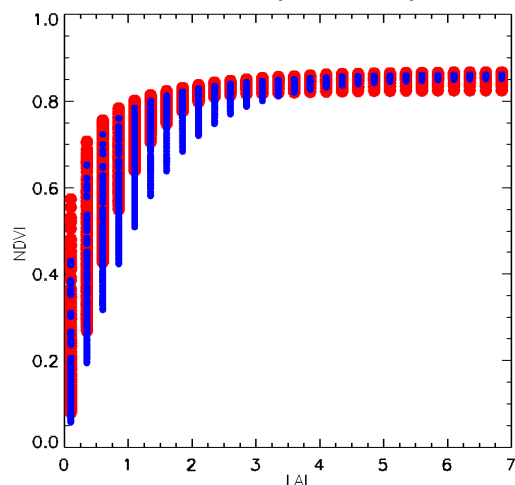


Применение к обработке спутниковых данных

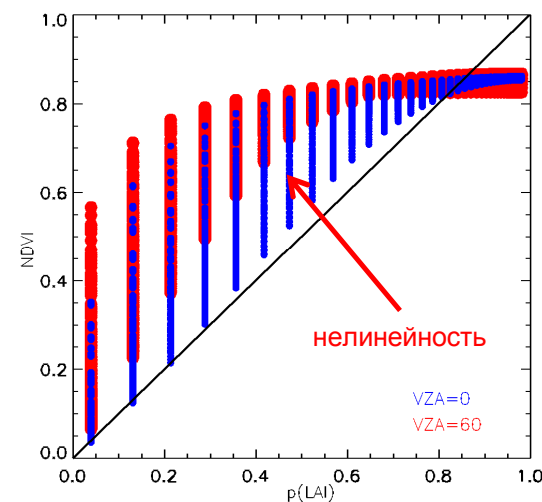
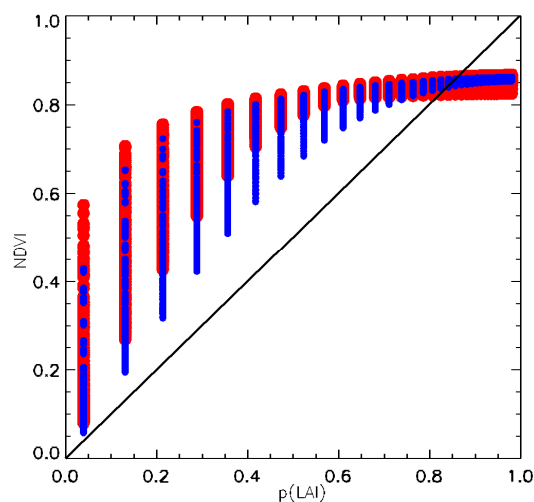
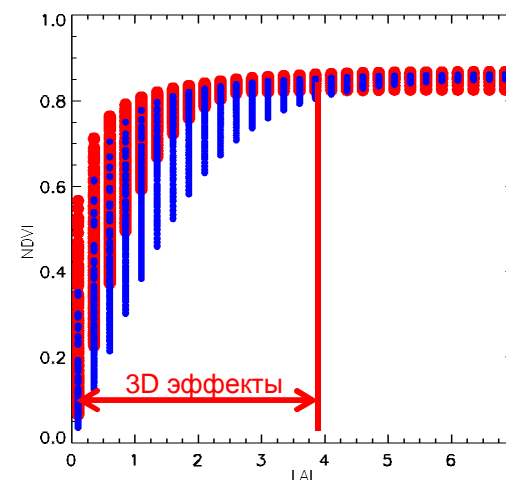
Модель нерассеянного излучения (закон Бера-Ламберта) является частью стохастического Уравнения Переноса для многократного рассеяния. Влияние новой модели было протестировано используя параметризацию MODIS LAI алгоритма (набор оптических свойств листа, почвы и геометрия). Для визуализации 3D эффектов сравнены однородный и неоднородный случай.

- При положениях близких к надиру соотношение NDVI-LAI становится более пологим. Эффект структуры ослабляется при пологом визировании
- Также эти 3D эффекты наблюдаются только для умеренных значений LAI (<4). При более высоких LAI $\rho(\text{LAI}) \rightarrow 1$ и среда близка к однородной
- Соотношения NDVI- $\rho(\text{LAI})$ нелинейны как для однородной так и стохастической среды
- Однако неоднородность ослабляет нелинейность близких к надиру наблюдений

УП для однородной среды



Стохастическое УП



Основные результаты работы

Теоретическая новизна:

- Закон Бера-Ламберта для моделирования нерассеянного излучения не инвариантен по отношению к структуре среды.
- При переходе от однородной к естественной неоднородной среде понятия коэффициента пропускания и доли открытого пространства не тождественны.
- Это возникает из-за того что в неоднородной среде присутствуют два механизма перемещения фотонов 1) просачивания через однородную среду крон, 2) прямое пропускание через межкронное пространство.
- Поле нерассеянного солнечного излучения определяется как структурой (парная корреляционная функция) так и плотностью фитоэлементов ($\rho(\text{LAI})$).
- Результаты работы находятся в соответствии с моделью Геометрической Оптики (ГО) (Li and Strahler, 1988)- вклад в объединение УП и ГО моделей.

Приложения:

- Подход предоставляет новый уровень реализма 3D моделирования для расчета LAI и проективного покрытия – как из наземных измерений (технологии DHP, LAI-2000, AccuPAR, DEMON) так и спутниковых данных (технологии MODIS LAI алгоритма, VIIRS GVF алгоритм). В частности, планируется что данный теоретическая разработка будет использована в новой версии LAI алгоритма в ИКИ.

Детали- см. Shabanov N.V. (2017) “The stochastic Beer’s law for the heterogeneous vegetation canopy”, Remote Sensing of Environment (in review).

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ, контракт 14.616.21.0063, уникальный идентификатор ПНИЭР RFMEFI61615X0063