

# Полу-эмпирический подход разделения индекса листовой поверхности рассчитанного по данным ДЗЗ между верхним и нижним ярусами лесов России

Н.В. Шабанов<sup>1</sup>, С.А. Барталев<sup>1</sup>, Н. Кобаяши<sup>2</sup>, Н. Шин<sup>2</sup>, Т.С. Ховратович<sup>1</sup>,  
В.О. Жарко<sup>1,4</sup>, А.А. Медведев<sup>3</sup>, Н.О.Тельнова<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ИКИ РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>RIGS/JAMSTEC, Канагава, Япония

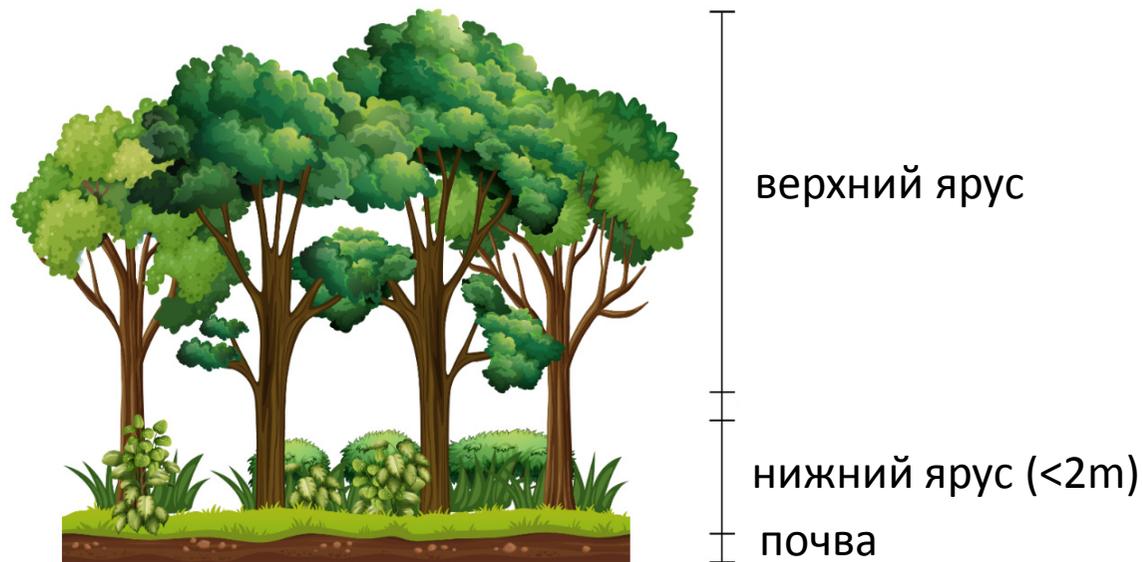
<sup>3</sup>Институт Географии РАН, Москва, Россия

<sup>4</sup>ВШЭ, Факультет Географии, Москва, Россия



СПДЗЗ-2022- Школа Молодых Ученых Москва, ИКИ РАН  
18 ноября 2022 г.

Постановка задачи: Многоярусность одна из отличительных черт архитектуры леса. Ярусы могут варьироваться по биогеохимическим циклам, фенологии и функциональной роли в экосистемах. Большинство спутниковых продуктов дают оценку полного LAI, в то время как такое разделение необходимо для многих приложений. **В России в отношении LAI нет надежной статистики средних значений по породам а тем более распределение по ярусам**



Верхний ярус включает кроны ограниченного числа пород деревьев в зрелом стоянии (высота >2м). Видовой состав нижнего яруса сложный и зависит от пород верхнего яруса, но как правило состоит из молодых деревьев (высота >2м), кустарников, трав и мхов и тп.

# История исследований

## Наземные измерения

- 1) Наземные измерения как правило предоставляют оценку LAI (крон) на основе измерений широкоугольными камерами доли просветов и обработки измерений на основе формулы Миллера (LAI vs. gap fraction)
- 2) Методология измерений LAI нижнего яруса не является “зрелой” на данный момент. Очень немногие применяют деструктивные методы оценки. В большинстве случаев отражательный спектр нижнего яруса измеряется и конвертируется в LAI.

## Спутниковые продукты

- 1) Большинство продуктов дают оценку полного LAI (NASA MOD15, SPOT-VGT CYCLOPES, GEOV-1 , ENVISAT/MERIS LAI, MODIS/AVHRR GLOBMAP)
- 2) Оценка отражающей способности нижнего яруса на основе обработки MISR много-угловых измерений и MODIS BRDF продукта
- 3) Крайне ограниченное число продуктов разделяют LAI по ярусам

## История исследований (продолжение)

### Продукты отражающей способности нижнего яруса

- Продукты получены на основе инверсии линейной модели смеси компонент сцены (освещенные/затененные части крон и нижнего яруса) примененной к много-угловым данным MISR (Pisek & Chen, 2009) и позднее к MODIS BRDF (MOD43) продукту (Pisek et al., 2012). Рассчитан ежемесячный продукт (среднее за 2000-2010) MISR отражательная способность нижнего яруса (Jiao et al., 2014).

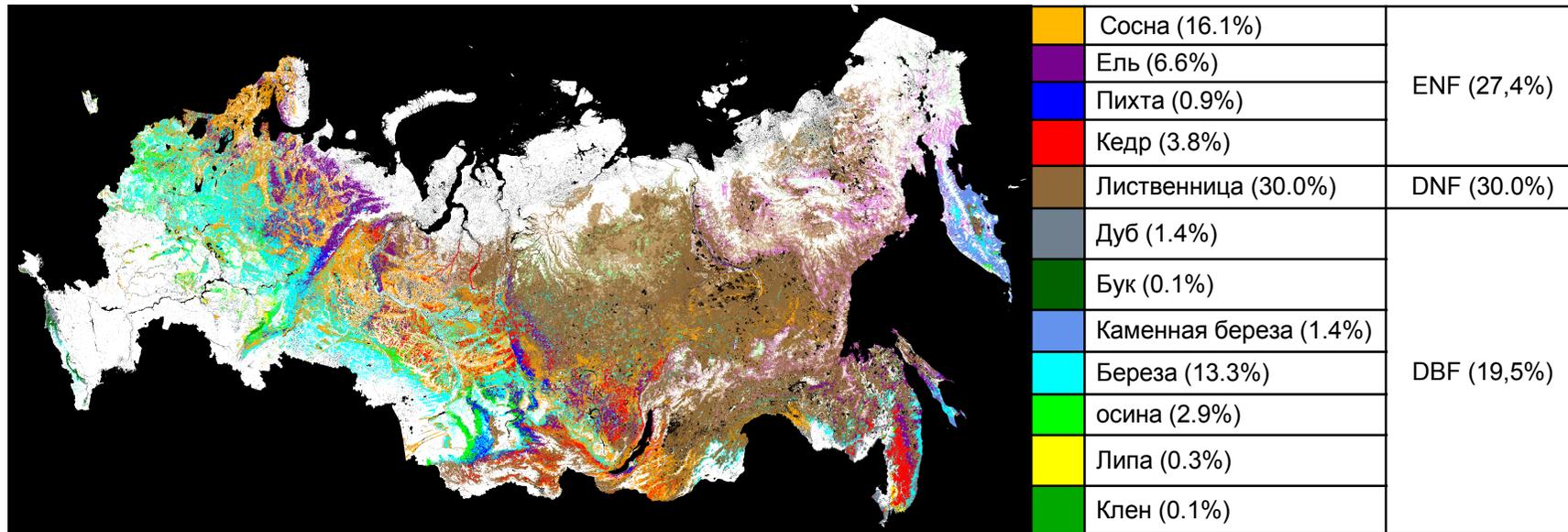
### Продукты ярусного LAI

- Временные ряды ежемесячного продукта за период (2008-2010) LAI верхнего и нижнего яруса для глобальных хвойных и широколиственных лесов был создан (Liu et al., 2017) на основе многоярусной версии GLOBCARBON LAI алгоритма (Deng et al., 2006). MODIS Reduced Simple Ratio (RSR) был использован для оценки LAI верхнего яруса, and MISR Simple Ratio (SR) для оценки LAI нижнего яруса.
- Временные ряды 10-дневного продукта (1998-2013) LAI верхнего яруса для лиственницы в восточной Сибири был Рассчитан на основе SPOT-VGT data используя параметрические соотношения между Normalized Difference Water Index (NDWI) и LAI полученные на основе компьютерного моделирования рассеяния фотонов в лесной среде (Kobayashi et al., 2010).

# Входные данные

- 1) Ежегодный продукт проективное покрытие крон леса (f) за 2010 г, 230м (продукт ИКИ)
- 2) Еженедельный продукт индекс листовой поверхности (LAI) за 2010 г, 230 м (продукт ИКИ). Для данной работы LAI данные были осреднены за вегетационный период (JJA)
- 3) Доминирующие породы лесов России за 2010 г., 230 м (продукт ИКИ). Для данной работы породы были агрегированы в 3 класса : DNF, ENF, DBF.
- 4) Наборы данных для валидации
  - a) Временные ряды LAI верхнего яруса по восточной Сибири за 2010 г.,  $1/112^0$  , и наземные измерения LAI верхнего и нижнего ярусов по нескольким локациям около г. Якутска. Измерения произведены в 2000 и 2019 гг японскими исследователями из института RIGS/JAMSTEC.
  - b) Беспилотные измерения (UAV) проективного покрытия крон на локации в Кольском полуострове в 2019 г. Измерения проводились сотрудниками Института Географии РАН.

# Породы лесов России



Продукт IKI MODIS породы лесов за 2010 г.

- Отмаскированы тундра на севере и с/х на юге
- Доминирующая порода лесов России- лиственница (30%)
- Три класса лесов (ENF, DNF, DBF) представлены в близких к равным долях
- ИКИ LAI алгоритм использует информацию по классам лесов а не пород в вычислениях

# Методология разложения LAI по ярусам

Моделирование архитектуры леса:

Верхний ярус = случайно расположенные кроны с проективным покрытием  $f$

Нижний ярус = однородная среда (turbid medium)

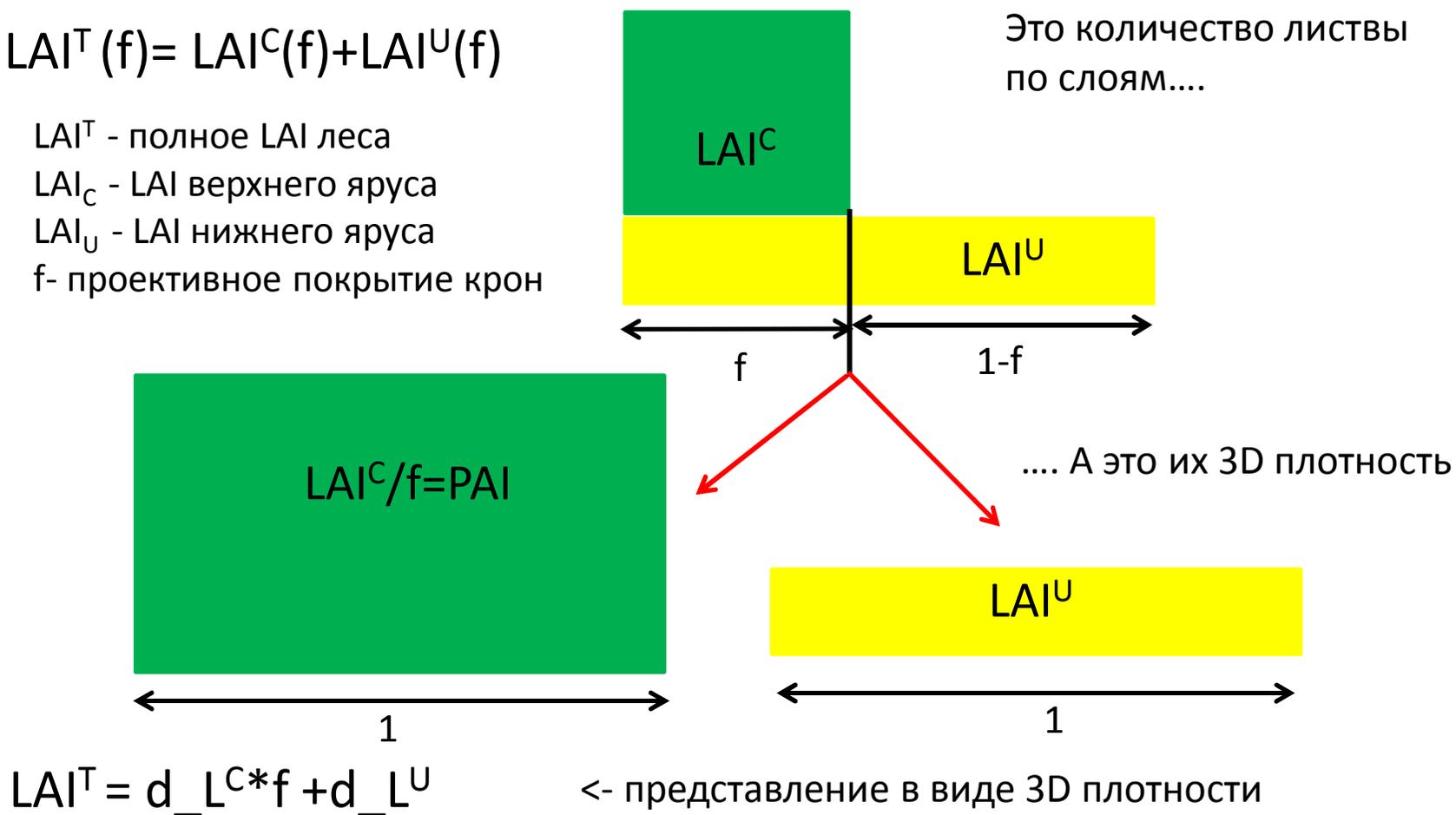
$$LAI^T(f) = LAI^C(f) + LAI^U(f)$$

$LAI^T$  - полное LAI леса

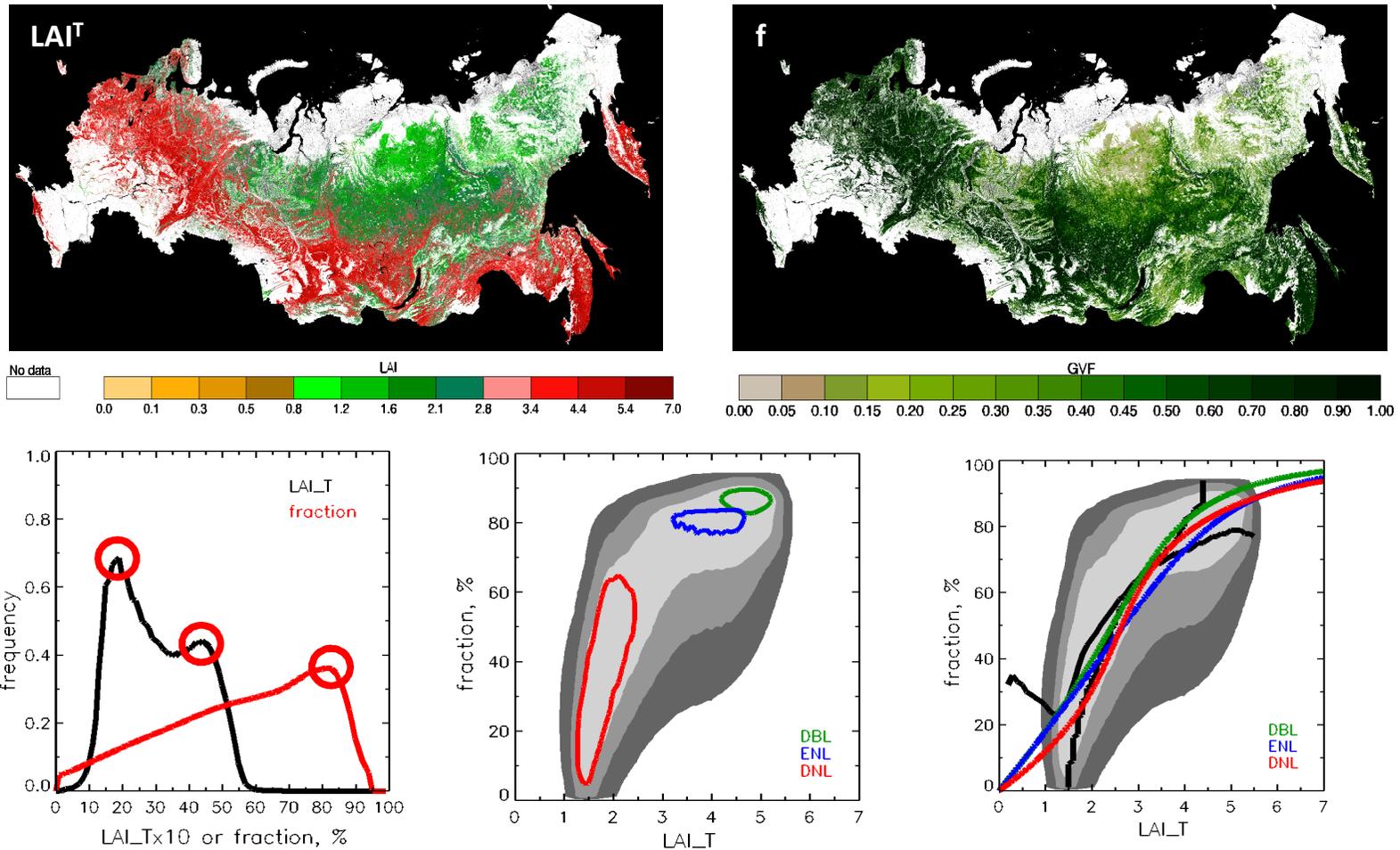
$LAI^C$  - LAI верхнего яруса

$LAI^U$  - LAI нижнего яруса

$f$  - проективное покрытие кроны



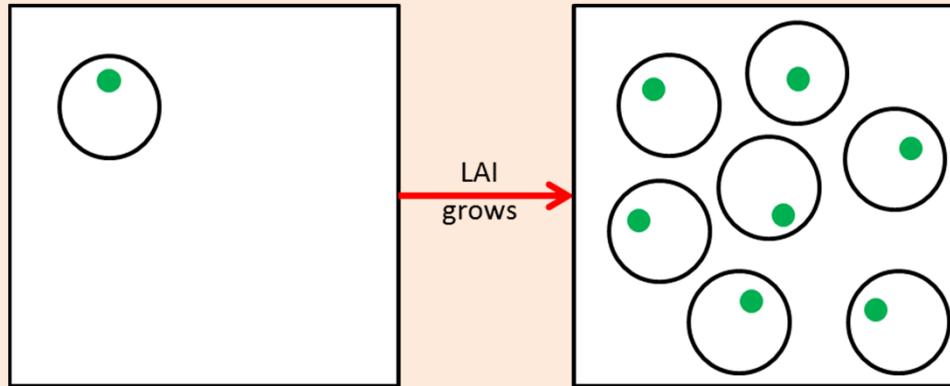
# Статистическое соотношение между полным LAI леса и проективным покрытием крон



- Гистограммы LAI имеет два пика (разреженные и густые леса)
- Фазовая диаграмма показывает нелинейное соотношение между LAI<sup>T</sup> и fraction

# Причины нелинейности $LAI^C(f)$

## 1) Линейная модель

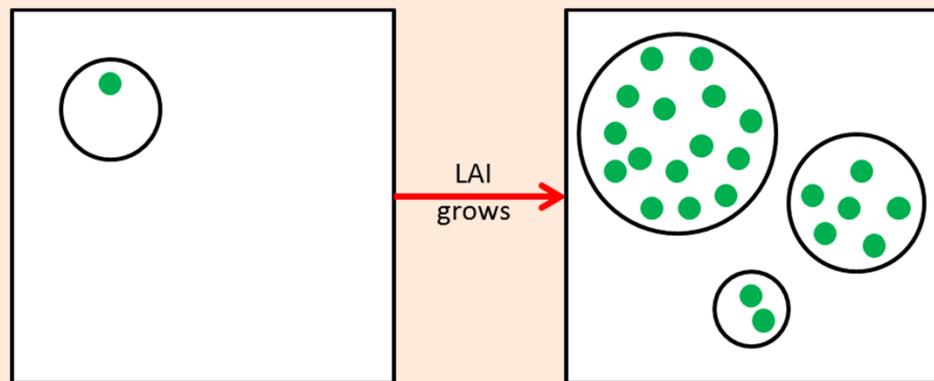


$$d_L = \text{const}$$

$$LAI_C(f) = d_L * f$$

LAI растет исключительно за счет увеличения проективного покрытия крон.

## 2) Не-линейная модель для ненарушенных лесов



$$d_L \neq \text{const}$$

LAI растет как за счет увеличения проективного покрытия так и плотности листвы,

$$f = 1 - \exp(-k * LAI_C)$$

$$d_L = -\ln(1-f)/k * f \neq \text{const}$$

# Принципы взаимодействия растительности ярусов

## 1) Биологическое взаимодействие-

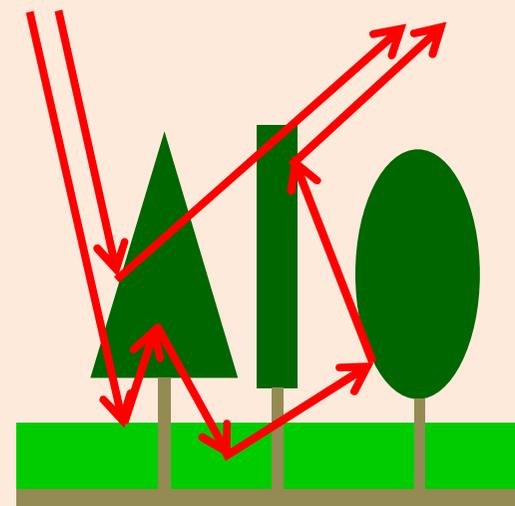
Tanioka et al. (2020) “Статистически значимая отрицательная корреляция наблюдается между LAI верхнего и нижнего яруса. Наши результаты показывают что растительность нижнего яруса компенсирует пробелы в верхнем ярусе, так что полное LAI леса имеет тенденцию оставаться однородным в зрелом лесу”.



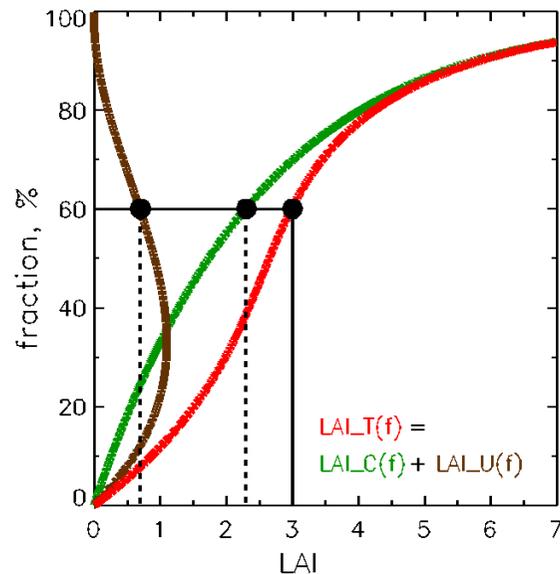
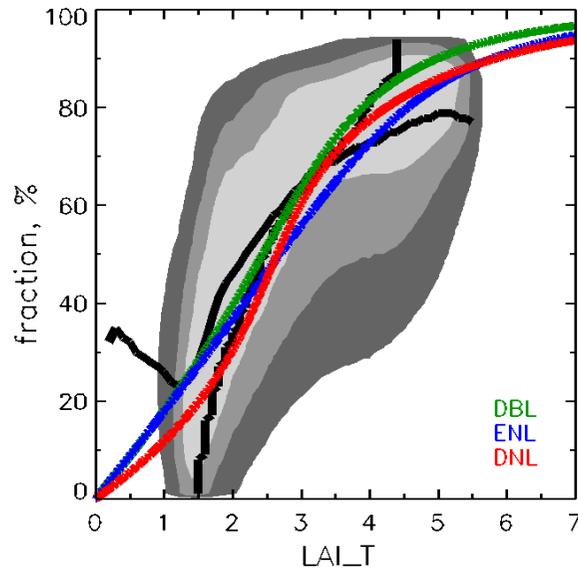
Tanioka et al., 2020. A Spatial Relationship between Canopy and Understory Leaf Area Index in an Old-Growth Cool-Temperate Deciduous Forest. *Forests*, 11, 1037

## 2) Радиационное взаимодействие-

Многokратное рассеяние приводит к радиационному взаимодействию ярусов. Однако этот эффект зачастую игнорируется в алгоритмах по разделению растительности между ярусами



# Моделирование соотношения между полным LAI леса и проективным покрытием крон



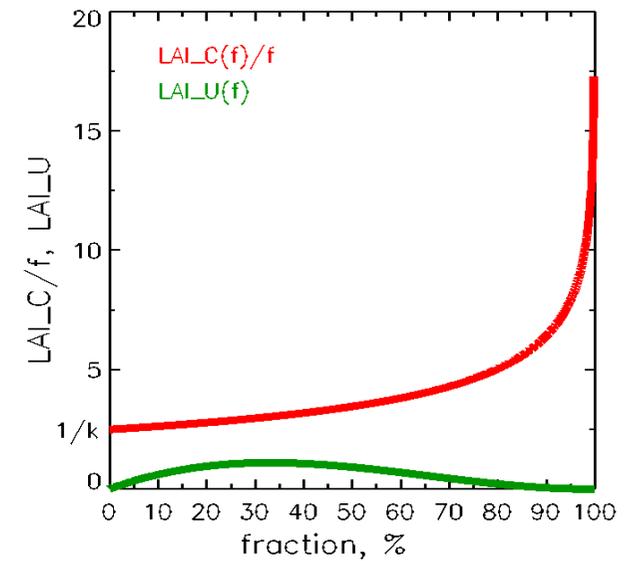
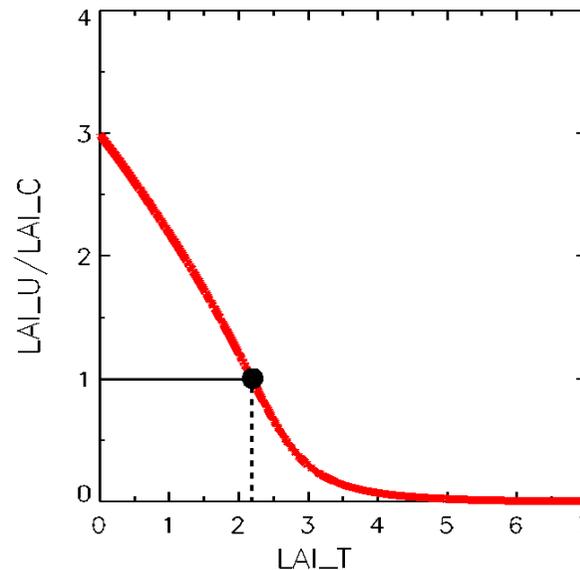
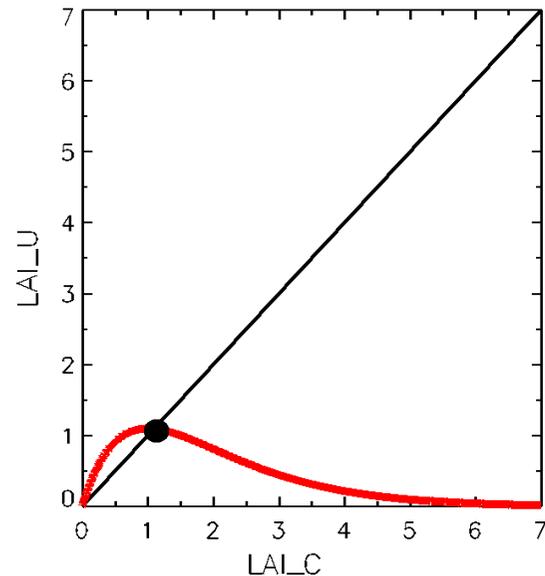
- Стандартное экспоненциальное соотношение использовано для моделирования соотношения  $LAI^C - f$
- При низких значениях  $LAI^T$   $LAI$  нижнего яруса пропорционален  $LAI^C$  (оба яруса нуждаются в условиях для роста). Однако при высоких значениях  $LAI^T$   $LAI$  нижнего яруса пропорционален  $(1-f)$  та верхний ярус начинает подавлять нижний, ограничивая пропускание солнечных лучей
- Настраиваемые параметры модели получают путем фиттинга модели к спутниковым данным. Отдельные наборы параметров были рассчитаны для DBL, ENL и DNL лесов.

$$LAI_C(f) = \ln(1-f)/k,$$

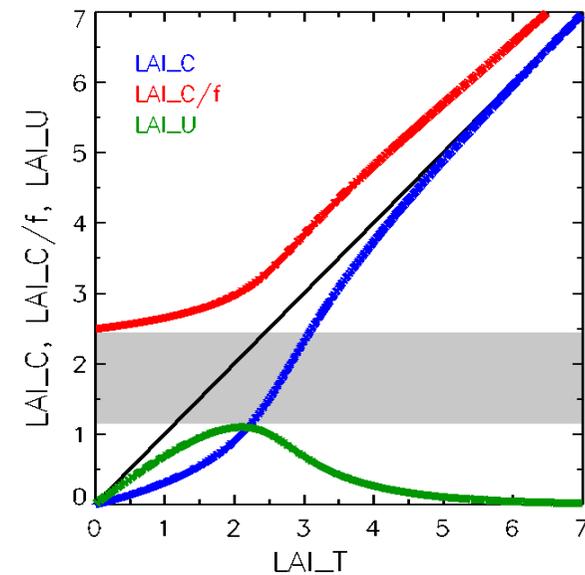
$$LAI_U(f) = \alpha * LAI_C(f) * [1-f]^\beta,$$

$$LAI_T(f) = LAI_C(f) + LAI_U(f).$$

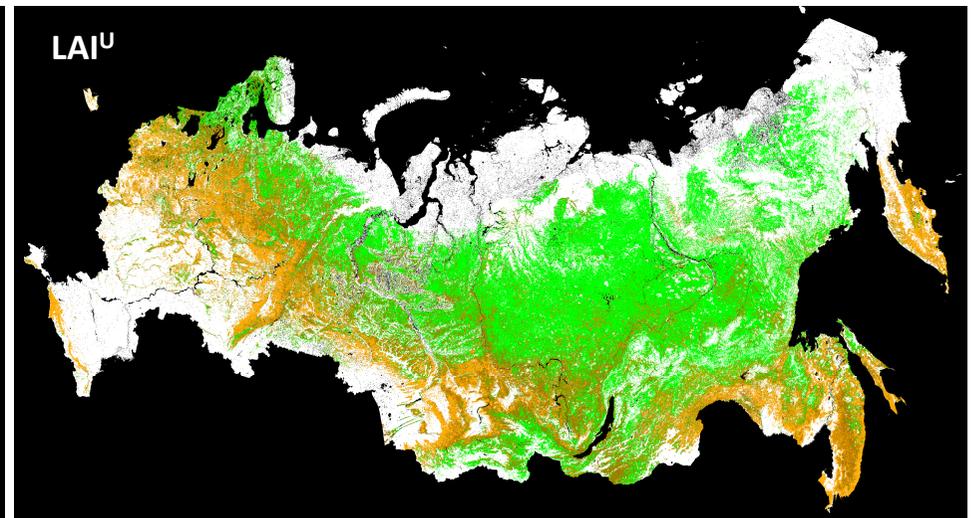
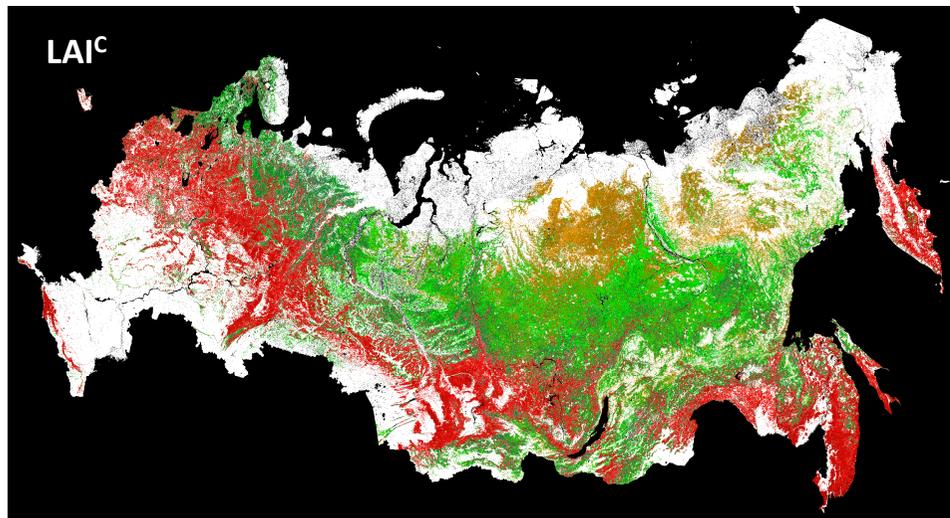
# Теоретическая оценка соотношения LAI ярусов



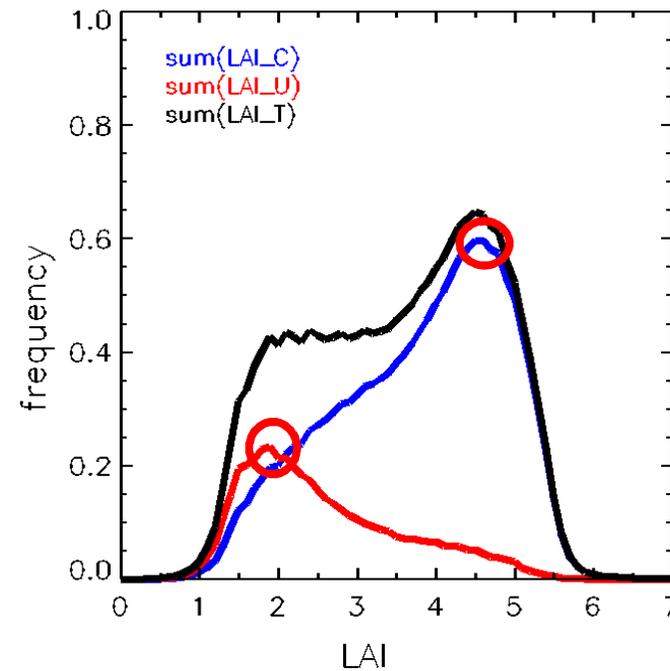
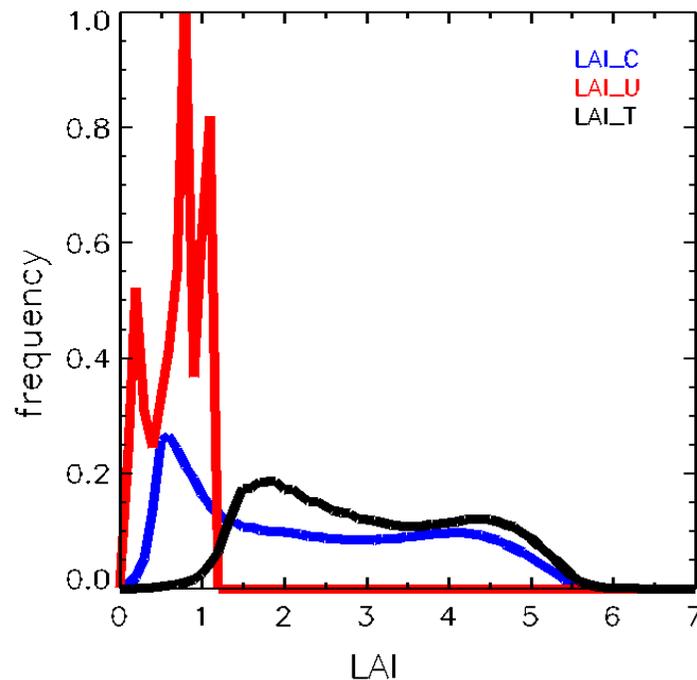
- При малом полном LAI листва в нижнем ярусе доминирует, при высоких значениях, листва в нижнем ярусе подавлена.
- Нижний ярус дает убывающий (с полным LAI) вклад. Оба яруса дают равный вклад при полном LAI 2.1
- Плотность листвы верхнего яруса возрастающая функция просветов, а для нижнего она достигает максимума при 75% доле просветов
- Динамические диапазоны плотности листвы верхнего и нижнего ярусов не пересекаются.



# Разделение LAI по ярусам $LAI^T = LAI^C + LAI^U$



## Распределение $LAI^T$ , $LAI^C$ и $LAI^U$

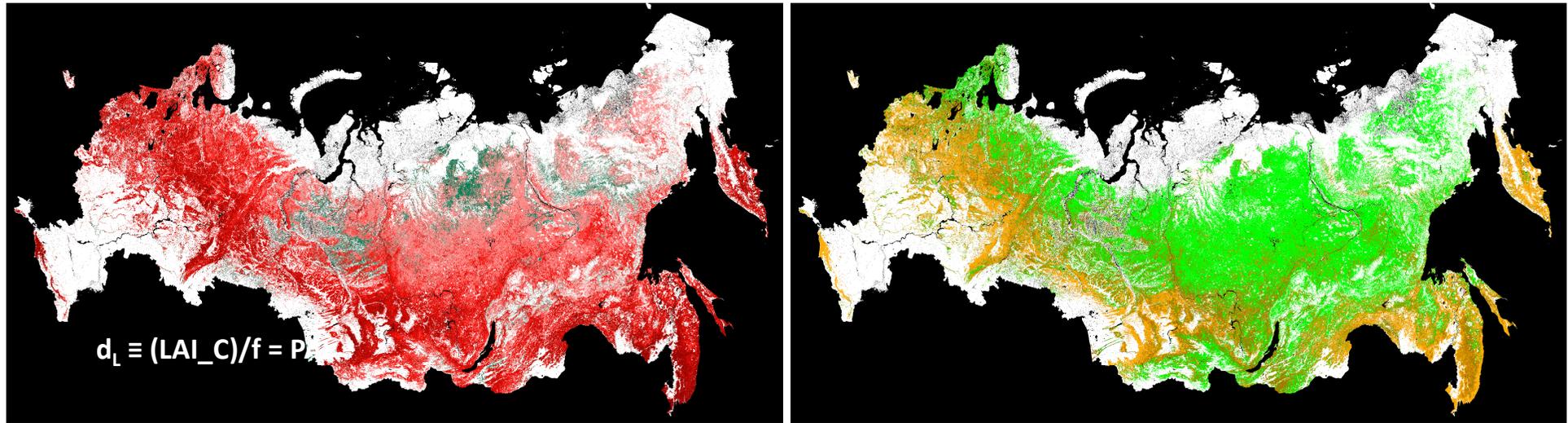


- Как распределение полного LAI леса распределяется между нижним и верхним ярусами?
- Стандартные гистограммы (гистограммы значений) показывают, что LAI верхнего яруса растягивается по направлению низких значений, в то время как распределение для нижнего яруса сконцентрировано в узком диапазоне малых значений (<1.1)
- Более удобно представление с помощью “аккумулятивных гистограмм”, где для каждого дискретного LAI суммируется не количество пикселей, а их значения. Это представление подчеркивает факт что нижний ярус в основном привносит низкие значения, а верхний ярус- высокие в гистограмму полного LAI

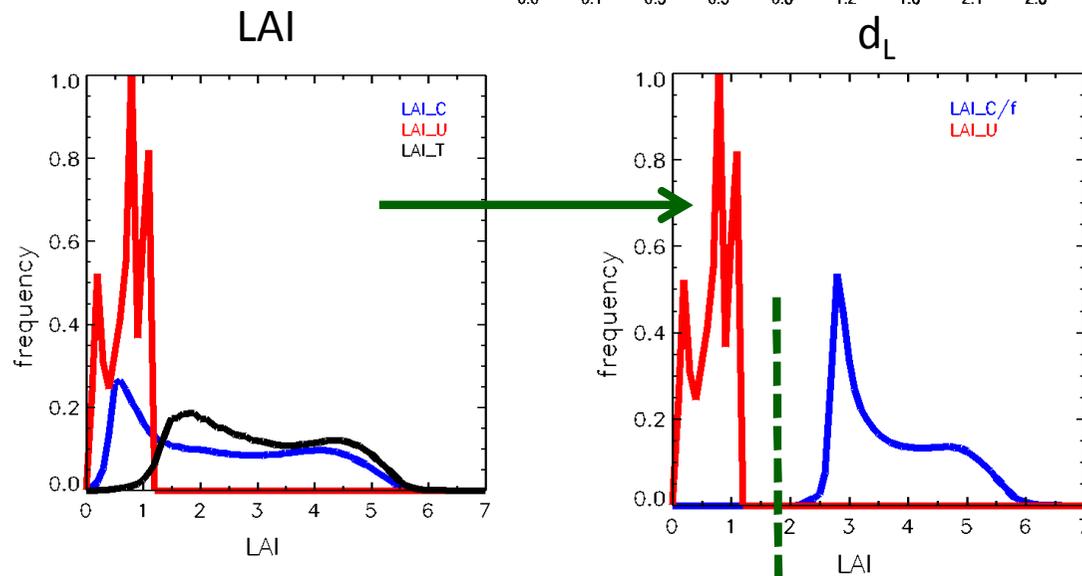
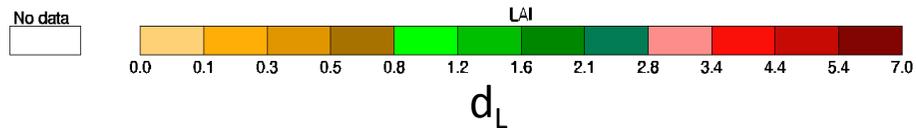
# Плотность листьев $d_L$ верхнего и нижнего ярусов

Верхний ярус

Нижний ярус



$$d_L \equiv (LAI_C)/f = P$$



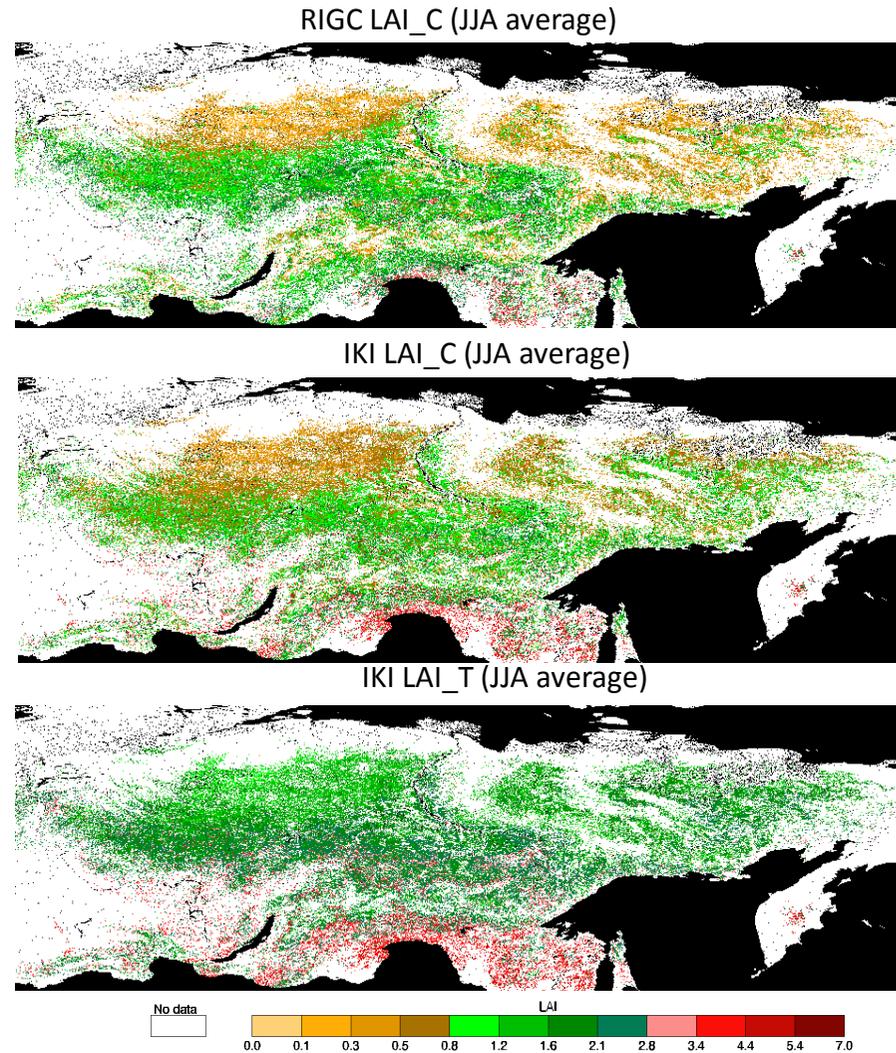
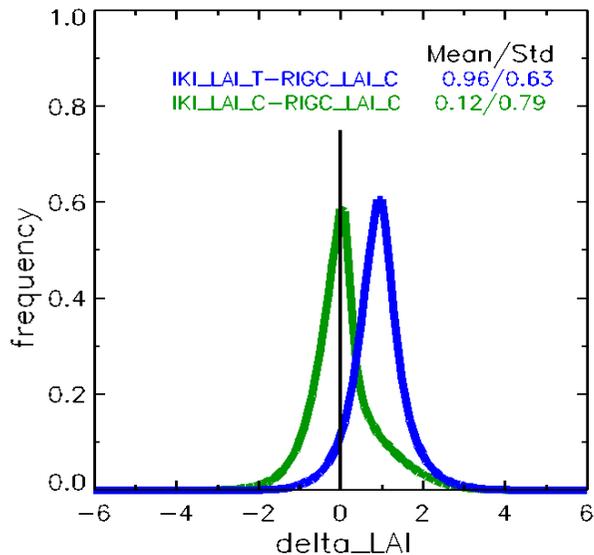
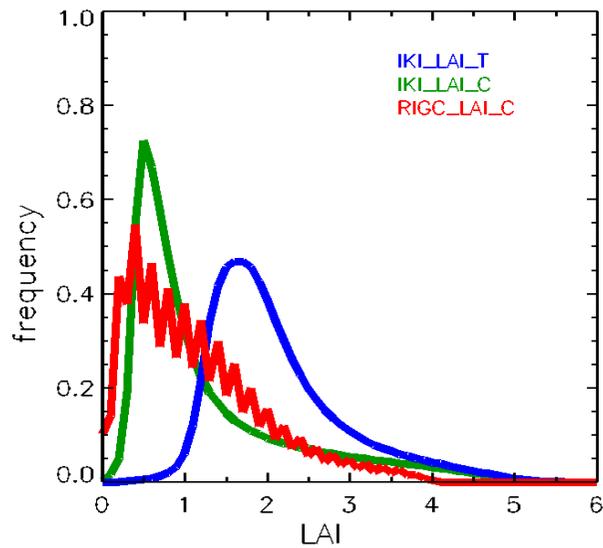
В отличие от гистограмм LAI, гистограммы плотности листьев  $d_L$  не пересекаются.  $d_L$  – это удобная переменная для разделения ярусов.

## Сводная таблица средних значений LAI и их сопоставление с литературными данными

LC classes	Asner LAI	Породы леса	Среднее LAI из литературы	Mean reference LAI <sup>C</sup>	JJA mean MODIS LAI <sup>T</sup> (LAI <sup>C</sup> )	JJA Mean MODIS crown fraction, %
DNL	2.5-5.5 (A)	Редкая лиственница	1.4 (U), 0.3-1.3-2.7 (O)	1.4	1.5 (0.6)	22
		Лиственница	2.0 (U), 1.5(H), 1.3 (S)		2.5 (1.6)	43
ENL	2.5-3.5 (A)	Сосна	2.4-3.2 (U), 1.8-2.0 (E), 1.1-1.3 (W), 2.0 (C)	2.0	3.2 (2.5)	64
		Ель	5.8-6.0 (U), 2.5-3.9 (E), 1.7 (W), 3.0 (C), 3,6(H)	3.5	3.5 (2.8)	69
		Пихта	----/----	----/----	4.1(3.5)	78
		Сибирский кедр	----/----	----/----	3.7 (3.1)	72
DBL	4.0-6.0 (A)	Дуб	3.3-4.5 (U), 1.9-5.1 (E), 4.5 (C)	3.7	4.2 (3.9)	83
		Бук	5.5-5.6 (U), 3.0-5.3 (E)	4.9	4.9 (4.8)	91
		Береза Каменная	----/----	----/----	4.4 (4.1)	87
		Береза	4.5-4.7 (U), 2.5(E)	3.6	4.0 (3.7)	82
		Осина	2.9-3.2 (U)	3.1	4.3 (4.1)	86
		Липа	3.8-4.1 (U)	4.0	4.7 (4.5)	89
		Клен	2.0-4.7(U)	3.4	4.9 (4.7)	91

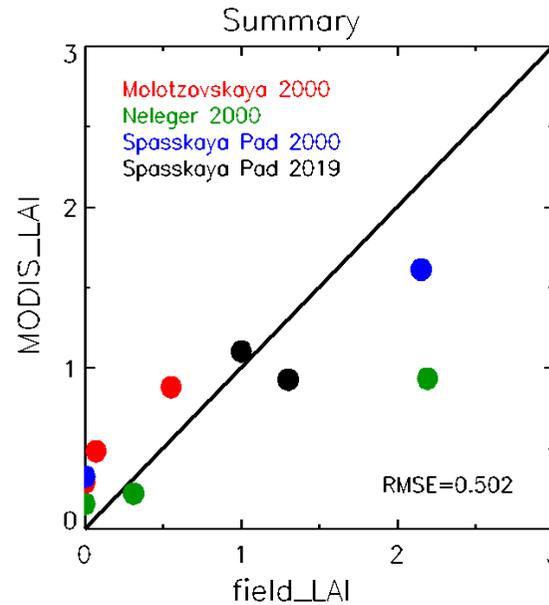
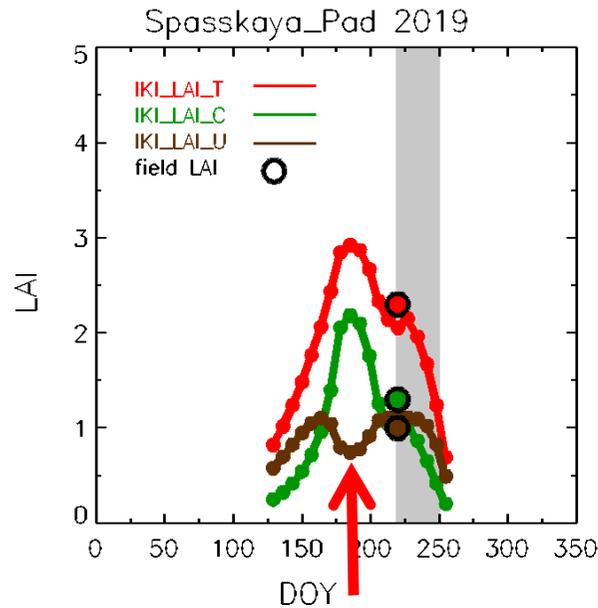
(A)- Asner et al. (2003), (C)- Cohen et al. (2006), (E)- Eriksson et al. (2006), (O)- Osawa et al. (2010), (S)- Shin et al. (2020), (U)- Utkin et al. (2008), (V)- Vigodskaya et al. (1997), (W)- Wang et al. (2004).

# Сравнение ИКИ и RIGGS LAI продуктов усредненных за вегетационный сезон 2010 г



Значения LAI<sup>C</sup> крон хорошо сопоставим между продуктами. Вклад LAI<sup>U</sup> нижнего яруса в полный LAI значителен для региона.

# Валидация IKI MODIS LAI с наземными измерениями по участкам вблизи г. Якутск

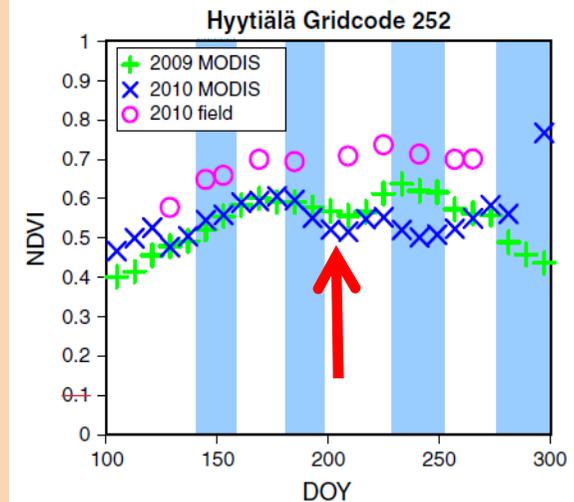
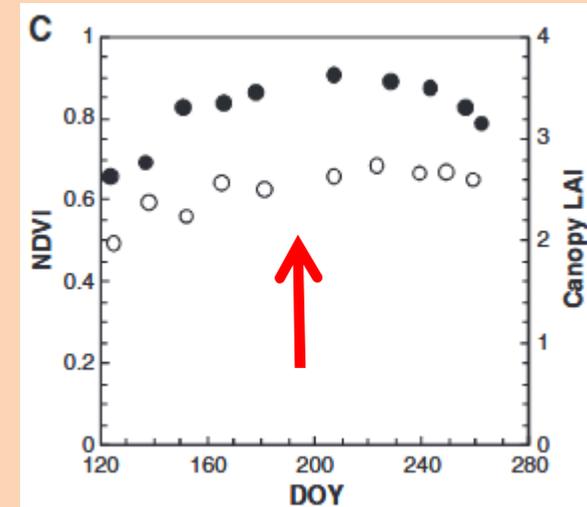


- Сопоставлены MODIS LAI<sup>C</sup> и LAI<sup>U</sup> соответствующими наземными данными по 3 участкам вблизи г. Якутск
- Вычисления сезонного профиля показали что алгоритм способен воспроизвести эффект “сезонный провал в нижнем ярусе”

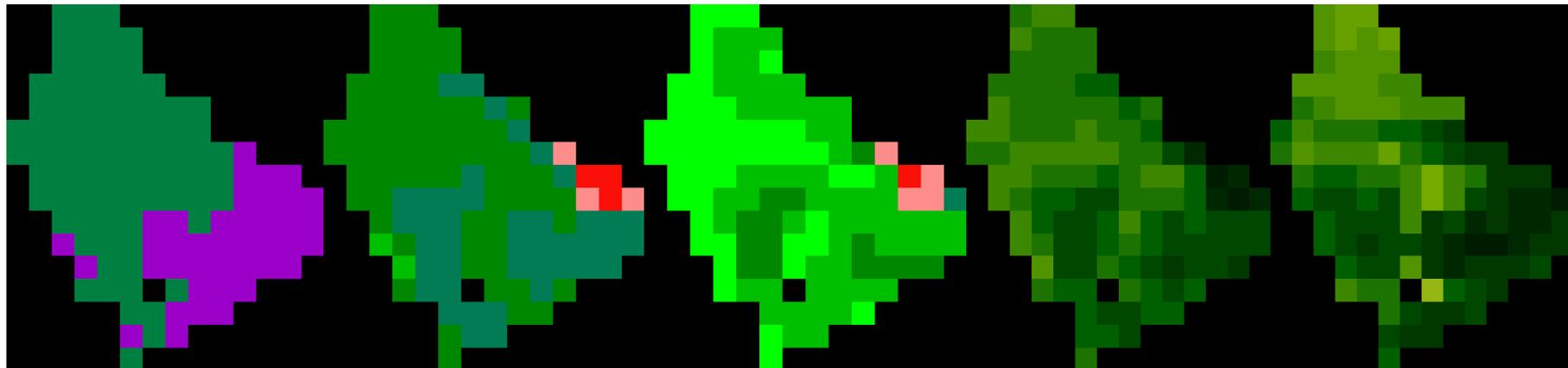
Справочная информация- данные по участкам хвойного леса в Финляндии (Pisek et al, 2012, Rautiainen et al., 2011)



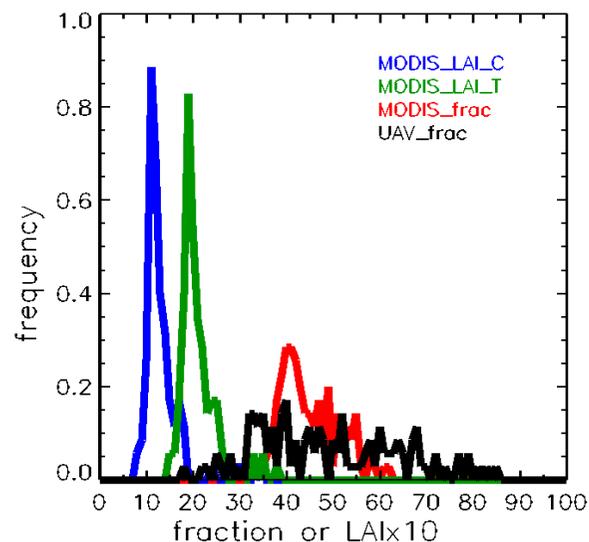
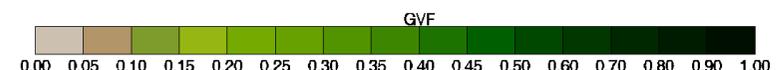
## Эффект “сезонный провал в нижнем ярусе”



# Валидация ИКИ MODIS проективное покрытие продукта с использованием беспилотных данных по участку на Кольском полуострове



MODIS LC: ENF, DBF    MODIS LAI<sup>T</sup>    MODIS LAI<sup>C</sup>    MODIS fraction    UAV fraction



Это участок с разреженным лесом где вклад нижнего яруса в полный LAI велик. Пространственные градиенты проективного покрытия крон сопоставимы между оценкой на основе MODIS продукта и беспилотными измерениями. Гистограммы тоже сопоставимы.

## Основные результаты

- Сформулирован полу-эмпирический алгоритм на основе принципов взаимодействия ярусов для разделения полного LAI леса на компоненты для нижнего и верхнего ярусов.
- Тестовая версия многоярусного LAI продукта по данным MODIS была рассчитана для лесов России за 2010 г.
- Проведена изначальная валидация продукта по разреженным лесам восточной Сибири и Кольского полуострова.



## Дальнейшая работа

- Продолжить валидацию продукта с новыми наземными измерениями
- Улучшить теоретическую базу в особенности для нижнего яруса
- Создать новую версию алгоритма на основе много-ярусной стохастической модели переноса (Li et al., 2020)

Li, X., Huang H., Shabanov, N.V., Chen, L., Yan, K., Shi, J. (2020). Extending the stochastic radiative transfer theory to simulate BRF over forests with heterogeneous distribution of damaged foliage inside of tree crowns. *Remote Sensing of Environment*, 250, 112040.