

# Вегетационные индексы- принципы построения и приложения

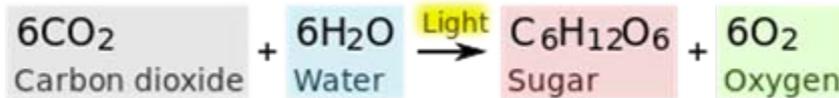
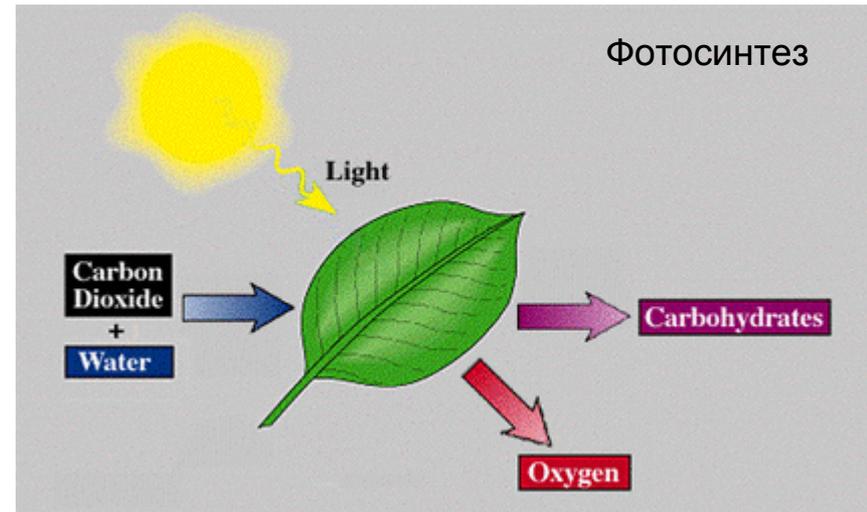
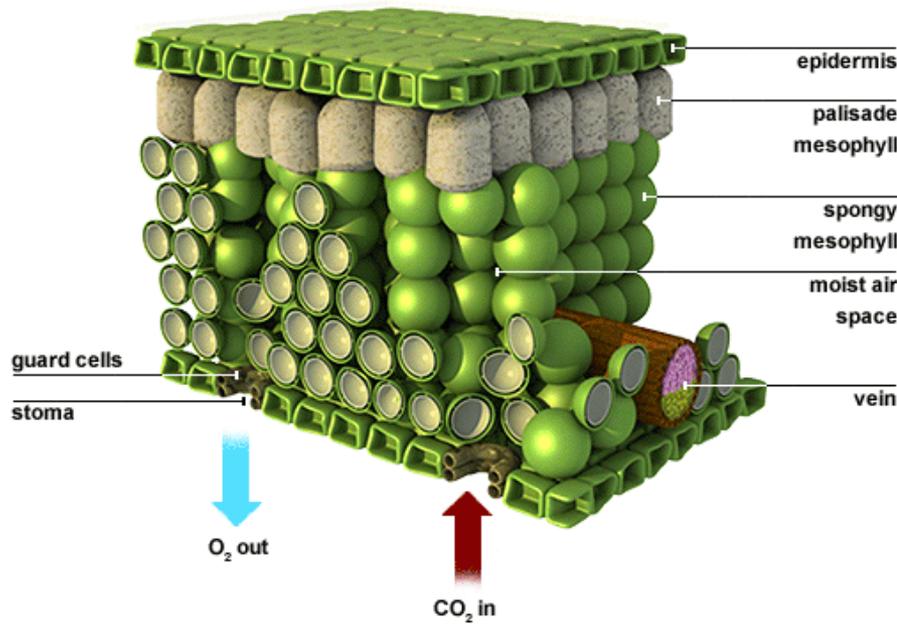
Н.В. Шабанов

СПД33-2017  
Школа Молодых Ученых  
Москва, ИКИ РАН  
13 ноября 2017 г.

- 1. Базовые сведения о вегетационных индексах**
- 2. Некоторые известные мировые исследования**
- 3. Разработки ИКИ**

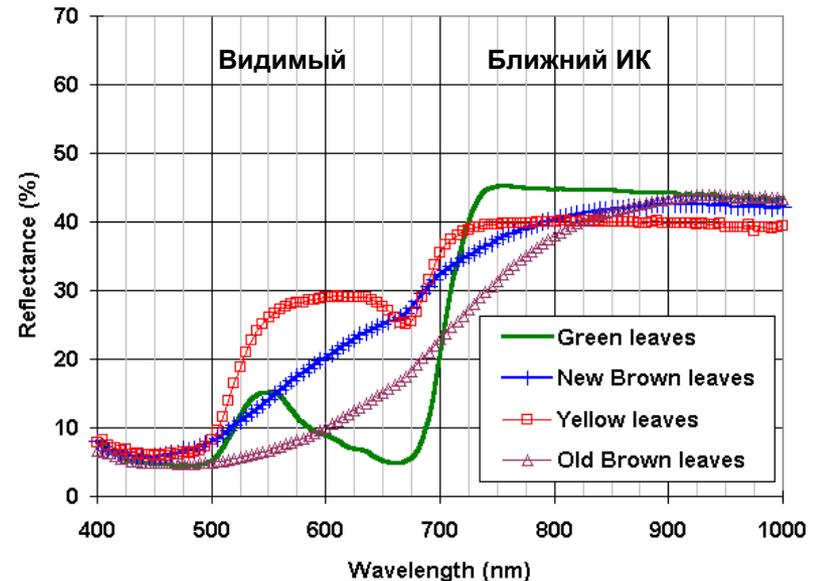
- 1. Базовые сведения о вегетационных индексах**
2. Некоторые известные мировые исследования
3. Разработки ИКИ

# Взаимодействие солнечного излучения с листом

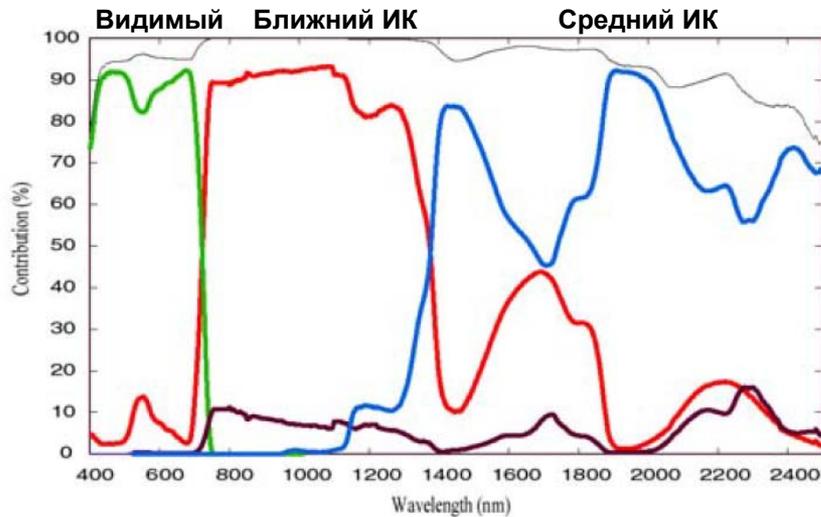


В процессе фотосинтеза пигменты листа (хлорофилл) поглощают солнечную энергию в красном и синем диапазоне спектра. В ИК диапазоне лист в основном рассеивает солнечную энергию.

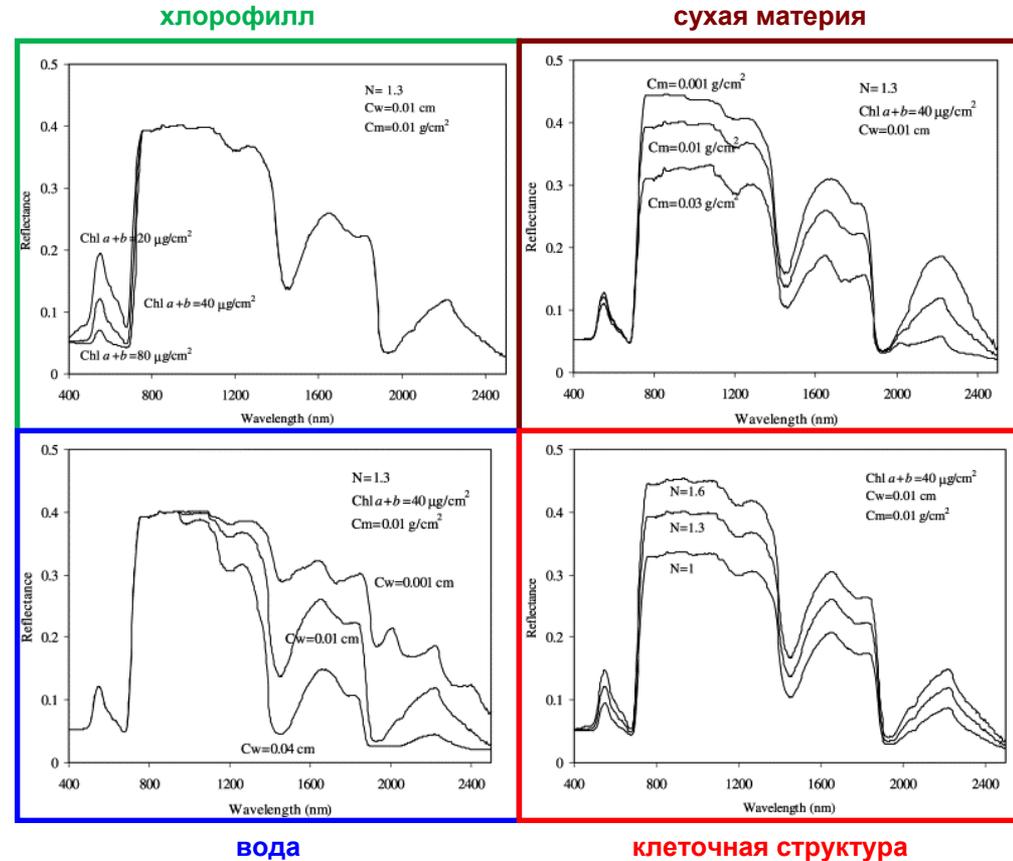
Reflectance of Red Oak Leaf Samples  
Adaxial (Top) Surface; Measured October 15, 1997



# Влияние биохимических компонент на коэффициент пропускания солнечного излучения листом

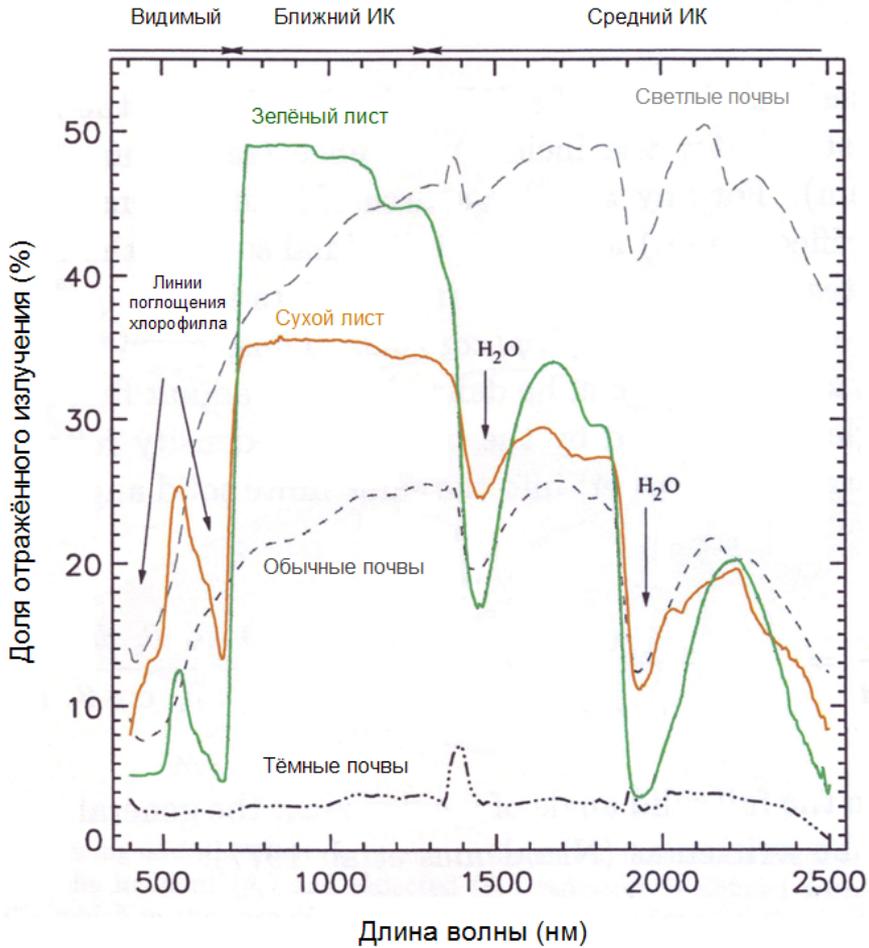


Вклад содержания хлорофилла  $C_{ab}$  (зеленый), эквивалента толщины воды  $C_w$  (синий), сухой материи  $C_m$  (коричневый) клеточной структуры  $N$  (красный) в коэффициент отражения листа. Расчет произведен по модели PROSPECT.



При построении вегетационных индексов используются каналы в видимом диапазоне (чувствительность к хлорофиллу) и ближнем ИК (сухой материя и структура). Вегетационные индексы строятся на контрасте видимого и БИК диапазонов- который пропорционален плотности фотосинтезирующего покрова

# От листа к ландшафту



Структура растительного покрова



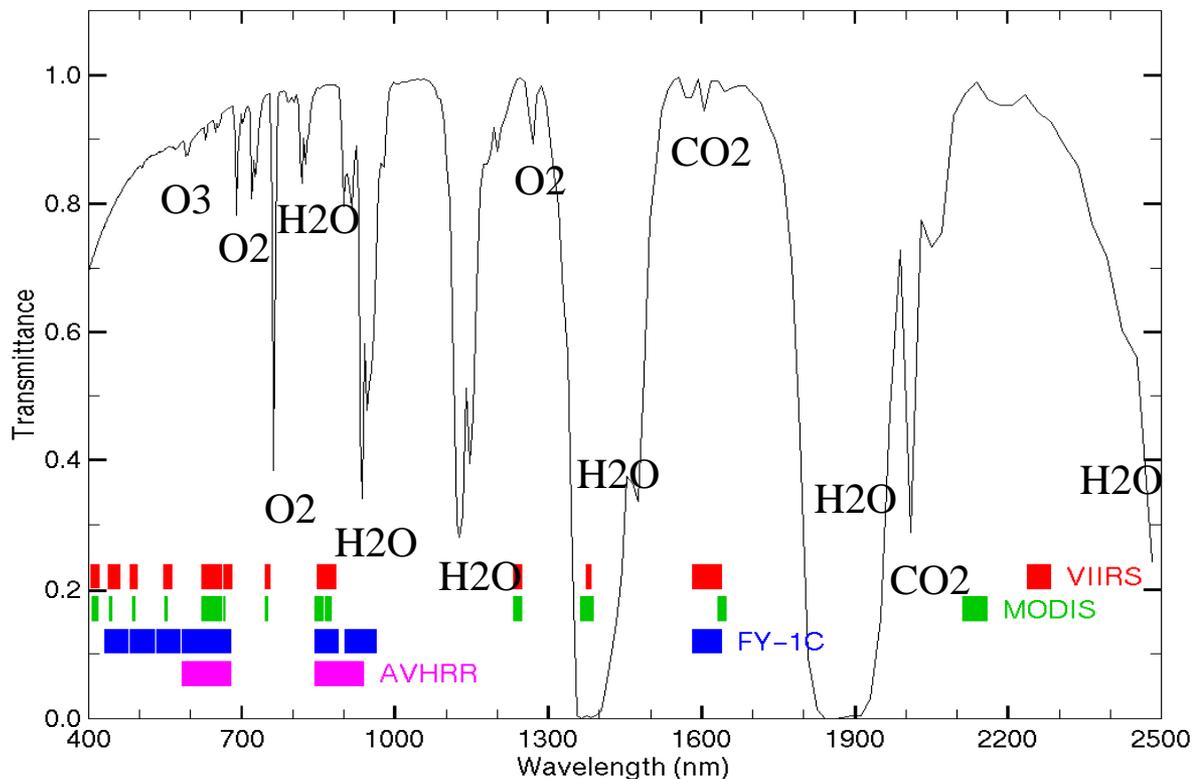
Оптические свойства листа  
+  
Оптические свойства почвы

скейлинг

(например, посредством УП) →

Оптические свойства  
ландшафта (КСЯ)

# Долговременный мониторинг глобального растительного покрова с использованием приборов AVHRR, MODIS и VIIRS



Murphy & Reed, 2009, 4th Global Vegetation Workshop

Глобальные исследования:  
AVHRR- с 1980 г., 1.1 км, без атмосферной коррекции  
MODIS- с 2000 г., 250+м, с атмосферной коррекцией  
VIIRS- с 2013 г., 375+м, с атмосферной коррекцией

Региональные исследования:

ETM (с 1972 г., 30 м, 2-4 недели), Sentinel (с 2015 г, 1 м, 10 дней), PROBA-V (с 2013 г., 100 м, 5 дней) и пр.

На основе временных рядов измерений приборов AVHRR-MODIS-VIIRS в NASA/NOAA предпринята попытка создания архивов данных- Environmental (Climate) Data Records (EDR/CDR) для многолетнего мониторинга изменений климата. NDVI/EVI являются EDR. Ввиду разности спектральных каналов, пространственного разрешения, ограниченной точности старых измерений- задача является крайне сложной.

# Определение вегетационного индекса

**Вегетационным индексом** называется комбинация спектральных каналов с целью усиления сигнала от растительности.

По физическому смыслу- это комбинированная характеристика плотности растительного покрова, а также содержания в нем хлорофилла.

Требования к идеальному вегетационному индексу

- **Наиболее чувствителен** к растительному покрову
- **Нечувствителен** к яркости и цвету почвы
- **Минимально подвержен** атмосферным эффектам, геометрии солнечного облучения и сенсора

Любой вегетационный индекс как и сами спектральные данные является **радиометрической** величиной – прокси **биофизического** параметра. Биофизическим параметром определяющим плотность растительного покрова является Leaf Area Index (LAI)- индекс листовой поверхности- суммарная площадь односторонней поверхности листов на единицу площади поверхности.

Путем оптимизации выражений для вегетационных индексов можно изменить чувствительность к растительности и почве. Однако эффект атмосферы и геометрии как правило корректируется путем пред-обработки канальных данных (атмосферная коррекция, нормализация к стандартной геометрии, фильтрация облаков).

# Наиболее распространённые вегетационные индексы

## Самый простой индекс- сами каналные данные

1) Simple Ratio:

$$SR = \frac{\rho(\text{NIR})}{\rho(\text{Red})}$$

2) Normalized Difference Vegetation Index:

$$NDVI = \frac{\rho(\text{NIR}) - \rho(\text{Red})}{\rho(\text{NIR}) + \rho(\text{Red})}$$

3) Perpendicular Vegetation Index  
(минимизация влияния почвы):

$$PVI = \rho(\text{NIR}) \cos(\alpha) - \rho(\text{Red}) \sin(\alpha) - b \cos(\alpha)$$

при условии что линия почв определена как

$$\rho(\text{NIR}) = \text{tg}(\alpha)\rho(\text{Red}) + b$$

Существует несколько сотен вегетационных индексов (см. обзор \*), адаптированных к конкретным задачам. Используются не только спектральный но и временной потенциал каналных данных ДЗЗ.

4) Soil Adjusted Vegetation Index (минимизация влияния почвы):

$$SAVI = (1 + L) \frac{\rho(\text{NIR}) - \rho(\text{Red})}{\rho(\text{NIR}) + \rho(\text{Red}) + L}$$

$$L=0.5$$

5) Enhanced Vegetation Index (минимизация влияния почвы и аэрозолей):

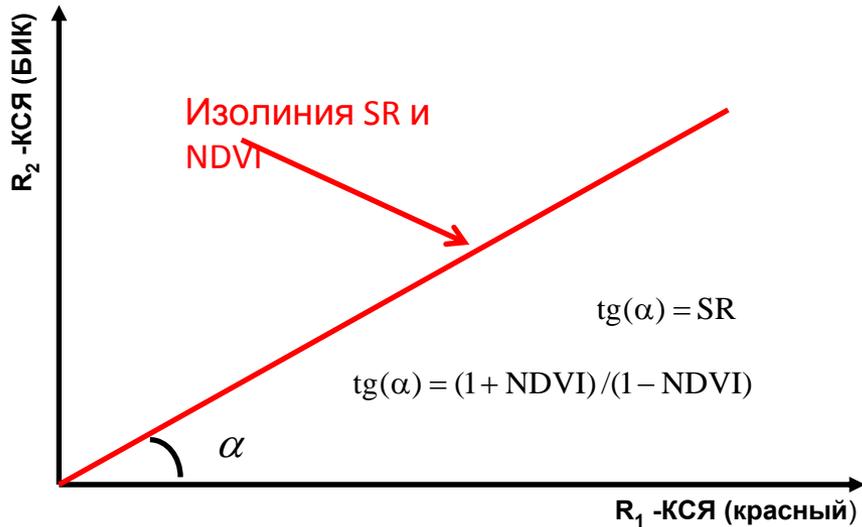
$$EVI = (1 + L) \frac{\rho(\text{NIR}) - \rho(\text{Red})}{\rho(\text{NIR}) + C_1\rho(\text{Red}) - C_2\rho(\text{Blue}) + L}$$

$$L=1, C_1=6, C_2=7.5 \quad (\text{для MODIS})$$

Идеальный вегетационный индекс- LAI (Leaf Area Index)

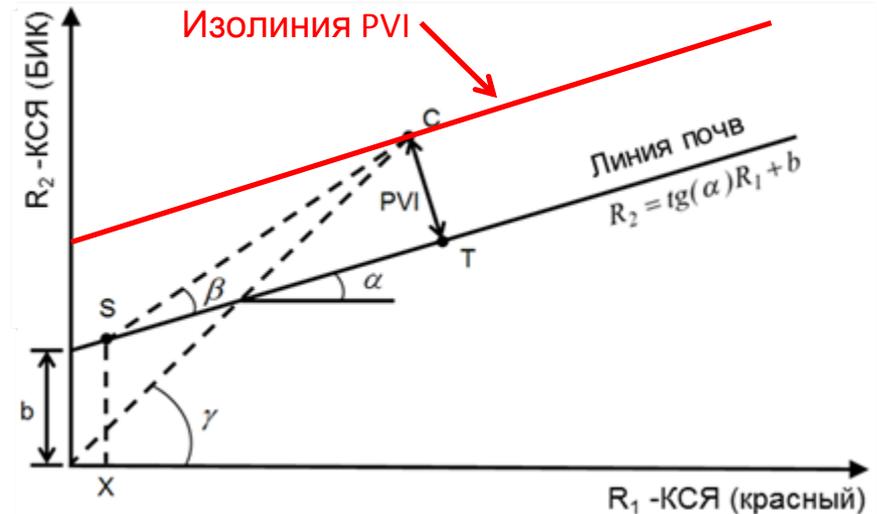
\*Bannari et al. (1995). A review of vegetation indices. Remote Sensing Reviews, 13, 95-120.

# SR, NDVI и PVI



$$\text{SR} = \frac{\rho(\text{NIR})}{\rho(\text{Red})}$$

$$\text{NDVI} = \frac{\rho(\text{NIR}) - \rho(\text{Red})}{\rho(\text{NIR}) + \rho(\text{Red})}$$



$$PVI = \rho(\text{NIR}) \cos(\alpha) - \rho(\text{Red}) \sin(\alpha) - b \cos(\alpha)$$

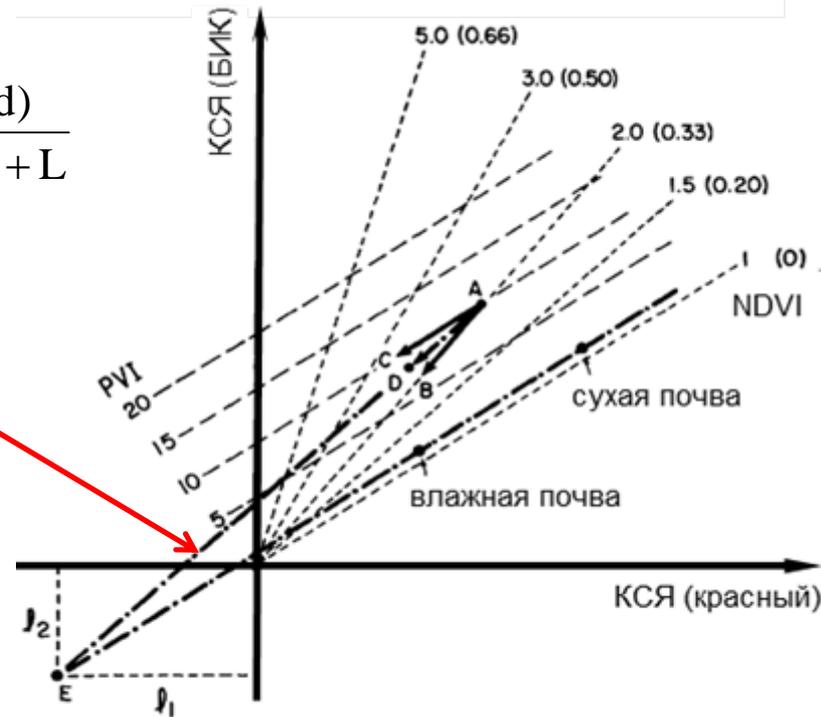
- Изолиниями вегетационного индекса называются кривые в спектральном пространстве, вдоль которых индекс не меняет своей величины. Система изолиний показывает профиль изменения индекса в пространстве измерений (каналов)
- Линия почв- это прямая в красном-БИК пространстве вдоль которой меняется яркость (КСЯ) почв.

- Индексы SR или NDVI определены как отношения КСЯ в красном и БИК каналах. Следовательно изолинии- это лучи из начала координат, тангенс угла наклона которого задан самим индексом. Нормализация в NDVI произведена с целью облегчить задачу сравнение разновременных измерений. Также уменьшает влияние атмосферы и геометрии измерений
- Индекс PVI определен как расстояние от линии почв. Следовательно изолинии PVI- это линии параллельные линии почв.

# SAVI

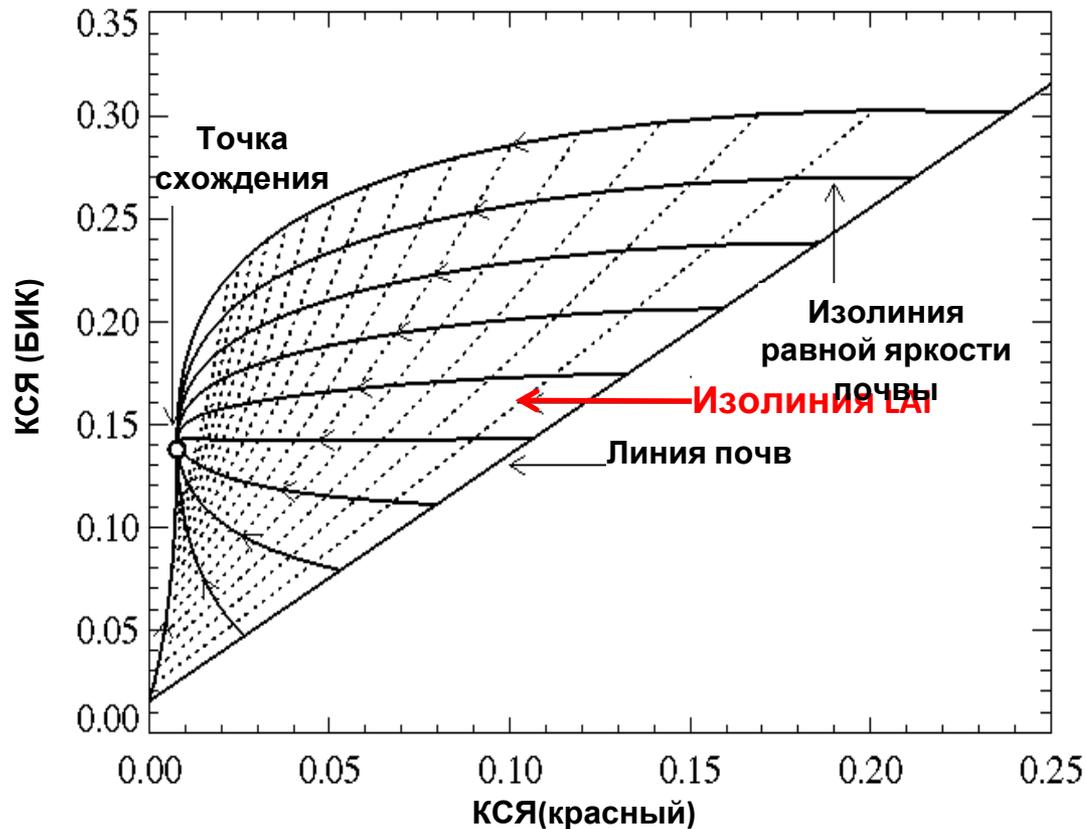
$$SAVI = (1+L) \frac{\rho(NIR) - \rho(Red)}{\rho(NIR) + \rho(Red) + L}$$

Изолиния SAVI



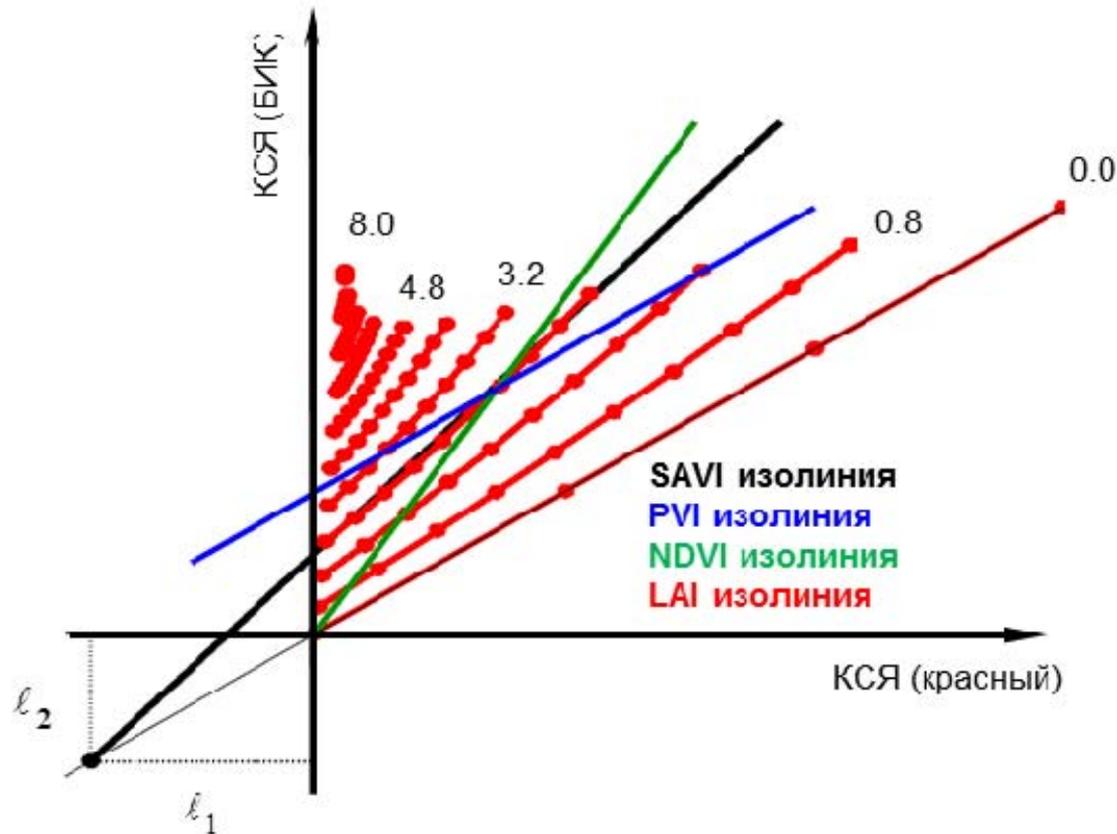
- SAVI был разработан как индекс минимизирующий влияние почвы
- В лабораторных условиях проведен эксперимент по изучению влияния отражательной способности почвы на КСЯ системы “почва+растительность”
- Изначально система в точке (A). При увлажнении почвы система движется как не по изолинии NDVI так и не по изолинии PVI.
- Смоделировать движение системы можно путем изменения начала координат (L1,L2). Эффективно это эквивалент добавлению L в знаменатель NDVI. Для сохранения нормы числитель домножается на (1+L).

# LAI



- Спектральная отражательная способность (КСЯ в красном и БИК каналах) как функция LAI моделируется на основе Уравнения Переноса для системы “почва + растительность”
- При отсутствии растительности ( $LAI=0$ ) КСЯ системы соответствует линии почвы
- При увеличении LAI КСЯ изменяется нелинейно и сходится к предельной точке. В этом случае КСЯ не чувствительны к оптическим свойствам почвы

# Возможности вегетационных индексов по аппроксимации LAI



- Изолинии базовых вегетационных индексов (PVI и NDVI) сильно отклоняются от изолиний LAI.
- В случае PVI например не учтено что общий сигнал является нелинейной комбинацией сигналов от растительности и почвы- линейное расстояние от линии почв не воспроизводит увеличение LAI
- SAVI имеет наилучшие возможности аппроксимации LAI, однако для этого нужно настраивать параметры  $L_1$  и  $L_2$  для каждой изолинии LAI. На практике используется единственное эффективное значение.

# Основные направления использования вегетационных индексов

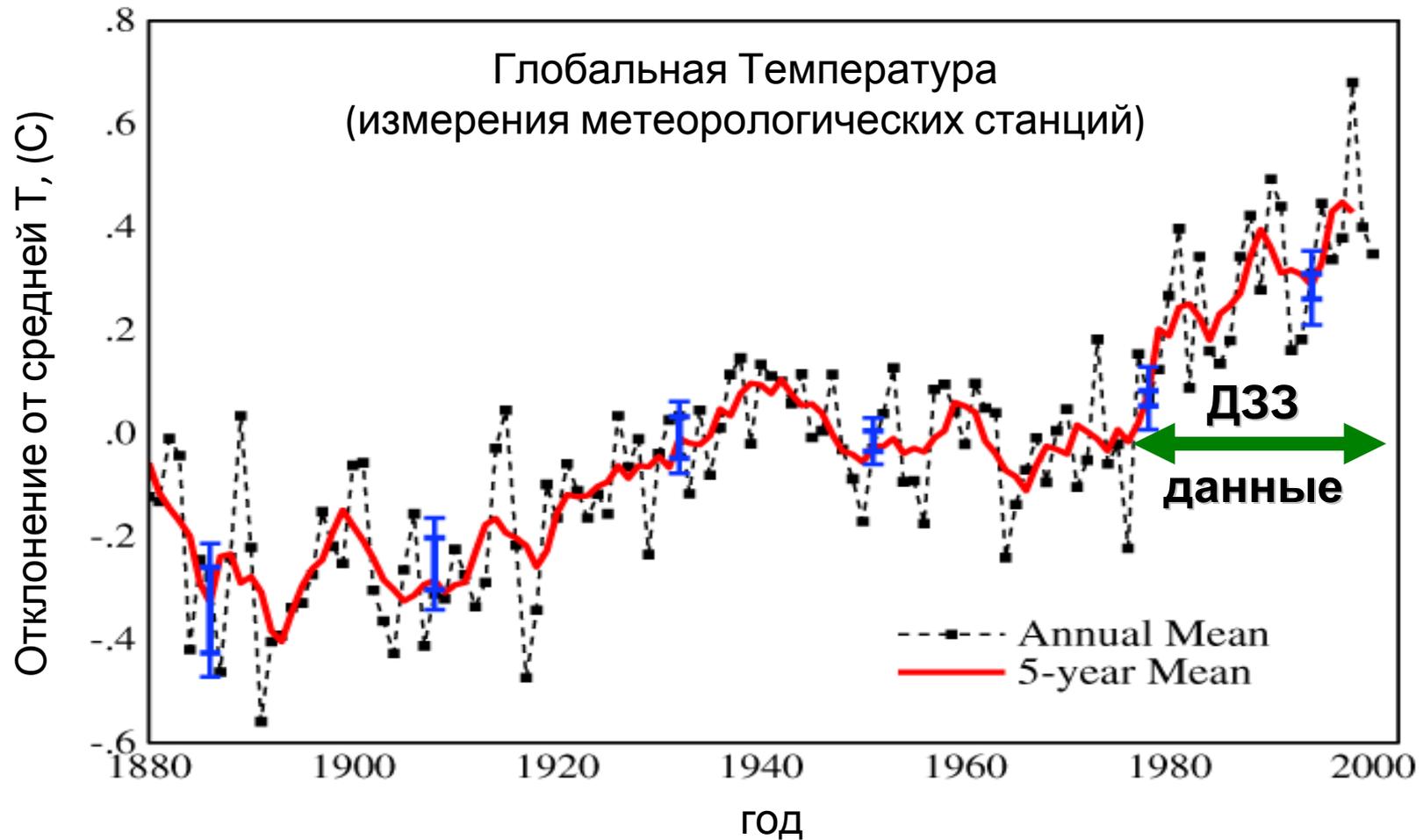
1) Напрямую (после статистической обработки)- мониторинг растительного покрова- с\х угодий, лесов и пр.  
В частности- мониторинг урожайности и засухи, изменение типа растительного покрова, его деградации и т.д.

2) Расчет биофизических параметров на основе корреляции с вегетационными индексами- LAI, FPAR, содержания хлорофилла, GPP, биомассы, типа растительности, проективного покрытия.

3) Ассимиляция в различных локальных, региональных и глобальных моделях- для прогнозирования погоды, моделирования климата, биогеохимических моделях.

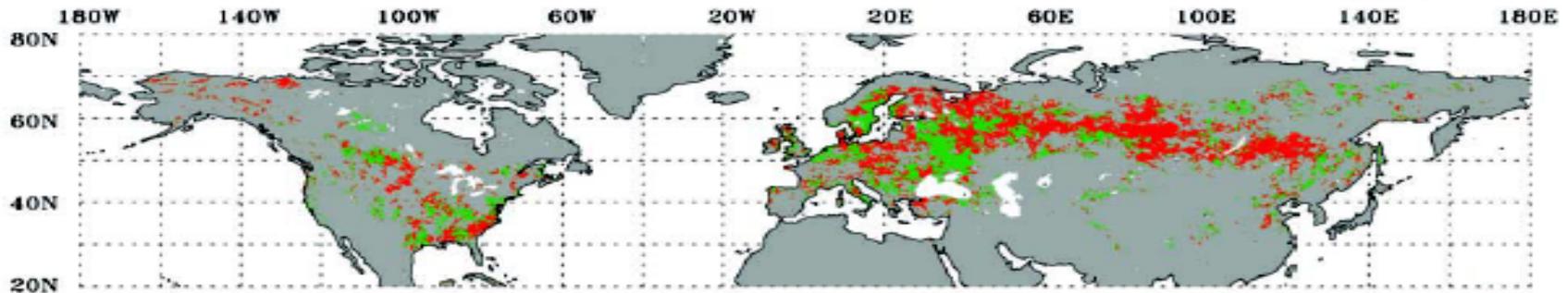
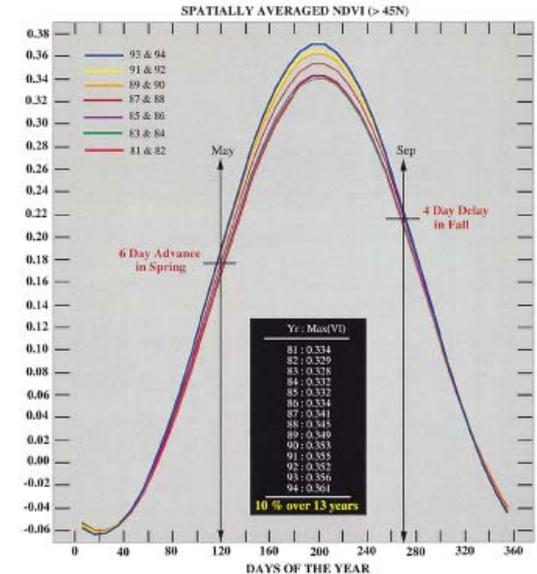
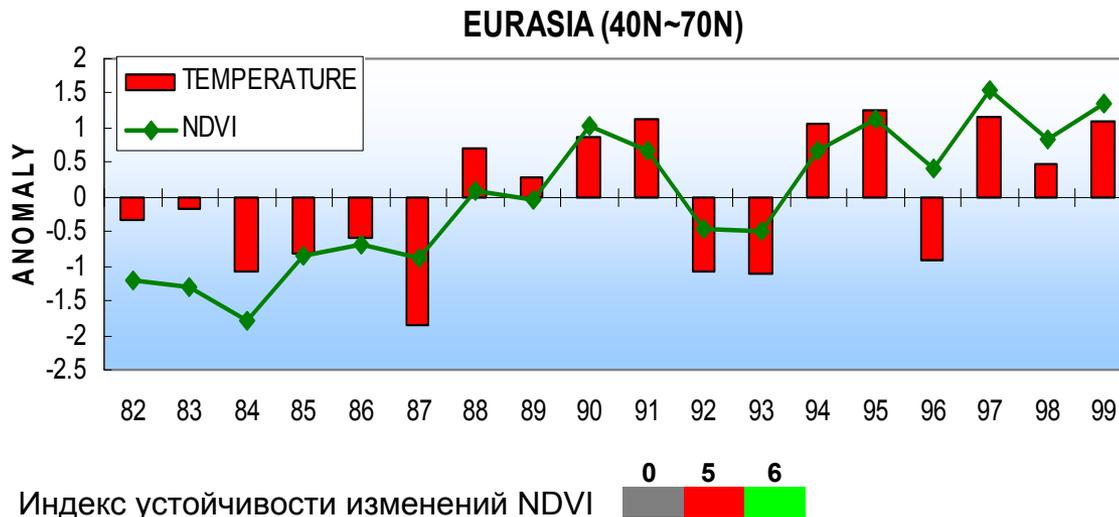
1. Базовые сведения о вегетационных индексах
- 2. Некоторые известные мировые исследования**
3. Разработки ИКИ

# “Зеленый тренд” северных широт



Одним из основных индикаторов изменения климата является изменения глобальной температуры.

# “Зеленый тренд” северных широт (продолжение)



- Анализ временных рядов AVHRR NDVI за 1981-2001 гг.
- В северных широтах- Сев. Америке и Евразии обнаружен NDVI тренд- как пикового за сезон значения так и продолжительности вегетационного периода
- Тренд NDVI коррелирует с трендом температуры.

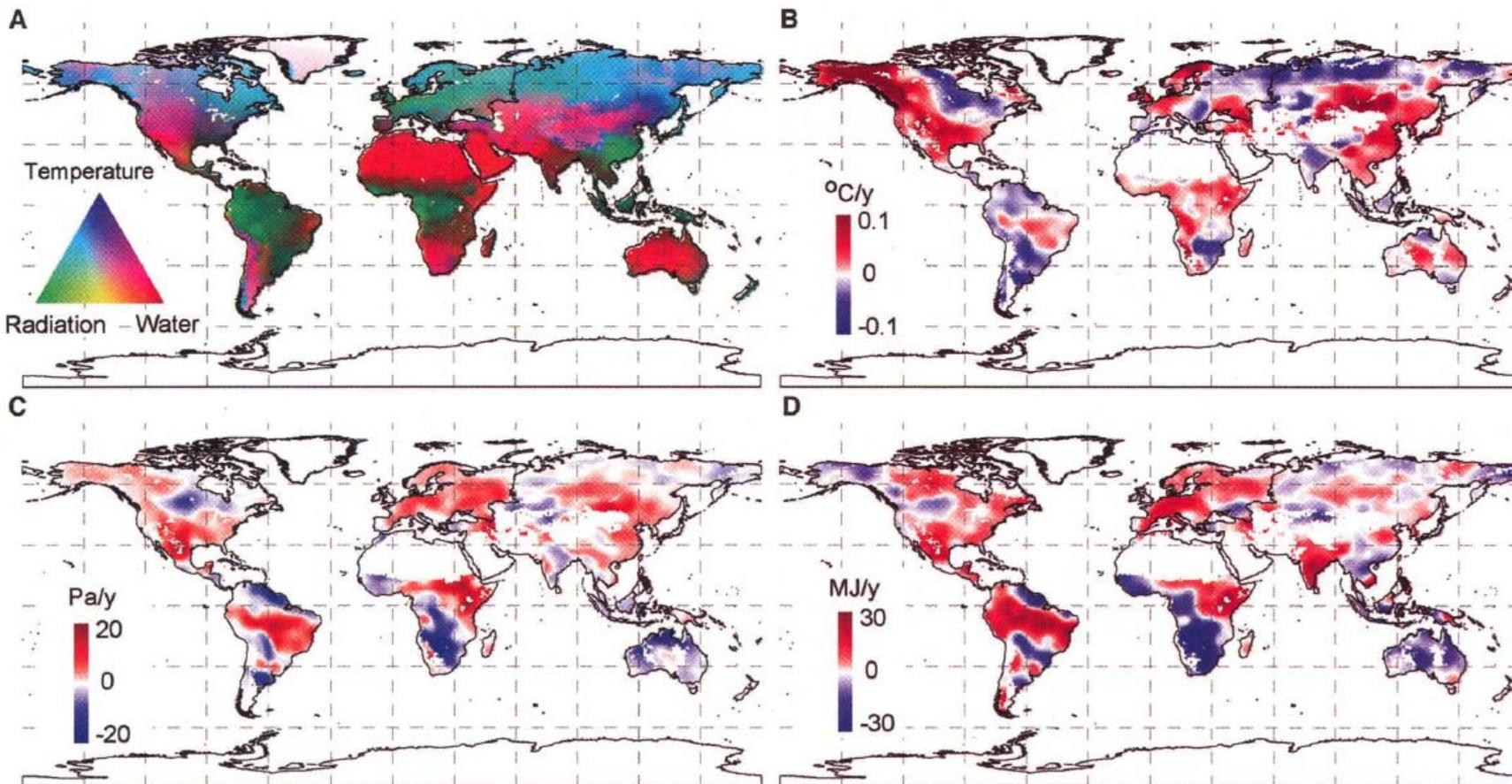
Myneni et al, (1991) Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991. Nature, 386, 698-702.

Zhou et al., (2001) Variations in northern vegetation activity inferred from satellite data of vegetation index during 1981 to 1999, JGR, 106(D17), 2069-2083

# “Зеленый тренд” северных широт (продолжение)

Климатические ограничения на рост растительности

Годовой тренд аномалий температуры за 1982-1999 г.



Годовой тренд дефицита давления водяного пара за 1982-1999 г.

Годовой тренд солнечной радиации за 1982-1999 г.

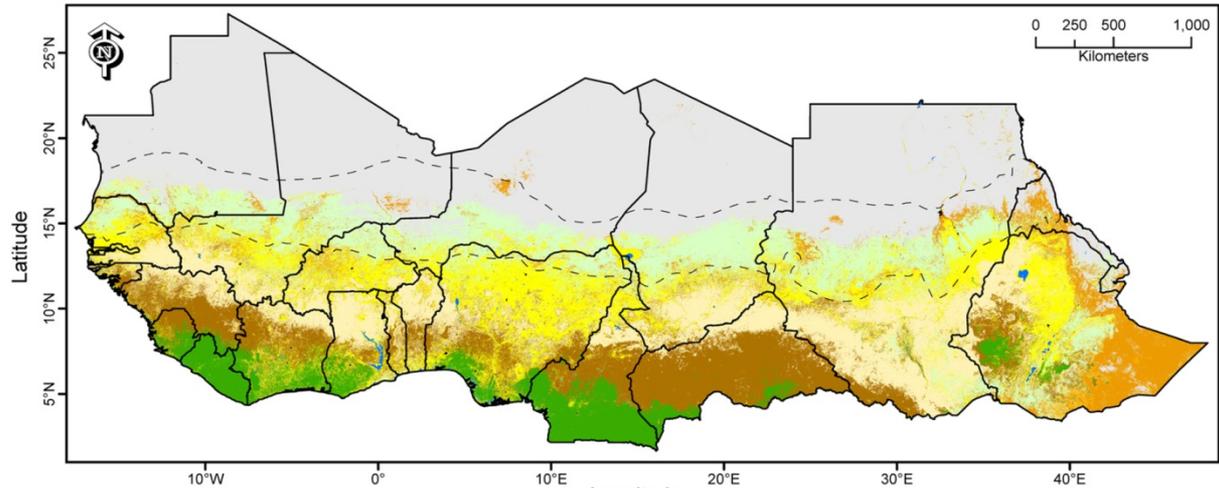
Наблюдаемые изменения климата были в основном в направлении ослабления климатических ограничений на рост растительности. Наблюдаемые тренды NDVI указывают на то, что рост растительности последовал этим изменениям климата.

Nemani et al, (2003) Climate-driven increase in the global terrestrial net primary production from 1982 to 1999, SCIENCE, 300, 1560-1563

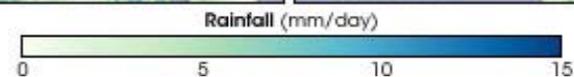
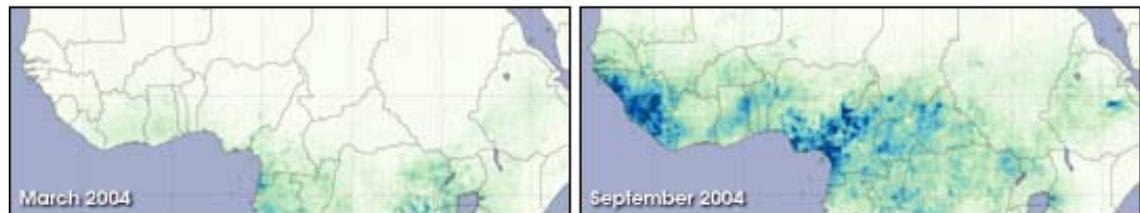
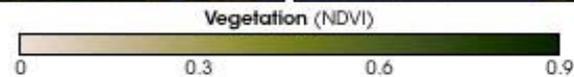
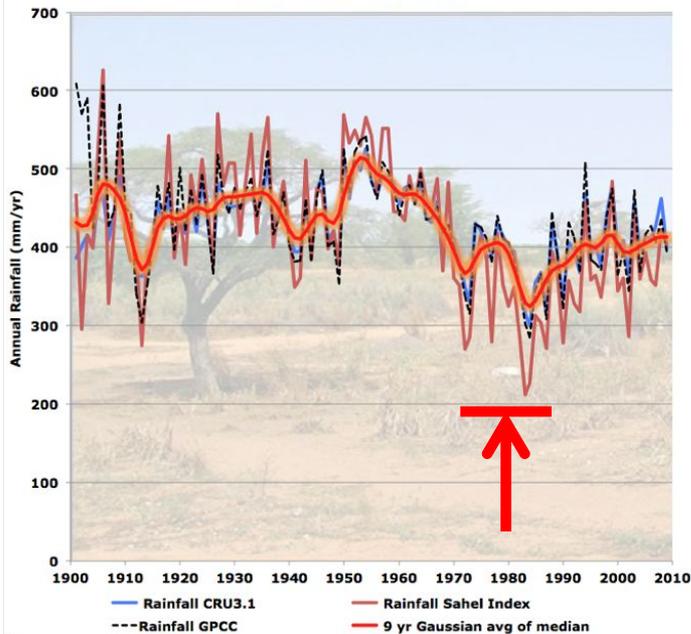
# Изменение границ полу-пустыни Сахель под влиянием засухи

Сахель называют “зеленой стеной” пустыни Сахара- т.к. она является преградой распространения песков на континенте Африка.

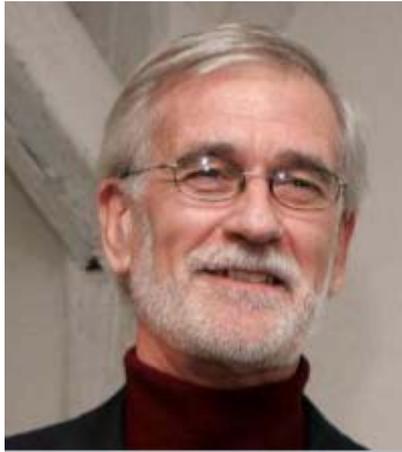
В 1970-90-х годах наблюдался продолжительный период сильнейшей засухи, который вызвал опасения о масштабном расширении Сахары.



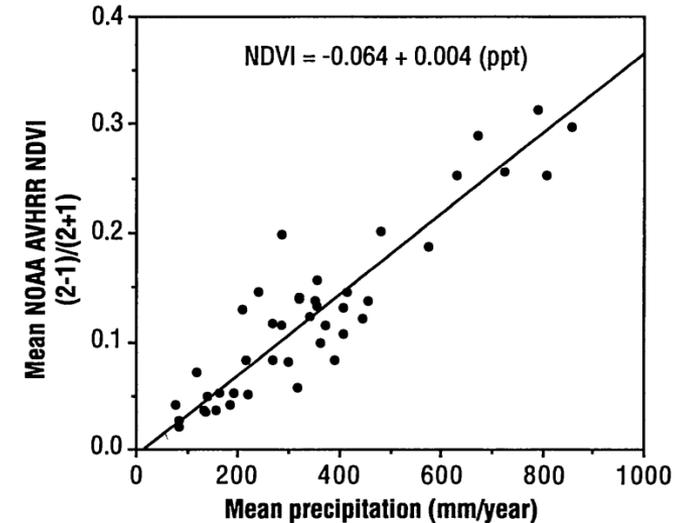
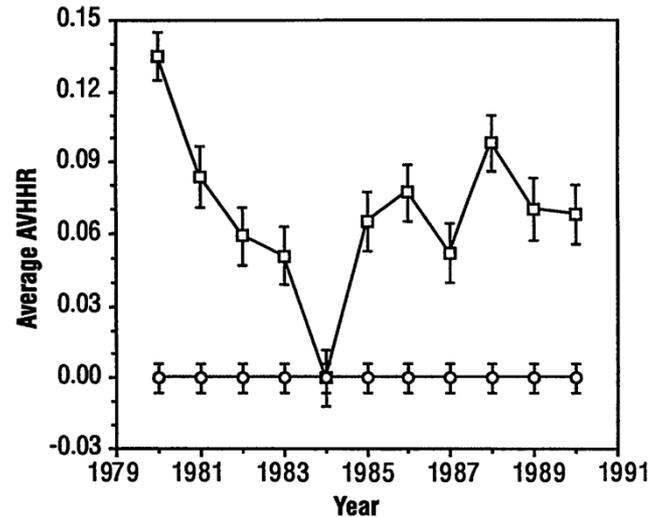
Sahel Rainfall, 1901 – 2009



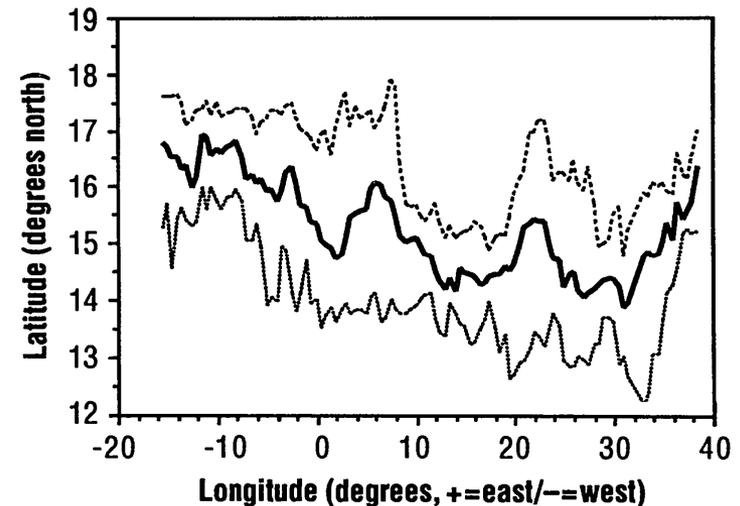
# Изменение границ полу-пустыни Сахель под влиянием засухи (продолжение)



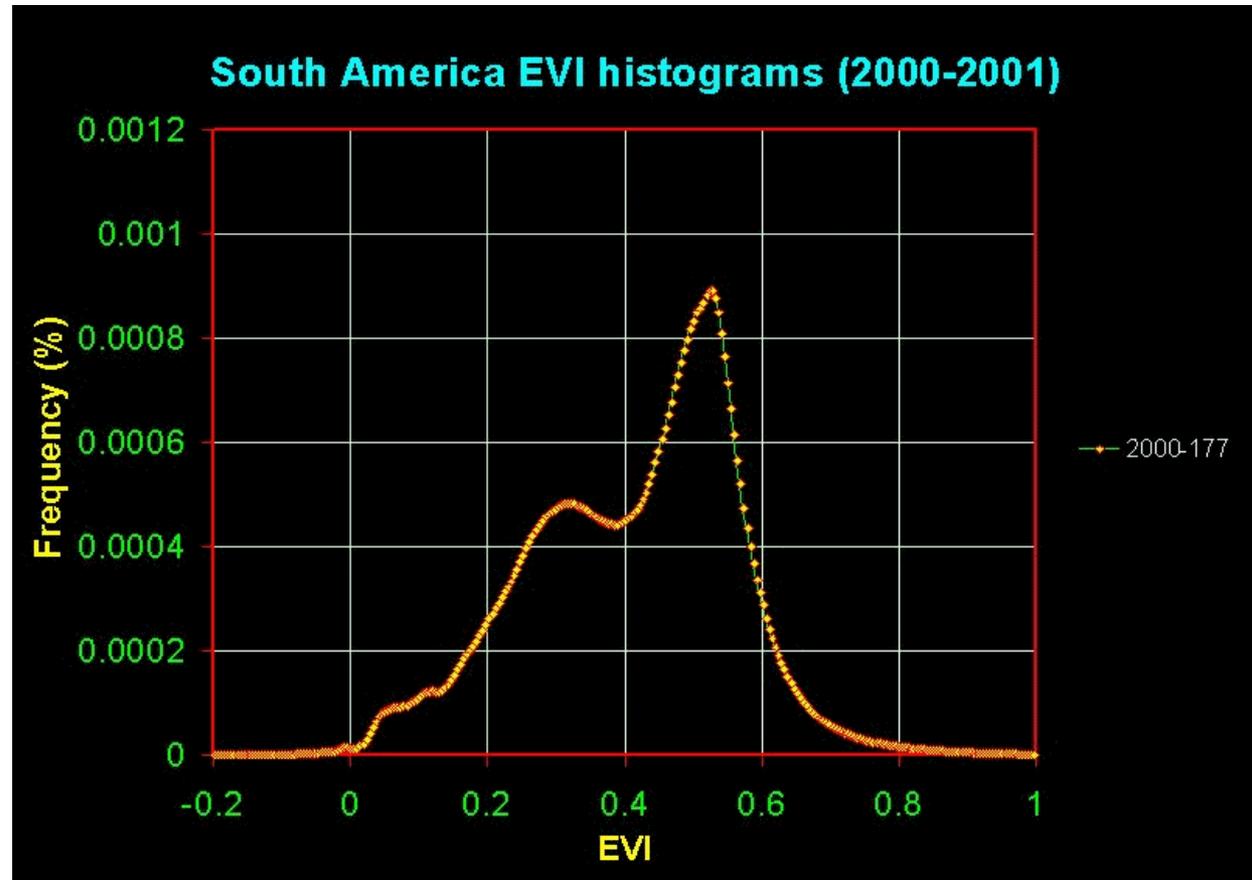
Dr. Compton (Jim) Tucker  
(NASA GSFC)



- Широко известная ранняя работа по практическому использованию вегетационных индексов рассчитанным по данным NOAA AVHRR. Автор-Джим Такер (НАСА) – пионер ДЗЗ, создатель архивов AVHRR данных GIMMS.
- Используя NDVI, количество осадков было рассчитано для каждого пиксела. Граница Сахель для осадков > 200 мм/г
- Автор рассчитал движение границы пустыни-которое доходило до 110 км/г в широтном направлении

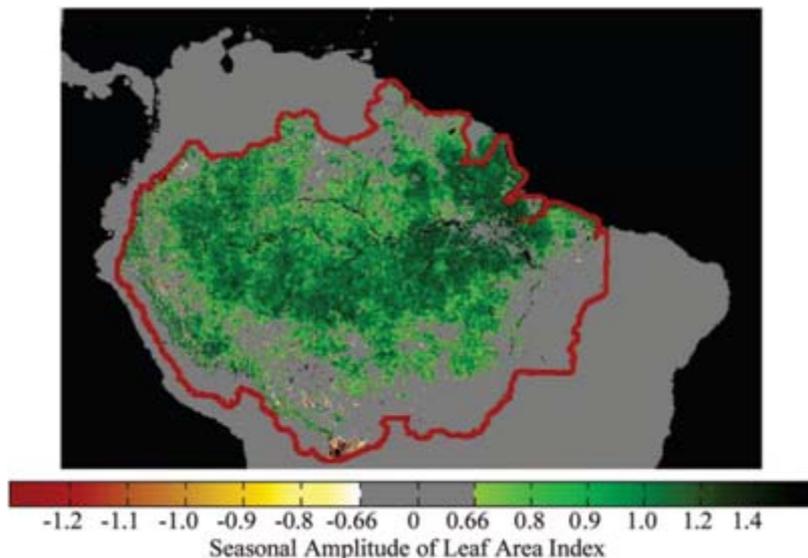


# Сезонные изменения в вечнозеленых лесах Амазонии

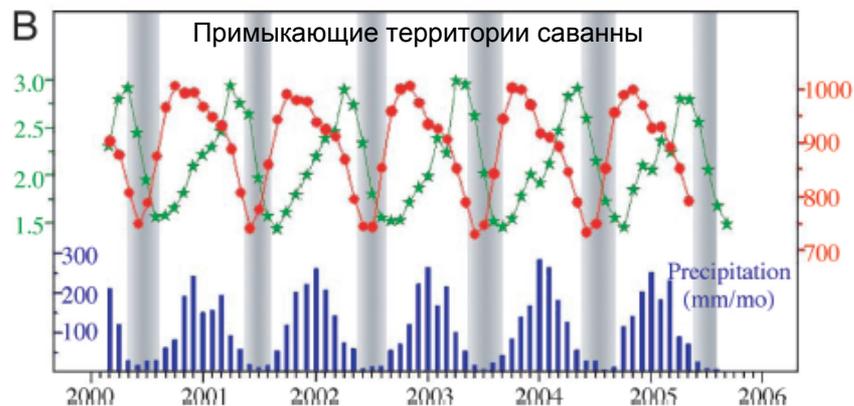
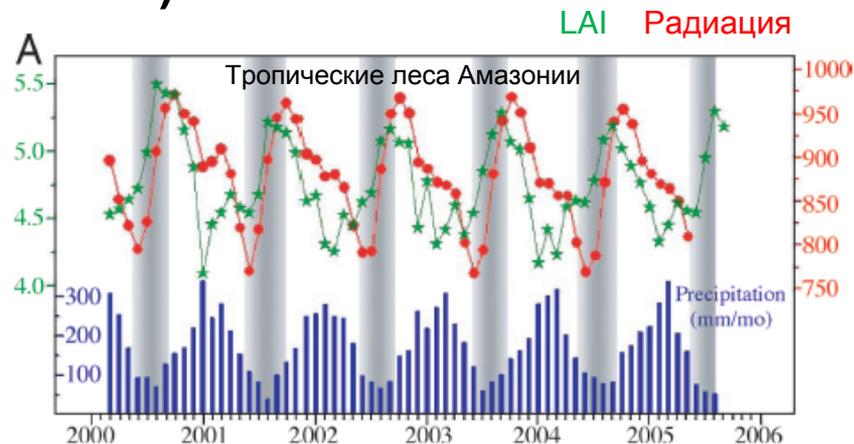


Вечнозеленые леса Амазонии считаются стабильным покровом- в этом регионе отсутствуют резкие перепады температур между зимой и летом и плотность зеленого покрова не меняется в течении года. Однако спутниковые данные по вегетационному индексу демонстрируют сезонность. В чем причина- является ли это следствием реальных изменений растительности или остаточным влиянием атмосферы?

# Сезонные изменения в вечнозеленых лесах Амазонии (продолжение)



- Анализ MODIS LAI продукта- биофизического параметра, рассчитанного на основе спутниковых данных после атмосферной коррекции. Это новый уровень точности по сравнению с AVHRR NDVI.
- Вариации LAI составляют 25% для 60% территории лесов Амазонии
- Для понимания причин эффекта были проанализированы данные об уровне осадков (данные TRMM) и солнечной радиации (данные CERES)

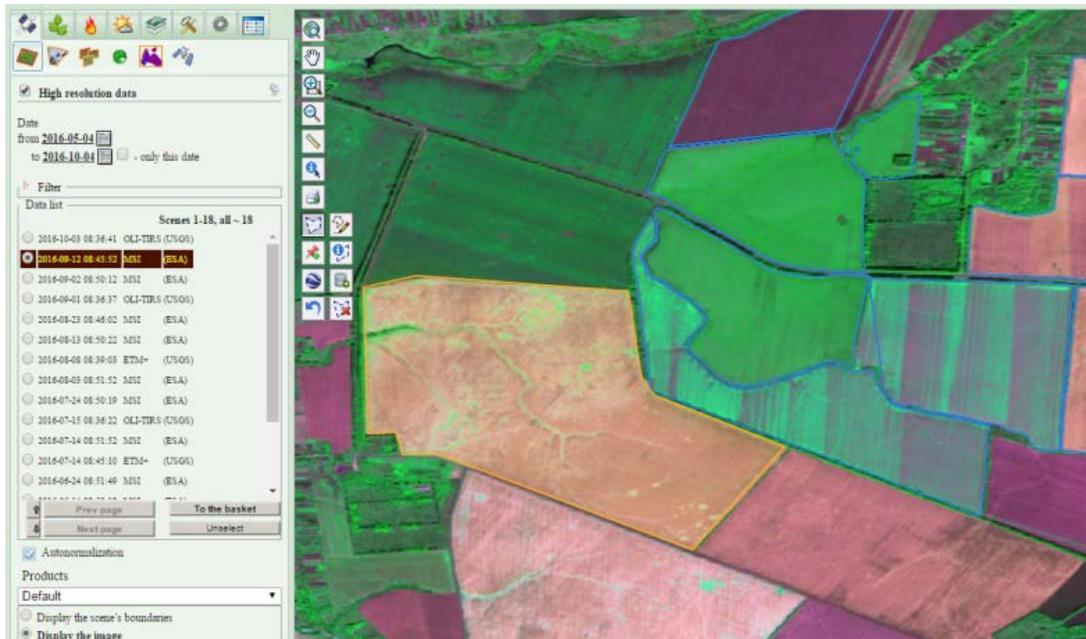


(А) В тропических лесах LAI возрастает с началом сухого сезона с обилием солнца и уменьшается в течении влажного облачного сезона. Влага – это не лимитирующий фактор для глубокой корневой системы. (В) Такая корреляция отсутствует в саванне.

1. Базовые сведения о вегетационных индексах
2. Некоторые известные мировые исследования
3. **Разработки ИКИ**

# Система Вега

[www.pro-vega.ru](http://www.pro-vega.ru)



**Цель:** Вега- это геопортал с возможностями ГИС для решения задач мониторинга растительного покрова в агропромышленном комплексе и лесном хозяйстве технологиями дистанционного зондирования

**Данные:** Архивы спутниковых данных (AVHRR, MODIS, PROBA-V, Sentinel, ETM, Hyperion и др.), метеоданные, производные продукты (безоблачные композиты, тематические карты вегетационных индексов и биофизических параметров) и др.

**Решаемые задачи:**

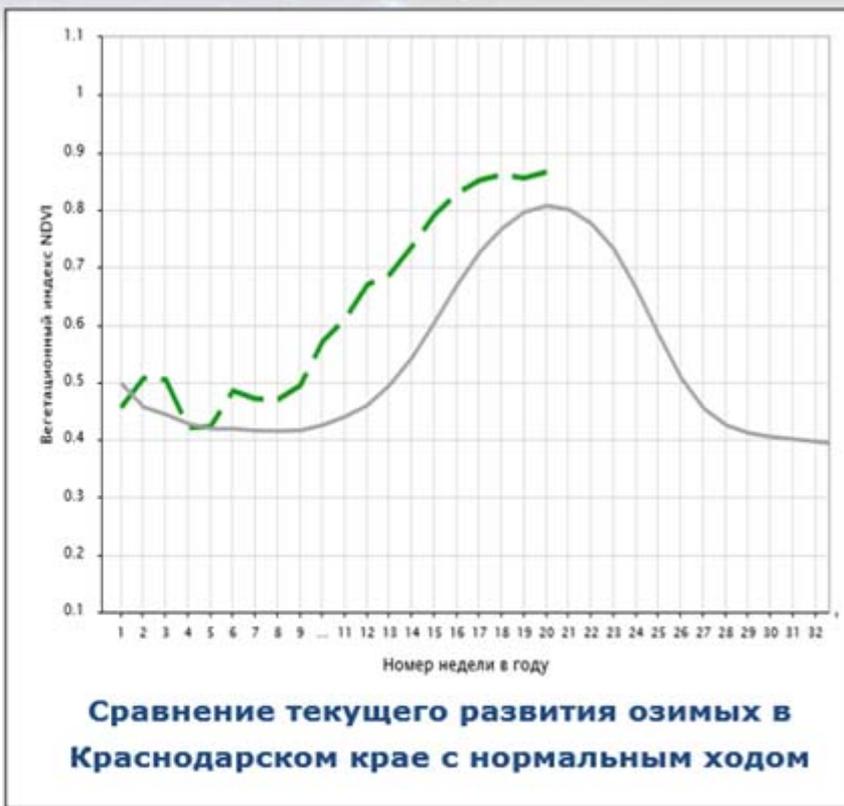
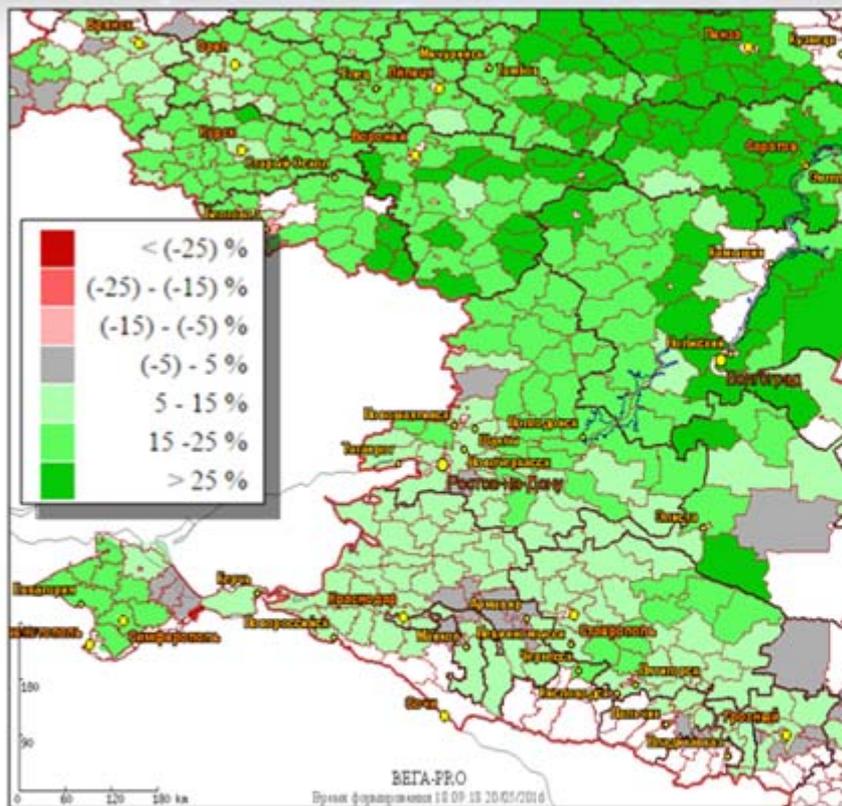
**Для агропромышленного комплекса-** Мониторинг использования пахотных земель, изучение стояния и динамики растительности, выявление аномалий и отклонения состояния посевов от нормы, оценка урожайности, мониторинг природных пожаров, анализ метеоусловий Составление аналитических отчетов.

**Для лесного хозяйства-** карта пожаров, карта растительности, карта растительных пород, карты вегетационных индексов и LAI, карта вырубок (в разработке).

# Система Вега (продолжение)

## Оценка урожайности

20-я неделя 2016 года (16.05.2016 – 22.05.2016)



**Анализ текущих спутниковых наблюдений и многолетних архивов спутниковых данных показывает, что в этом году может ожидать рекордная урожайность (например, в Краснодарском крае более 60 ц/га)**

# Картографирование гарей на основе индекса NBR и SWVI

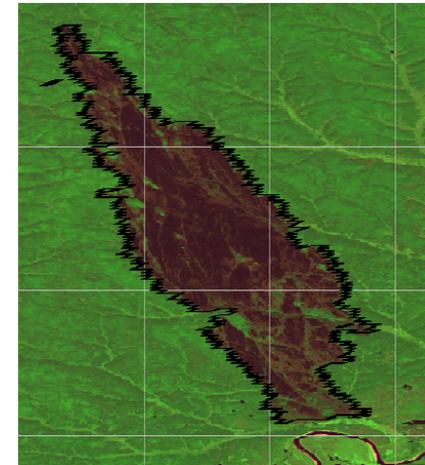
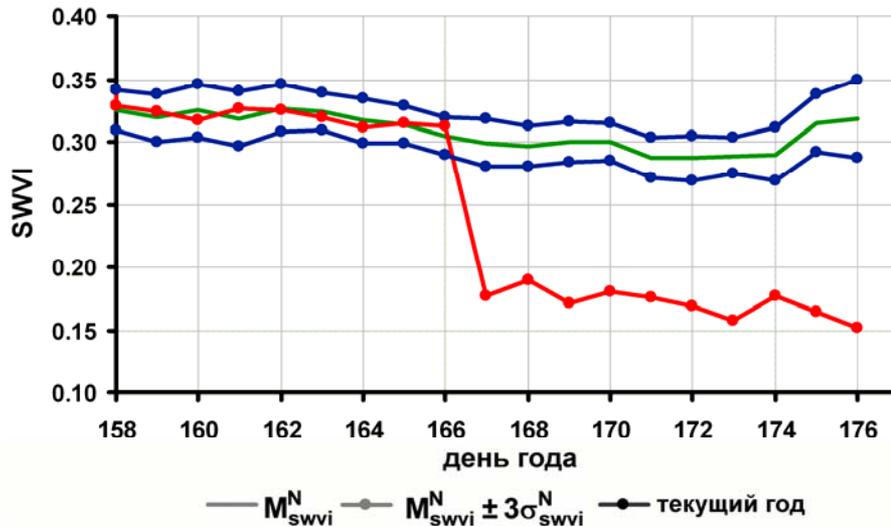
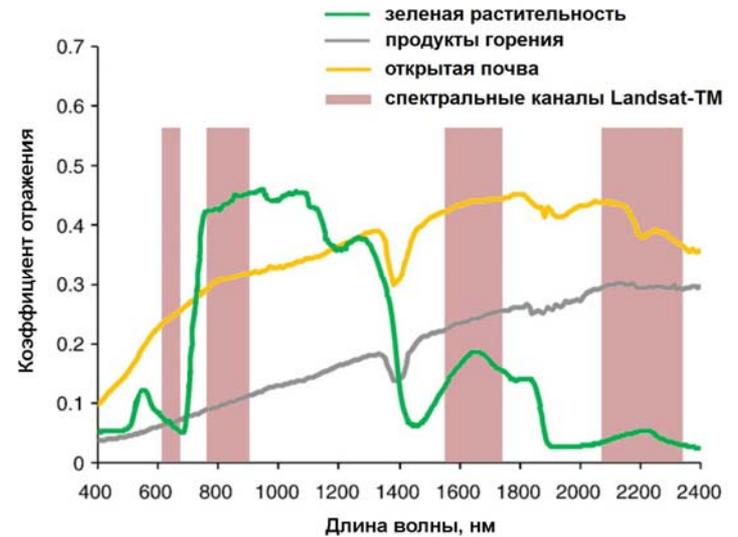
$$NBR = \frac{\rho(NIR) - \rho(LSWIR)}{\rho(NIR) + \rho(LSWIR)} \quad (\text{для Landsat ETM})$$

$$SWVI = \frac{\rho(NIR) - \rho(SSWIR)}{\rho(NIR) + \rho(SSWIR)} \quad (\text{для Terra MODIS})$$

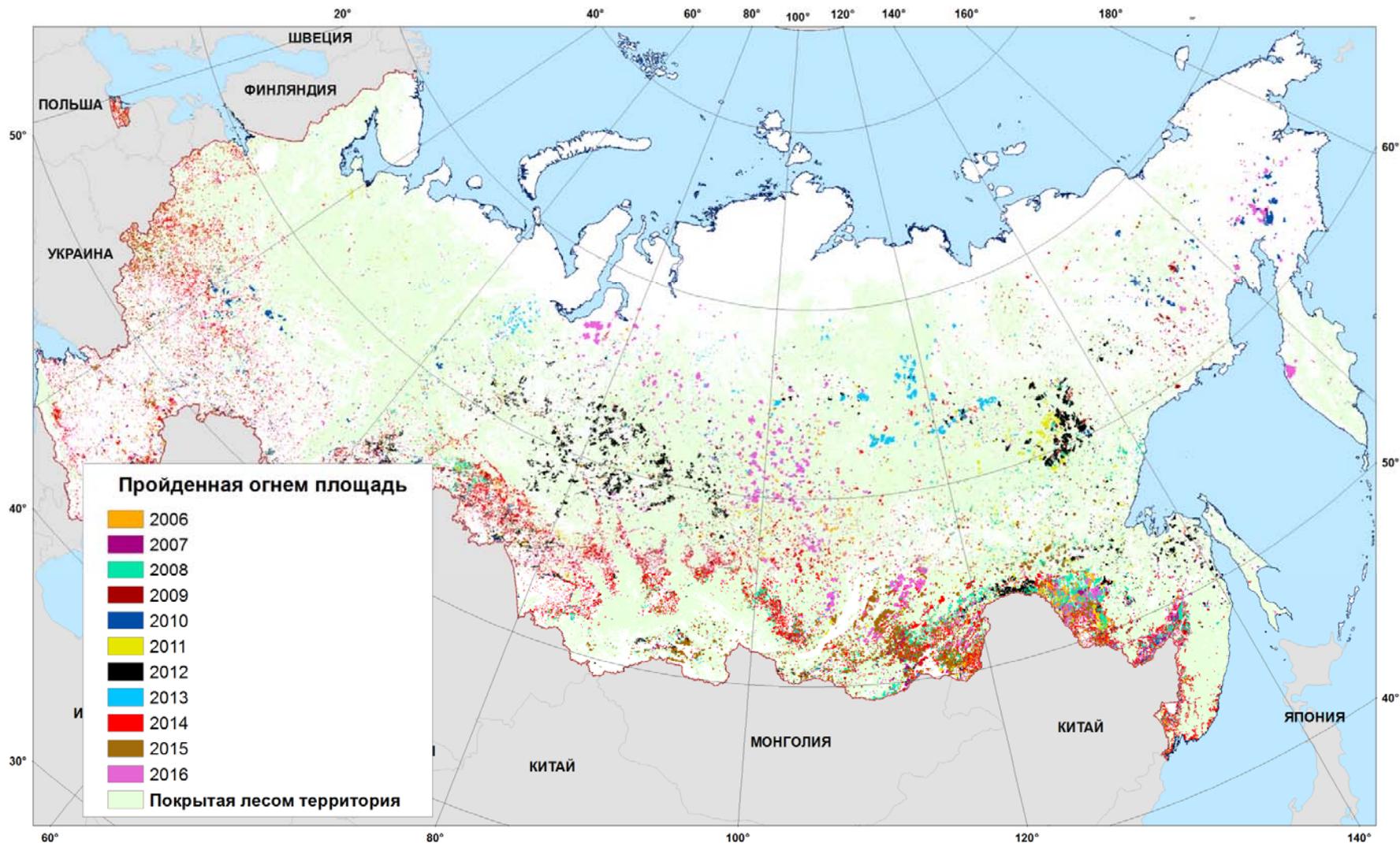
NIR- ближний ИК (0.8 мкм)

SSWIR- средний ИК (1.6 мкм)

LSWIR- средний ИК (2.2 мкм)

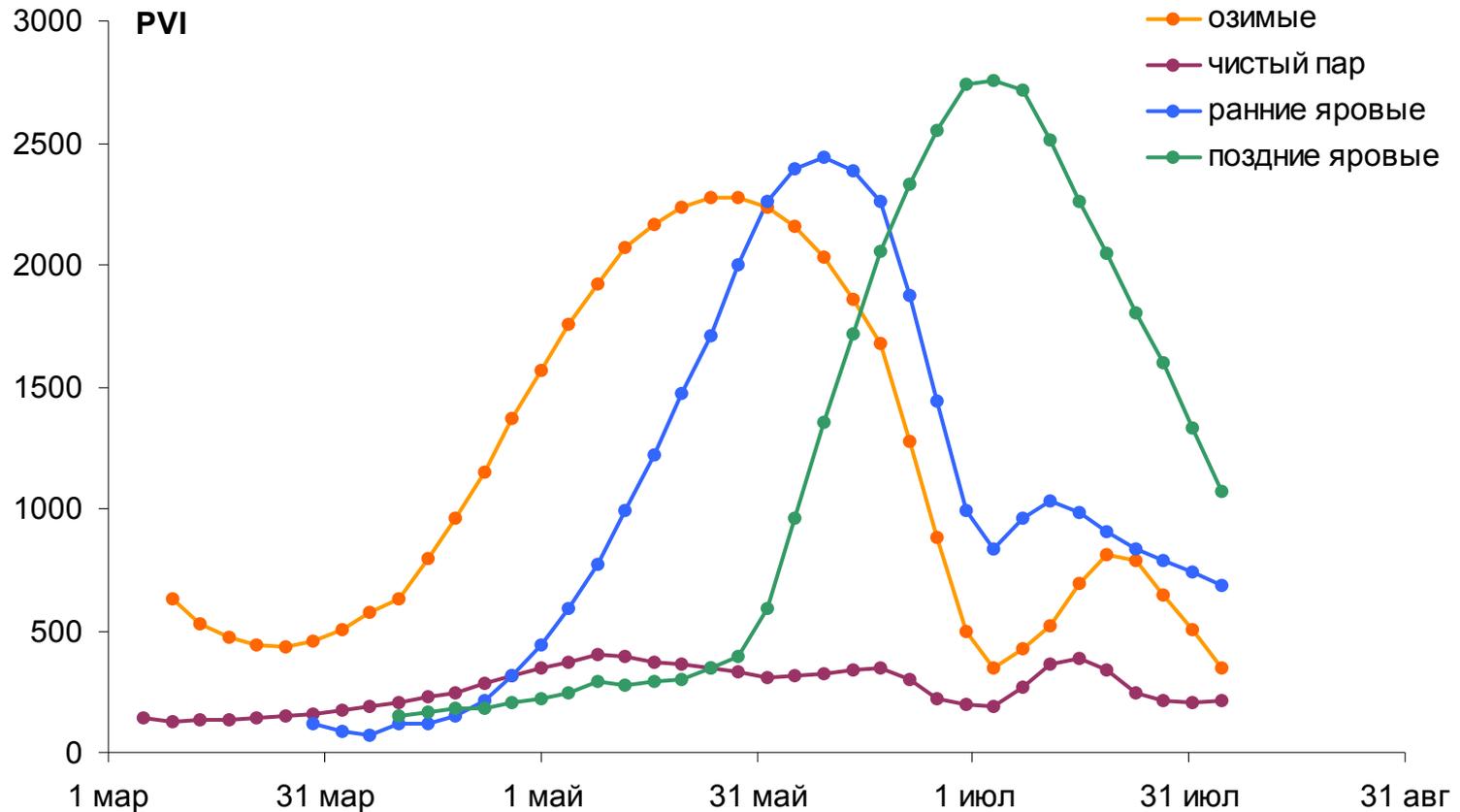


# Картографирование гарей на основе индекса NBR и SWVI (продолжение)



Пройденные огнем площади по данным MODIS на территории России за 2006-2016 г.

# Картографирование пахотных земель России на основе индекса PVI



Возможности временных рядов PVI по обнаружению различных с/х культур.

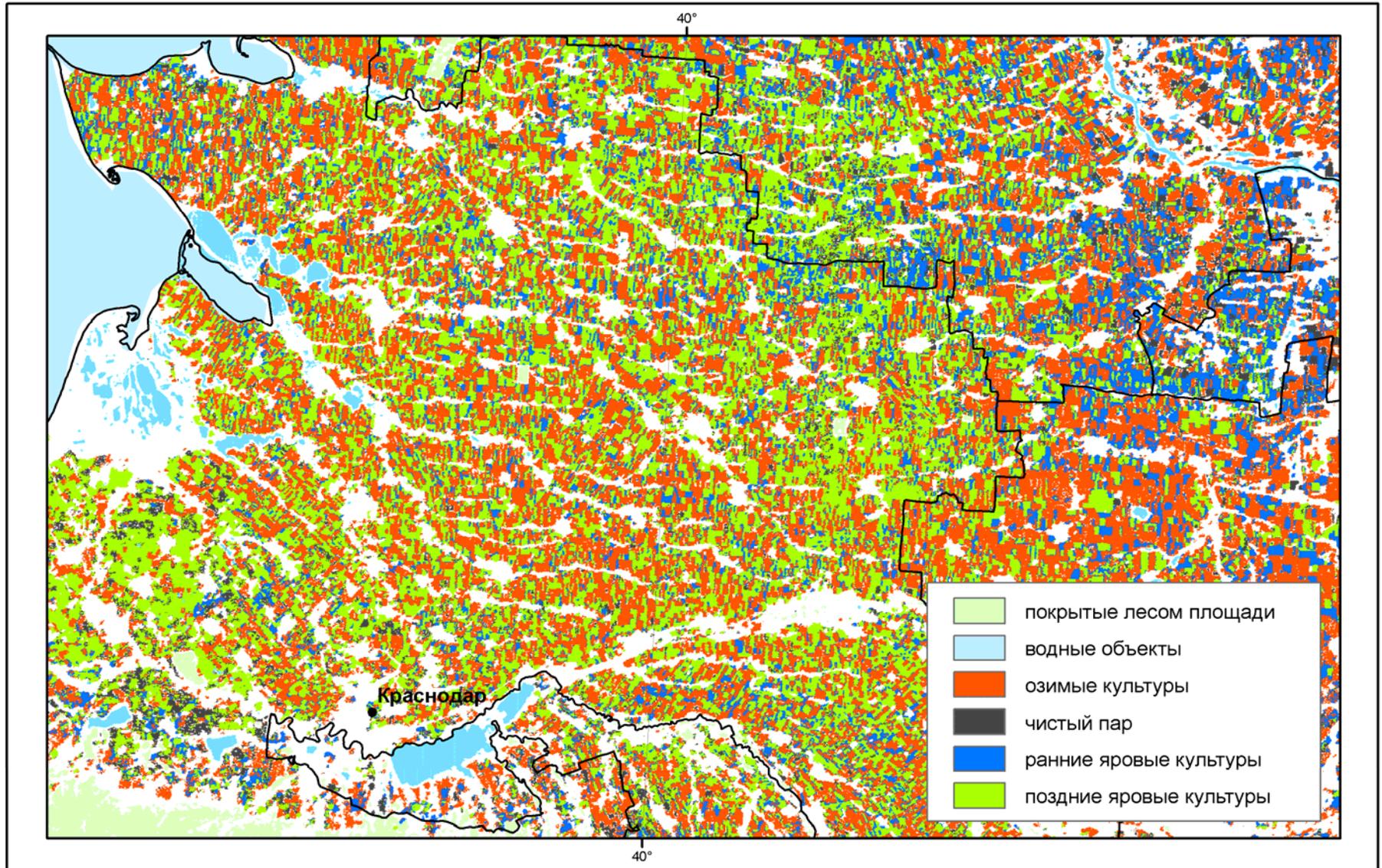
# Картографирование пахотных земель России на основе индекса PVI (продолжение)

Спектрально-динамические признаки распознавания с/х растительности

Название	Формула	Описание
Индекс кратчайшего сезона вегетации	$L_{1/2} = \min_{j=1..N} (t_L^j - t_F^j),$ $PVI(t_L) = PVI(t_F) = \frac{PVI_{max}}{2},$ $t_L > t_{max}, t_F < t_{max}$	Минимальный для ряда лет отрезок времени, когда в течение года значения PVI превышали половину его сезонного максимума
Индекс весеннего развития растительности	$MSI = \min_{j=1..N} \sum_{i \in spw} PVI_{ij}$	Многолетний минимум интеграла PVI в период 1 января - 15 июня каждого года наблюдений
Индекс сезонного снижения фитомассы	$NSMI = const - \frac{\sum_{j=1}^N PVI_j^{min \in sw}}{\sum_{j=1}^N \sum_{i \in sw} PVI_i}$	Нормированная сумма многолетних сезонных минимумов PVI в период 15 мая - 15 сентября каждого года наблюдений
Индекс межгодовых различий динамики растительности	$K = \min_{i, j=1..N} (Cor(PVI(Year_i), PVI(Year_j)))$	Минимум всех возможных значений межгодовых корреляций временных рядов PVI
Индекс межгодовой изменчивости фитомассы	$D = SD \left( \sum_{i=1..N} PVI_j \right)$	Стандартное отклонение сумм накопленных за различные годы значений PVI
Разностный индекс сезонного пика вегетации	$T = Med_{j=1..N} (PVI_{max}^{Year_j} - PVI_{mean}^{Year_j})$	Многолетняя медиана разности максимального и среднего значения PVI

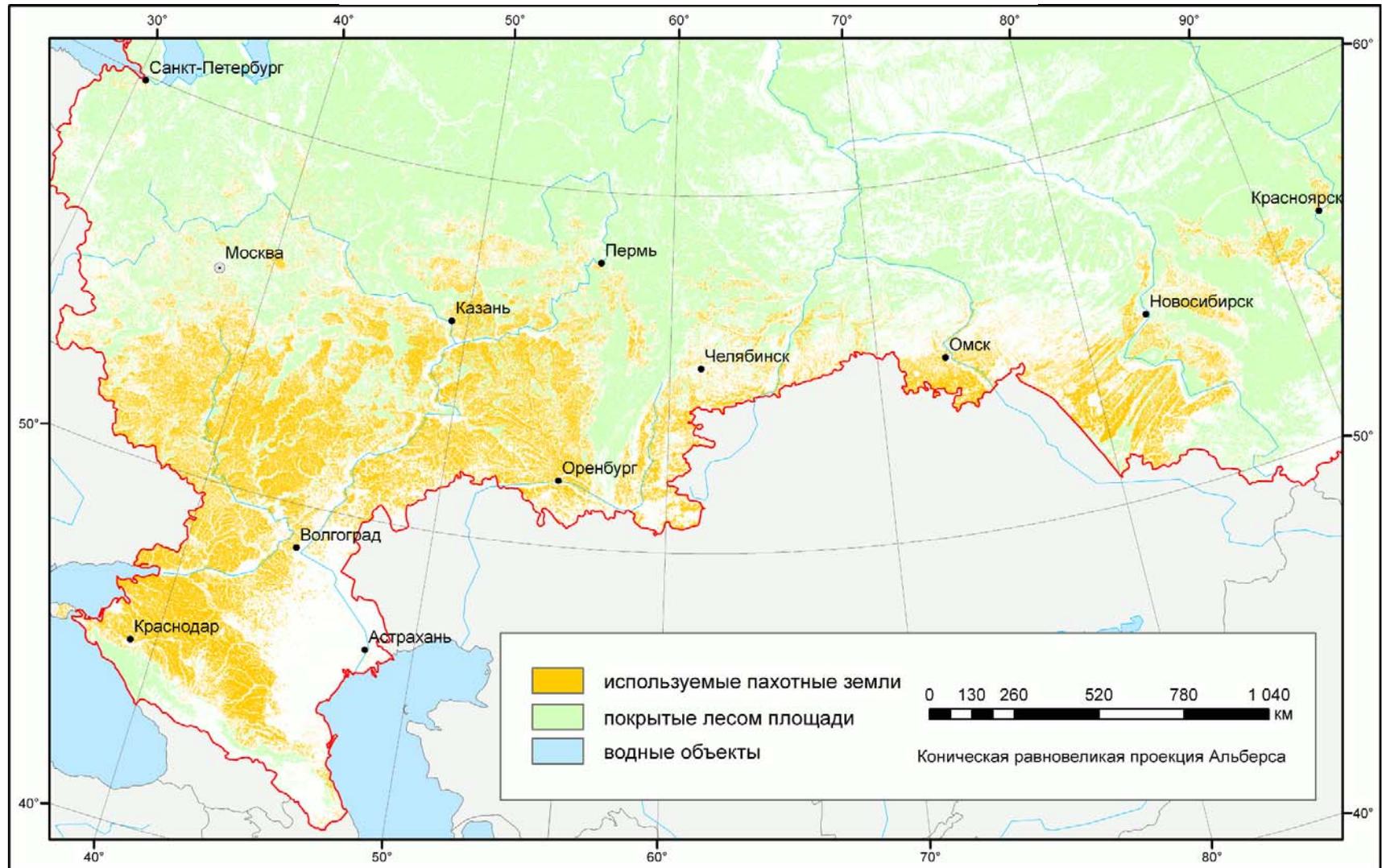
# Картографирование пахотных земель России на основе индекса PVI (продолжение)

Карта С/х культур для Краснодарского края



# Картографирование пахотных земель России на основе индекса PVI (продолжение)

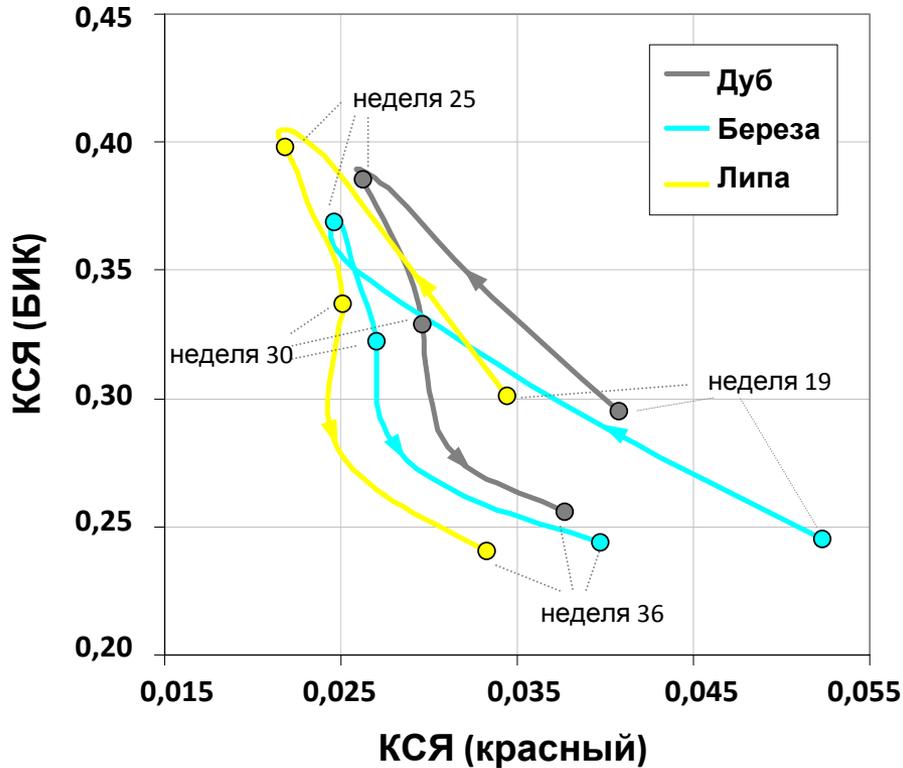
## Карта пахотных земель России



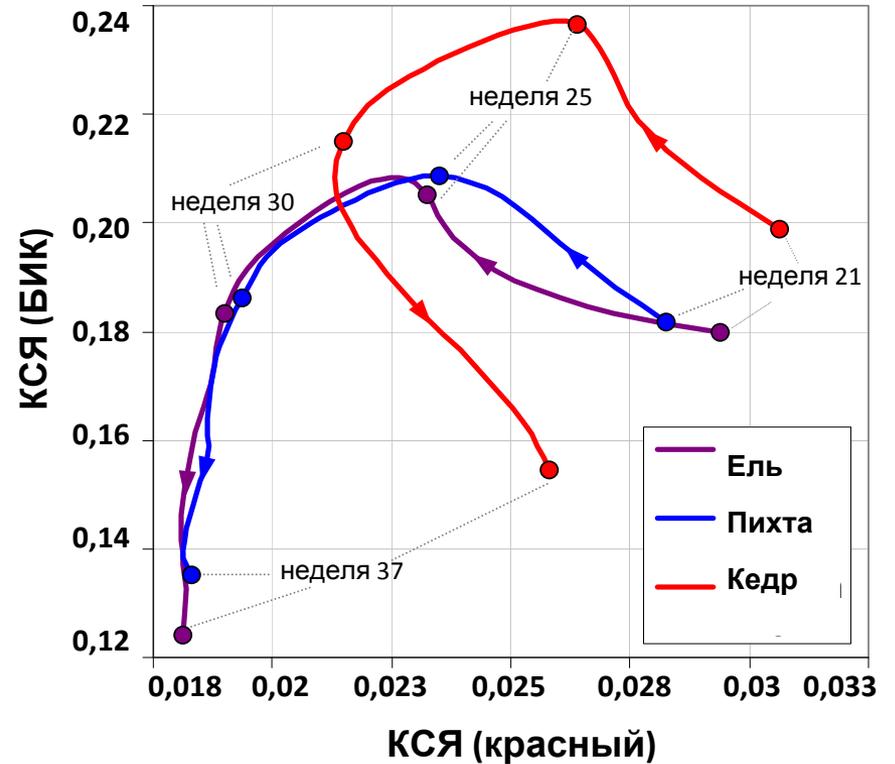
Ежегодные карты рассчитываются по интервалу 6 лет. Данная карта за 2015 г.

# Картографирование пород лесного покрова

## Лиственные породы

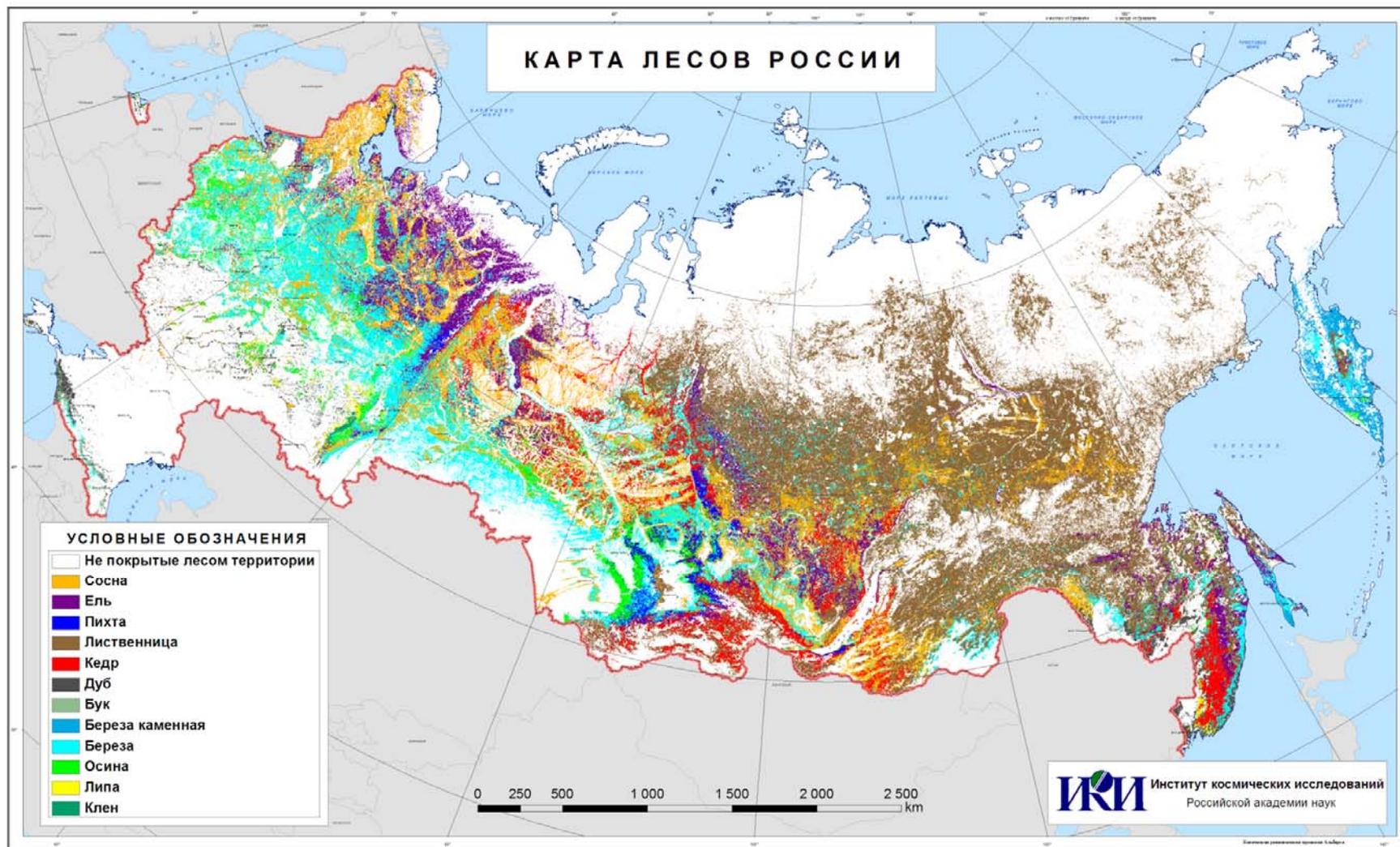


## Хвойные породы



Фазовые диаграммы для участков лесного покрова с преобладанием различных пород в пространстве еженедельных измерений КСЯ в красном и ближнем ИК каналах MODIS; движение вдоль кривой соответствует изменению средних значений КСЯ в течение вегетационного сезона.

# Картографирование пород лесного покрова (продолжение)



Ежегодные карты рассчитываются по интервалу 7 лет. Данная карта за 2015 г.

# Картографирование растительности России



Ежегодные карты строятся путем объединения карт почв и пород лесного покрова. Данная карта за 2015 г.

# Динамика площади покрытой лесом

