

Использование данных спутниковых наблюдений для мониторинга растительности

Барталев С.А.

Институт Космических Исследований РАН



PHOTOSYTHENSIS

WATER + LIGHT = CHEMICAL ENERGY

1. Chloroplasts trap light energy

2. Water enters leaf



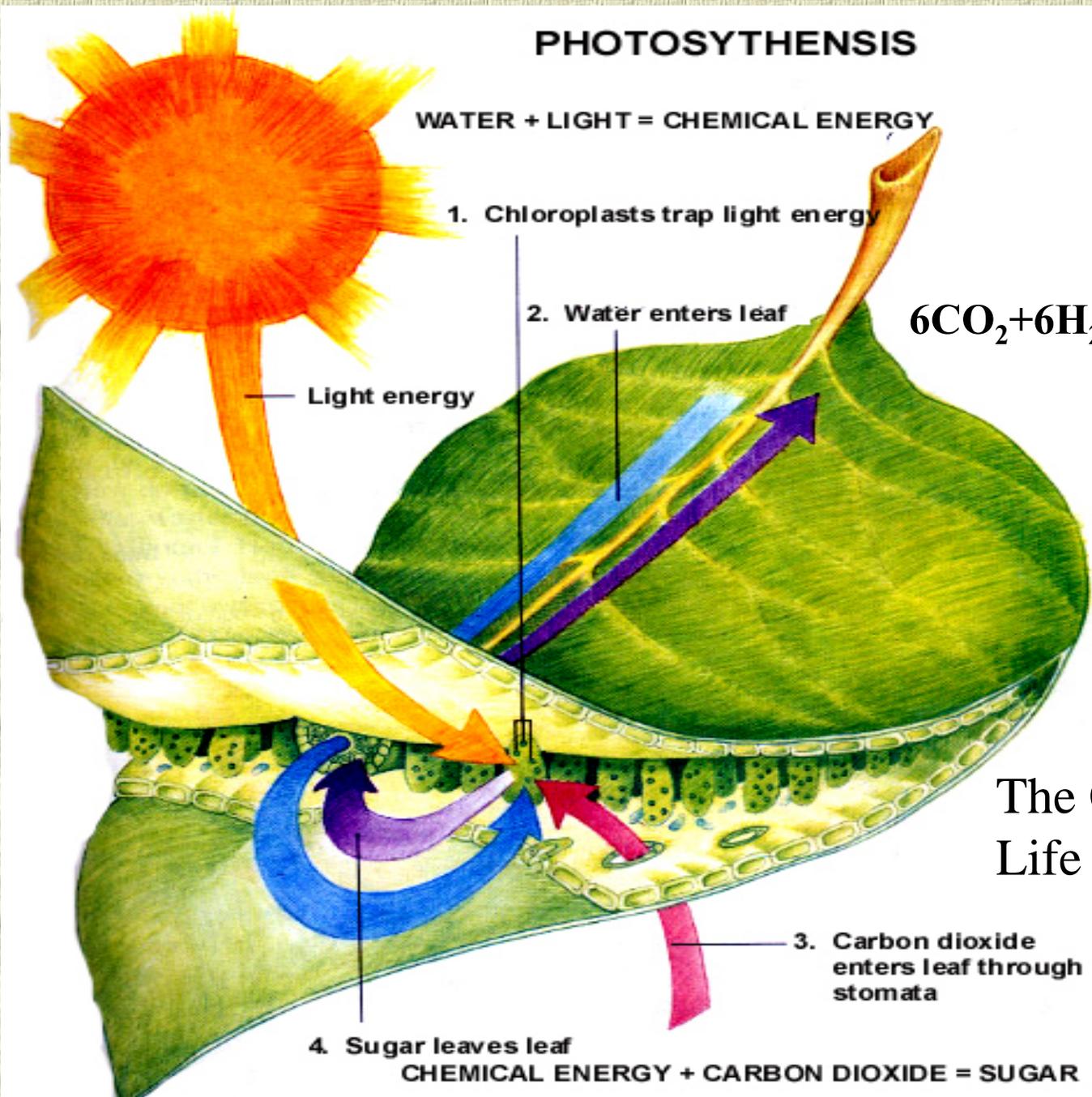
Light energy

3. Carbon dioxide enters leaf through stomata

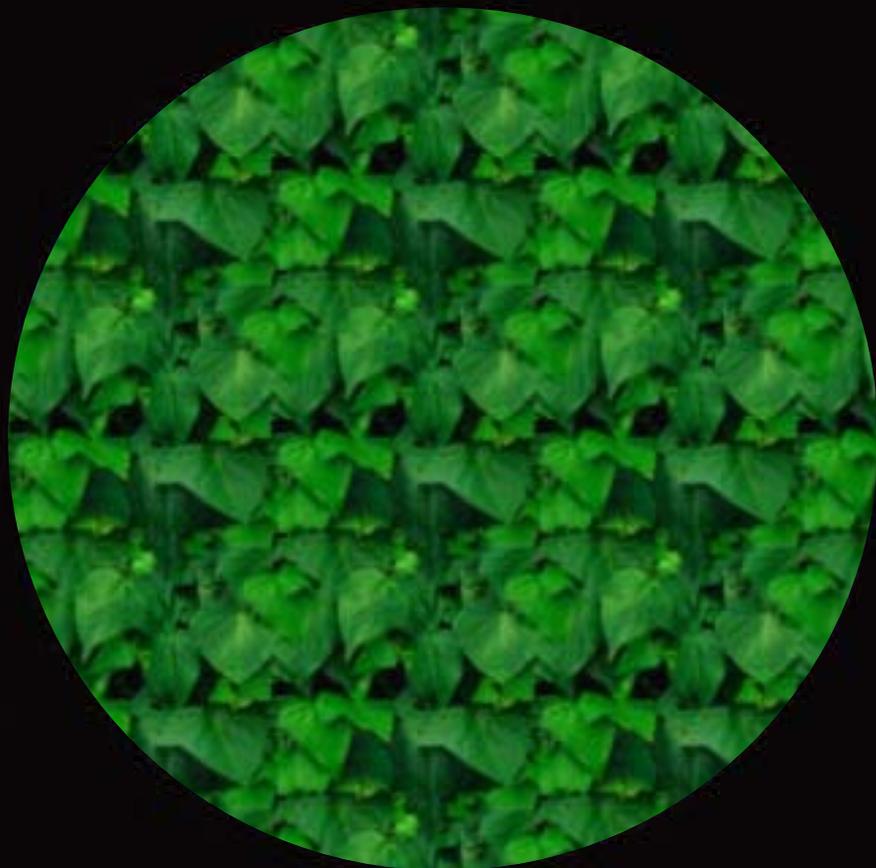
4. Sugar leaves leaf

CHEMICAL ENERGY + CARBON DIOXIDE = SUGAR

The Cornerstone of Life on this planet!



Голубая или зеленая планета?



Доля площади планеты покрытой растительностью*

22,5%

Глобальное среднее значение LAI **

x

4,5

Доля листовой поверхности по отношению к площади планеты

=

101,25%

~ 100 %

Водой покрыто 70,8% поверхности планеты

* - IGBP DIS Land Cover Data Base, 2000

** - Gregory P. Asner et al. 2002, Global Synthesis of Leaf Area Index Observations: Implications for Ecological and Remote Sensing Studies

Структура лекции

Приборы дистанционного зондирования со спутников для мониторинга растительности

Физические основы дистанционного зондирования растительности в оптическом диапазоне длин волн

Спектральные отражательные характеристики

Фенологическая динамика

BRDF функция

Глобальный мониторинг растительности

Картографирование наземных экосистем

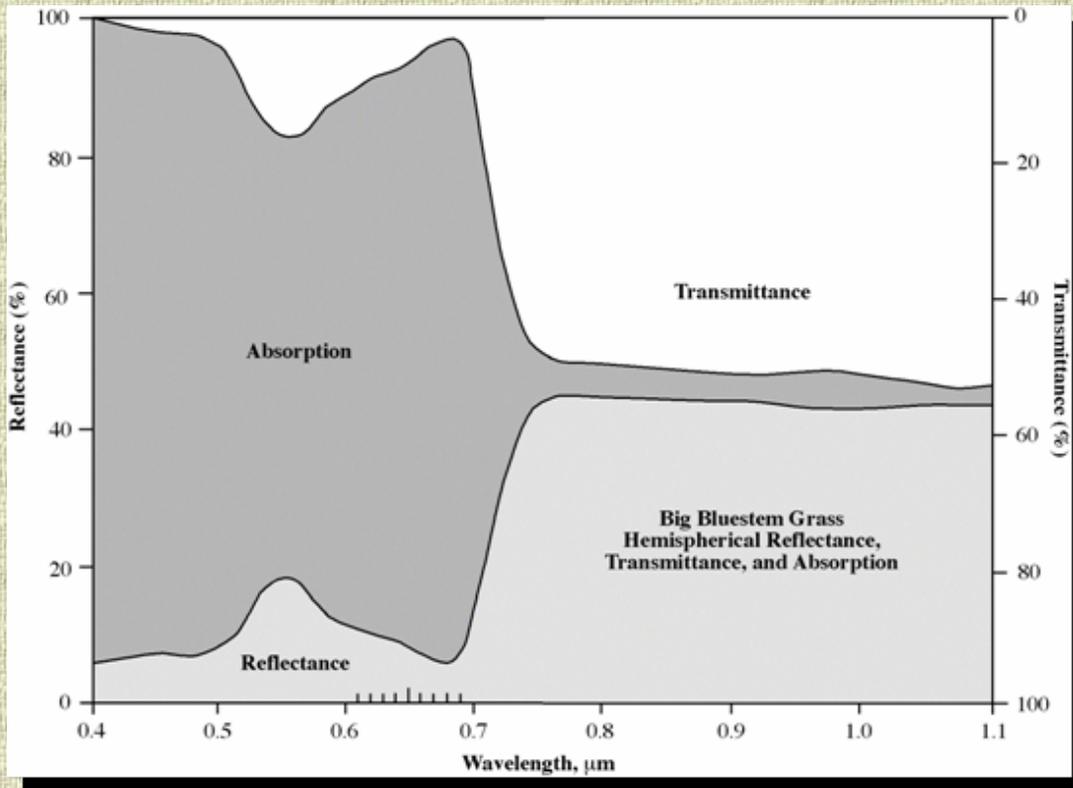
Оценка биофизических характеристик растительности

Мониторинг динамики растительного покрова

Год	Спутник (основной сенсор)
1972	ERTS-1 (MSS)
1975	Landsat-2 (MSS)
1978	Landsat-3 (MSS)
1979	NOAA-6 (AVHRR)
1981	NOAA-7 (AVHRR)
1982	Landsat-4 (MSS, TM)
1983	NOAA-8 (AVHRR)
1985	Landsat-5 (MSS, TM); NOAA-9 (AVHRR)
1986	SPOT-1 (HRV); NOAA-10 (AVHRR)
1988	NOAA-11 (AVHRR); IRS-1A (LISS I, LISS II)
1990	SPOT-2 (HRV)
1991	NOAA-12 (AVHRR); ERS-1 (ATSR, SAR); IRS-1B (LISS I, LISS II)
1992	JERS-1 (SAR, OPS)
1993	SPOT-3 (HRV)
1994	NOAA-14 (AVHRR)
1995	ERS-2 (ATSR, SAR); IRS-1C (LISS III); Radarsat (SAR)
1997	IRS-1D (LISS III)
1998	SPOT-4 (HRVIR, Vegetation)
1999	Landsat-7 (ETM+); IKONOS, Terra (MODIS, MISR, ASTER)
2000	NOAA-L (AVHRR); EO-1 (Hyperion, ALI); EROS A1 (EROS A1)
2001	Quickbird-2, PROBA (CHRIS)
2002	SPOT-5 (HRG, Vegetation); Envisat (AATSR, ASAR, MERIS); Aqua (MODIS)
2003	ICESat (GLAS)
	Radarsat-2 (SAR)
	ALOS (VSAR, AVNIR-2)
	NASA (VCL)



Vegetation Spectra



In this graph

$$\begin{aligned} & [\text{hemispherical reflectance}] \\ & + \\ & [\text{absorption}] \\ & + \\ & [\text{hemispherical transmittance}] \\ & = 1.0 \end{aligned}$$

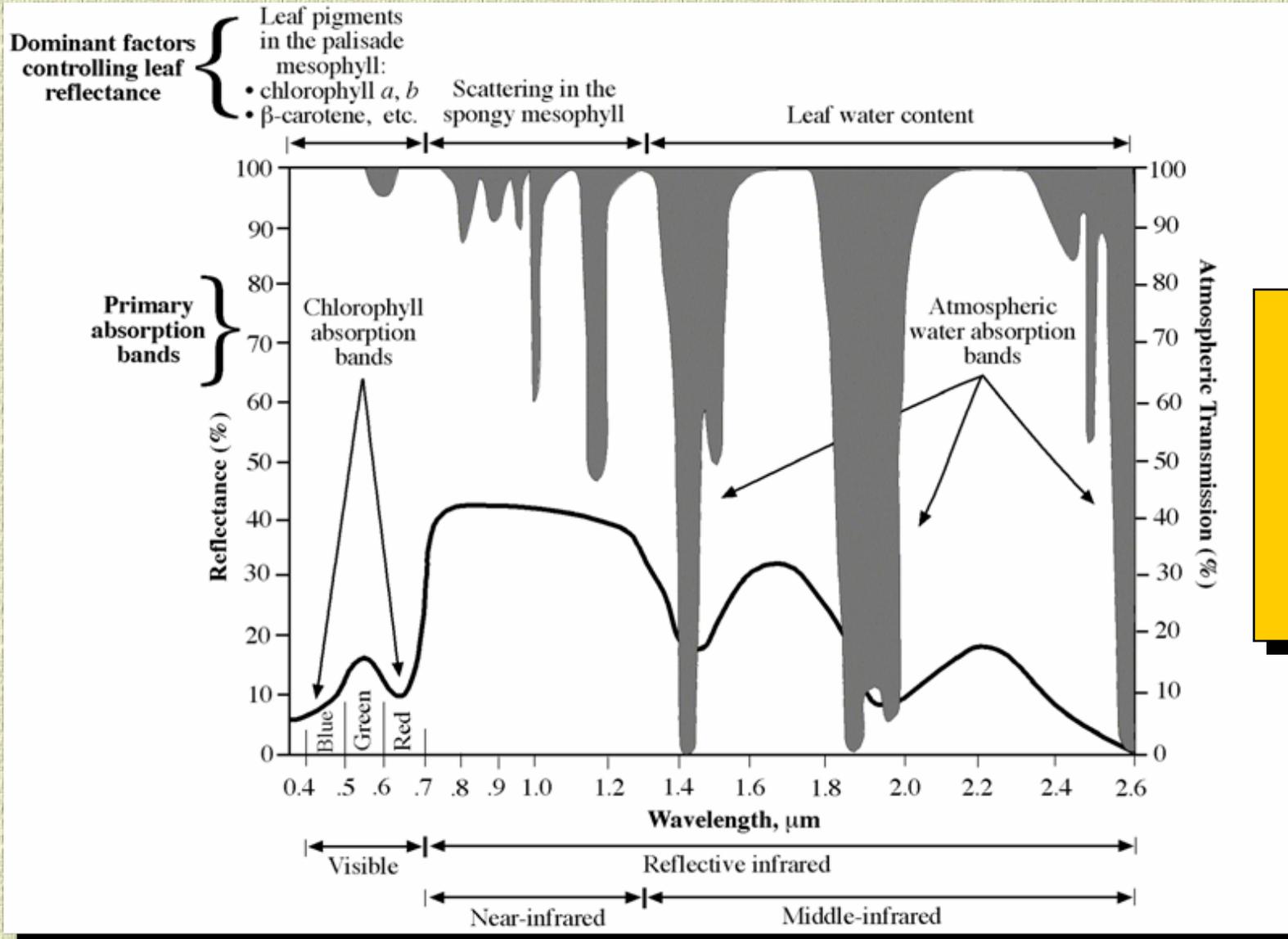
[hemispherical reflectance] is displayed upwards from 0.0;

[hemispherical transmittance] is displayed downward from 1.0;

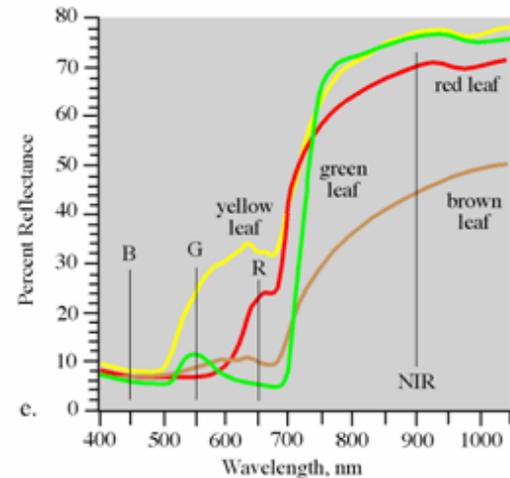
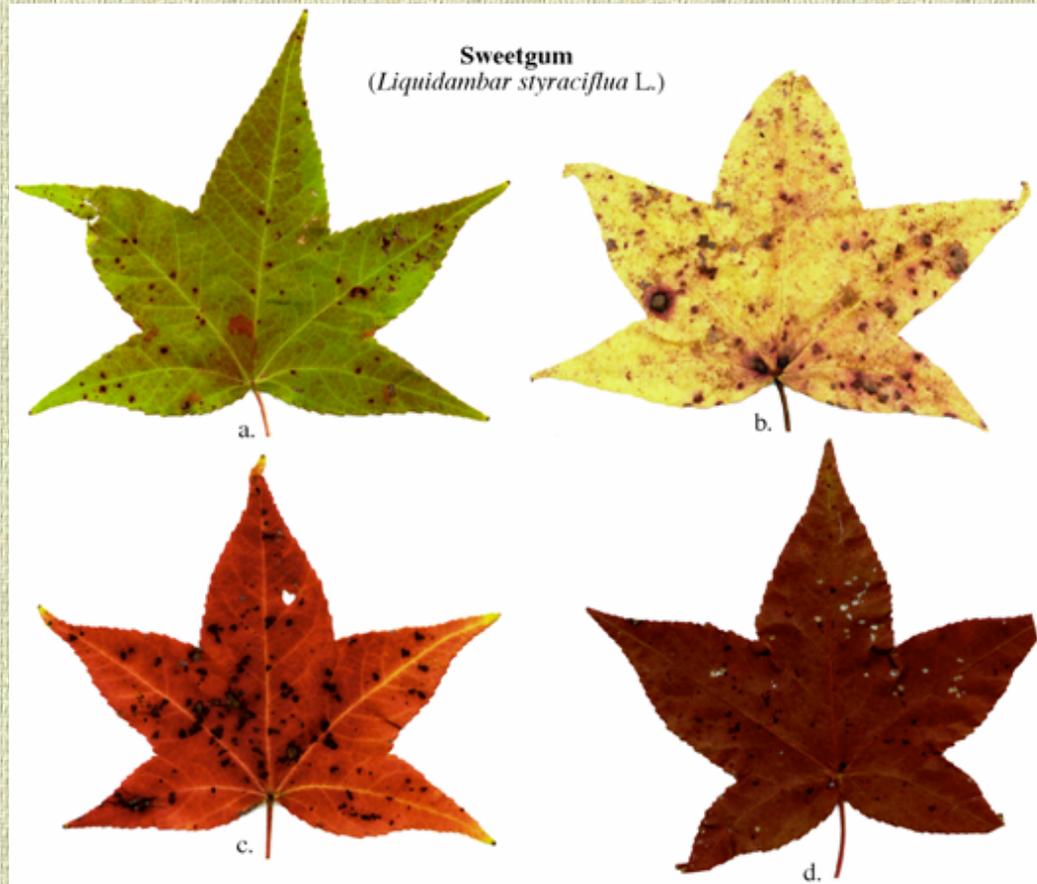
Rearranging the equation shows that [absorption] is the dark grey area between the two curves.

➔ Conclusion: **absorption** dominates in **visible**; **scattering** dominates in the **NIR**.

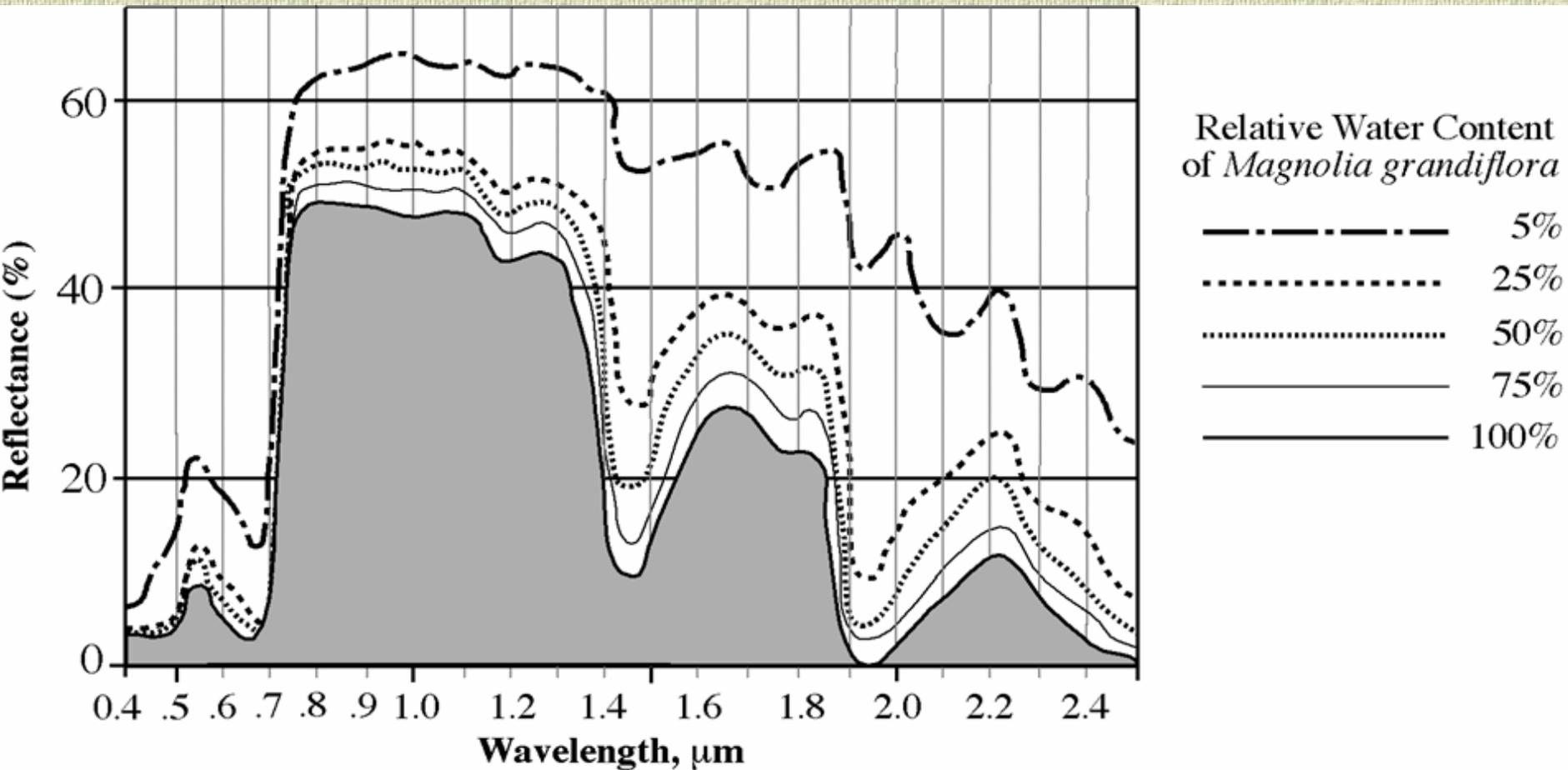
Three factors determine canopy reflectance



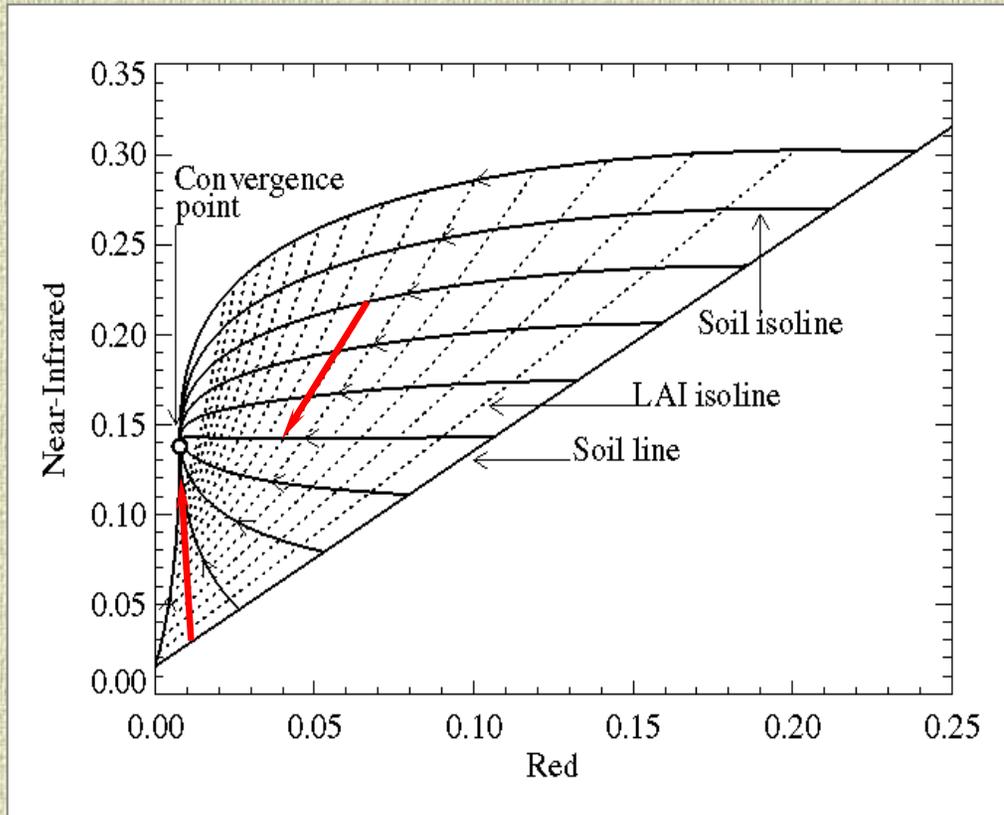
Seasonal variability
in spectral reflectance
(Sweetgum –
Liquidambar styraciflua L.)



Reflectance increases as leaf dries



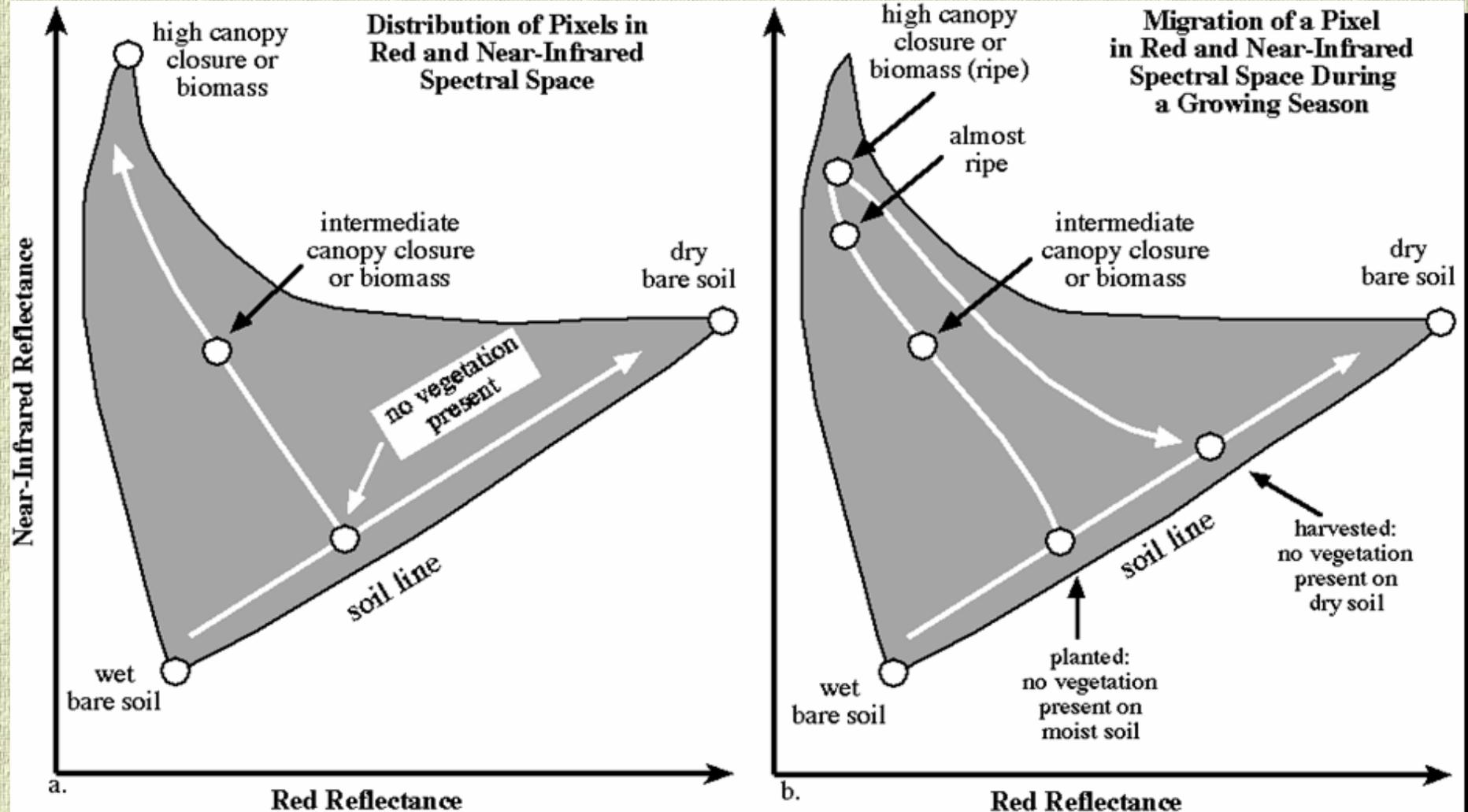
Trajectories in the Spectral Space



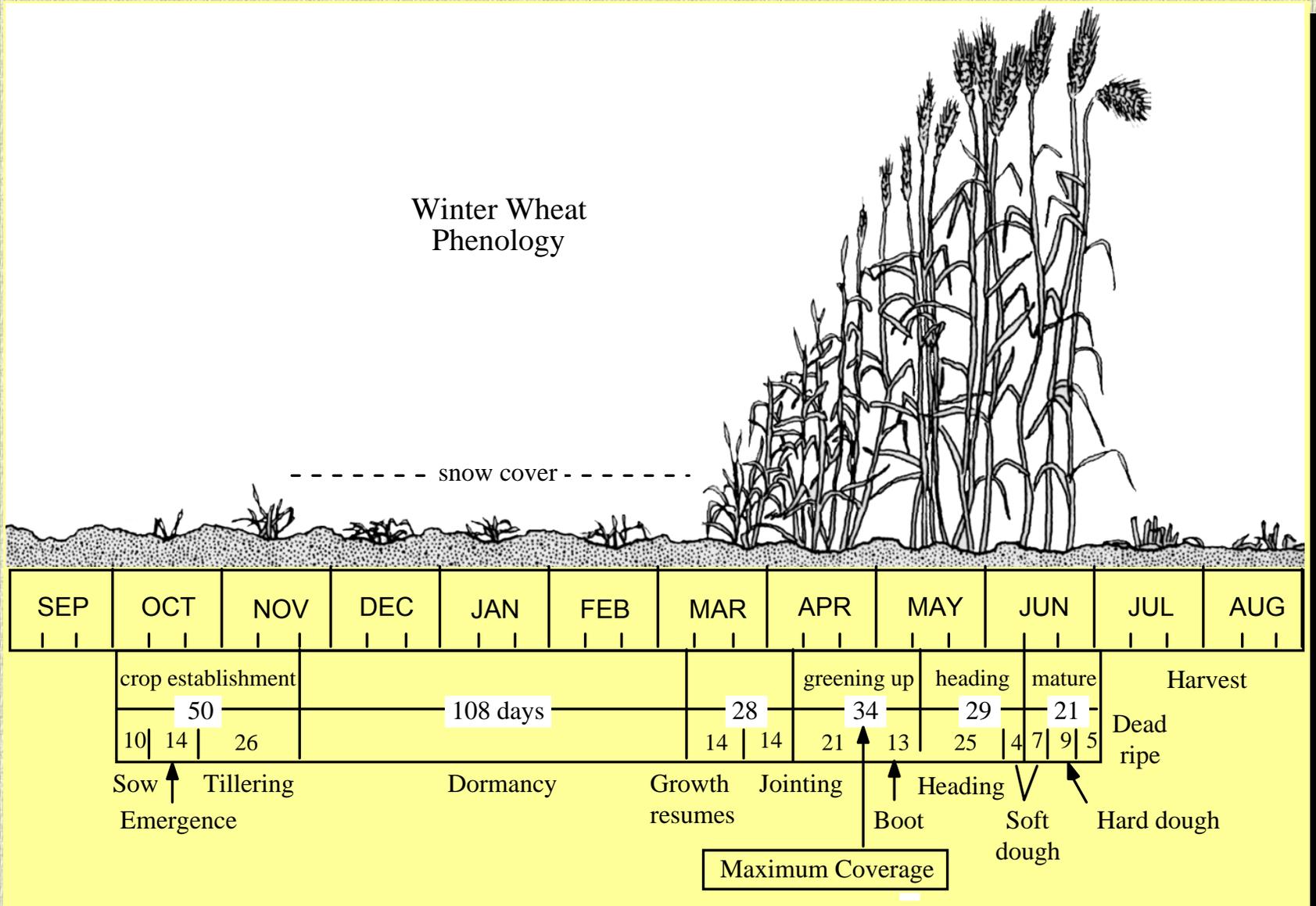
Stochastic model was used to construct the vegetation reflectance at nadir in the red and near-infrared spectral space.

- **Soil isoline: background reflectance constant + LAI changing.**
- **LAI isolines: LAI is constant + background reflectance changing.**
- **Soil line: LAI=0 + background reflectance changing**
- **Convergence point: LAI=infinity.**

“Tassled cap” – red & NIR reflectance

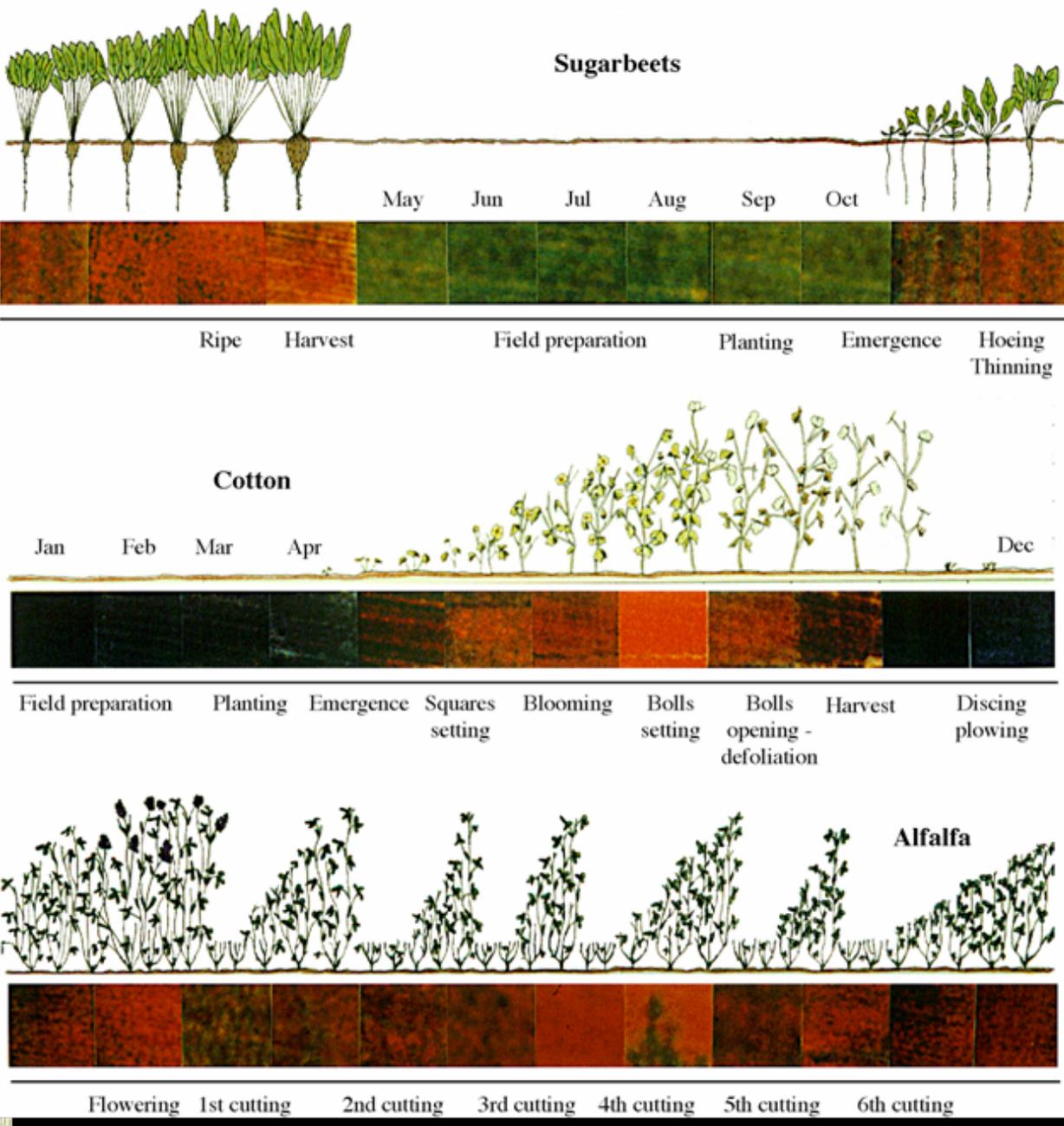


Temporal variability – phenological cycle of winter wheat



Phenological Cycles of San Joaquin and Imperial Valley, California, Crops and Landsat Multispectral Scanner Images of One Field During a Growing Season

Phenological cycle of some crops



NDVI

- Characteristics of leaf reflectance (phenological stage, leafy biomass, greening, drying, etc.)

$$NDVI = \frac{NIR - red}{NIR + red}$$

Other vegetation indices (condensed from p. 363 in *Jensen*)

$$\text{Infrared index } II = \frac{NIR_{TM4} - SWIR_{TM5}}{NIR_{TM4} + SWIR_{TM5}}$$

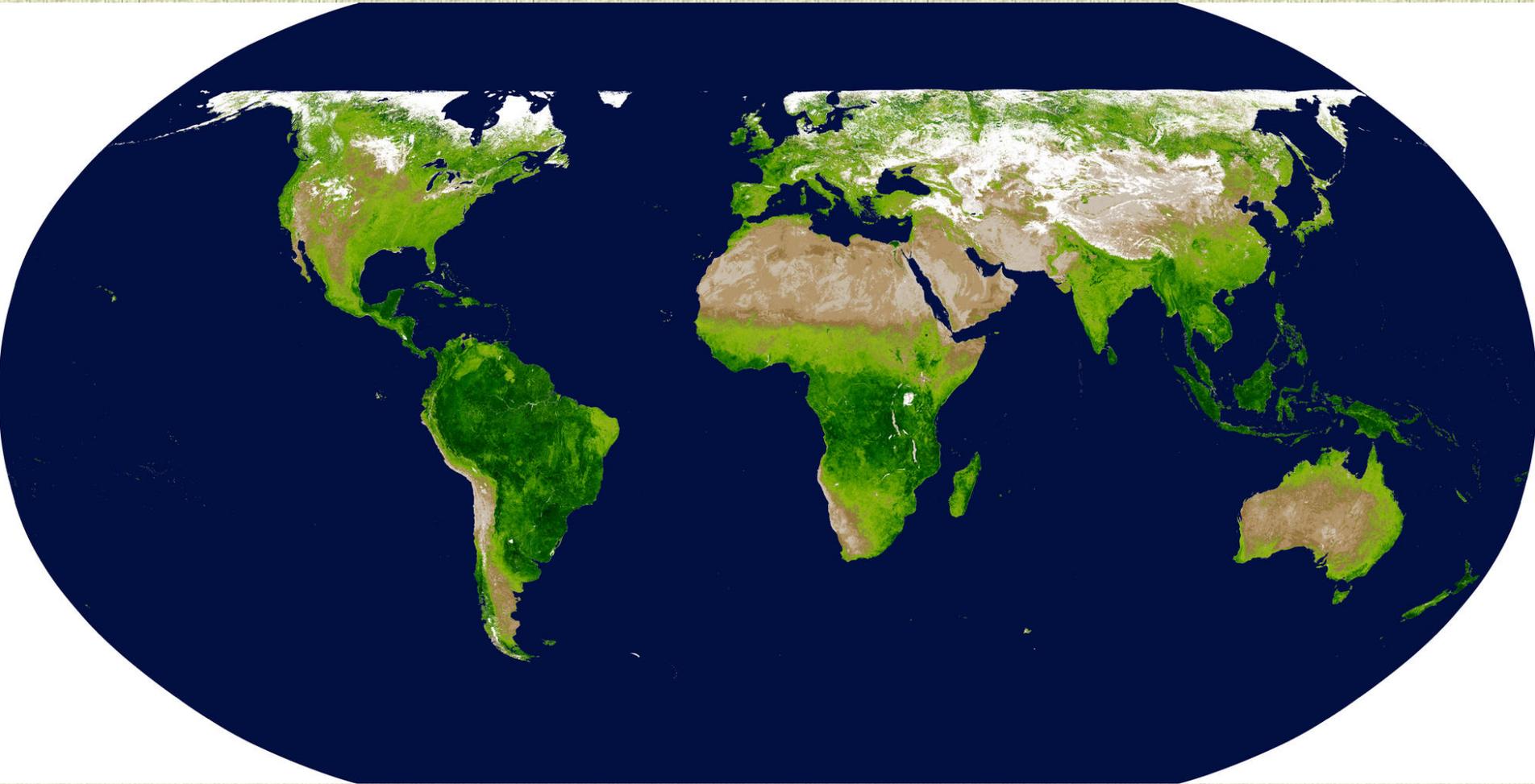
$$\text{Moisture stress index } MSI = \frac{SWIR_{TM5}}{NIR_{TM4}}$$

$$\text{Soil adjusted index } SAVI = \frac{(1 + L)(NIR - red)}{NIR + red + L}, \text{ where } L \approx 0.5$$

$$\text{Enhanced vegetation index } EVI = \frac{p_{nir}^* - p_{red}^*}{p_{nir}^* + C_1 p_{red}^* - C_2 p_{blue}^* + L} (1 + L)$$

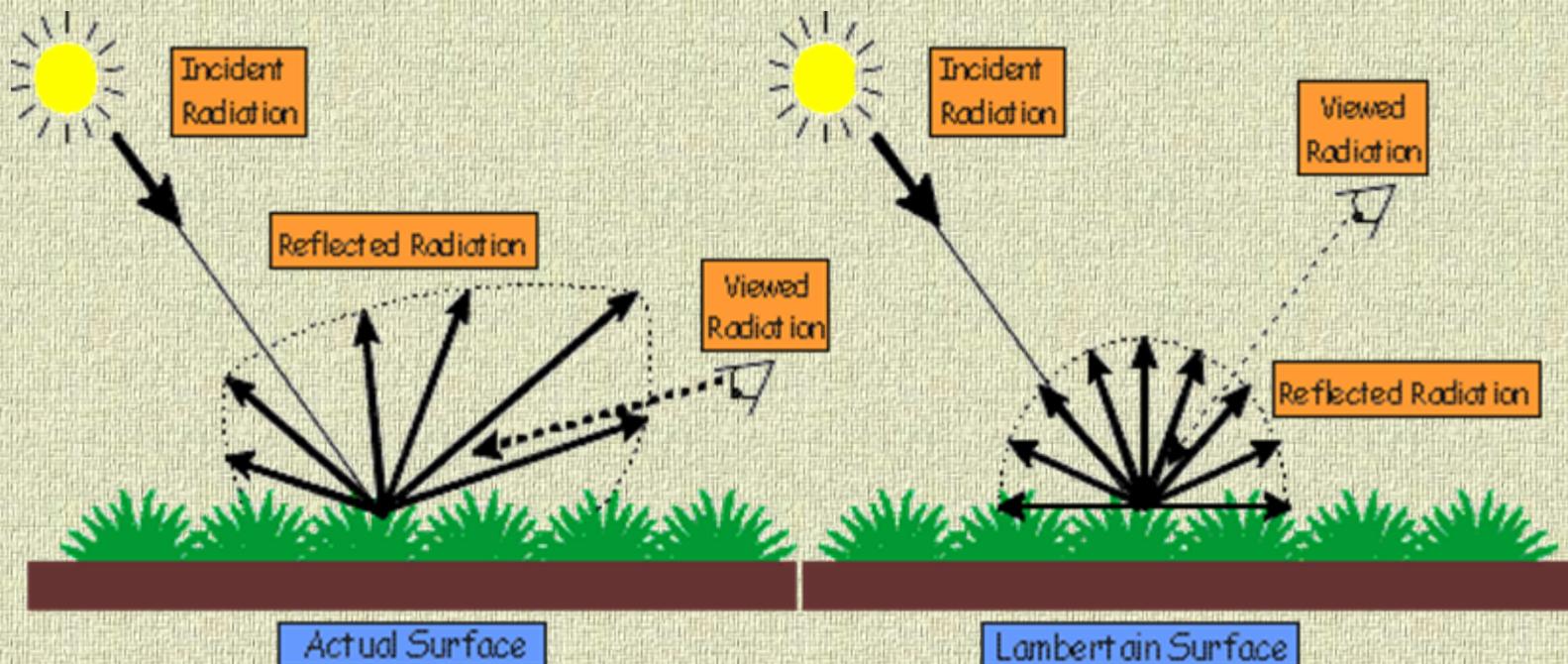
where the p^* terms are atmospherically corrected reflectances

The MODIS EVI, produced every 16 days

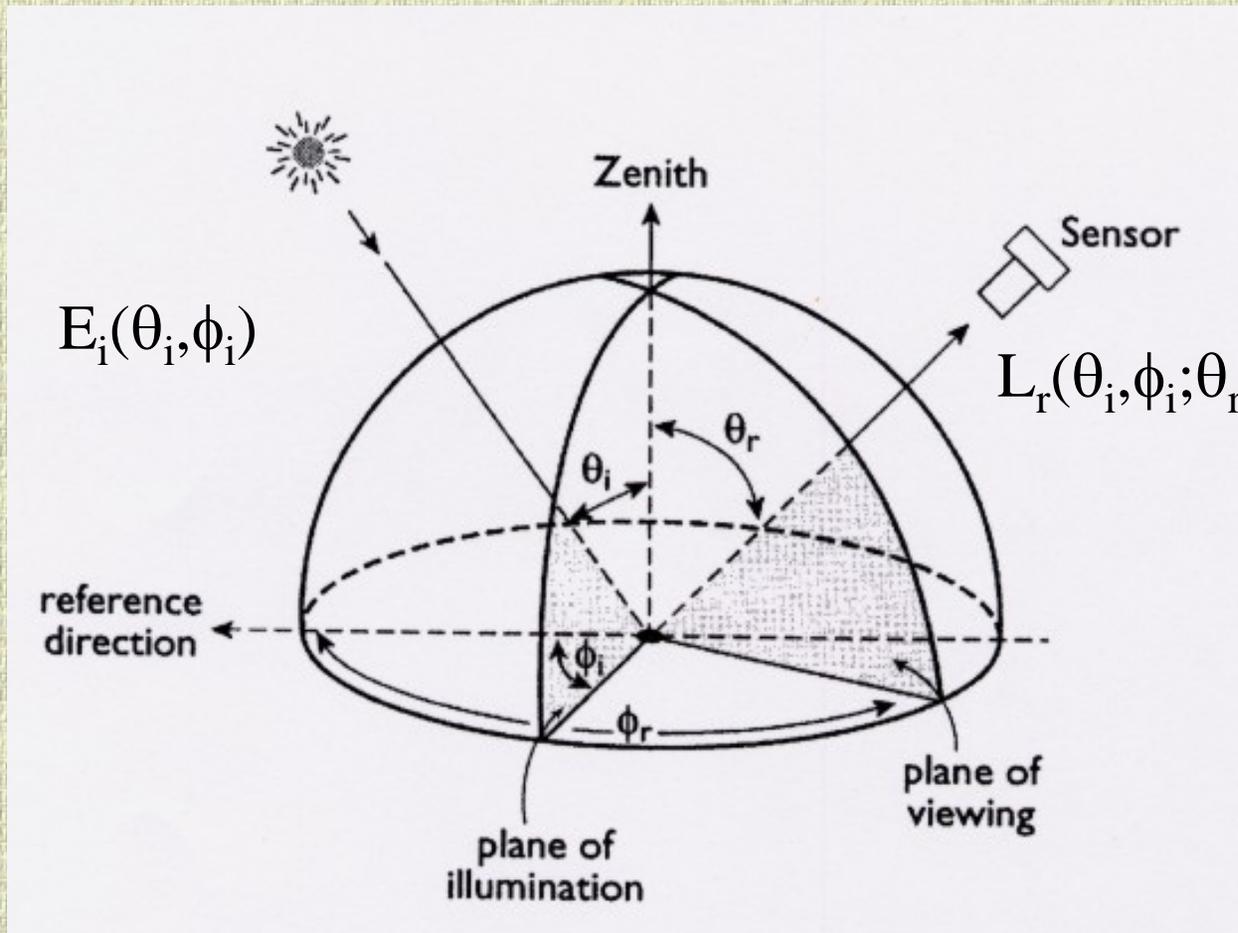


Bi-directional Reflectance Distribution Function (BRDF)

Light reflecting off of a surface is rarely isotropic. Most surfaces exhibit anisotropic reflectance (reflectance amount varies with direction).

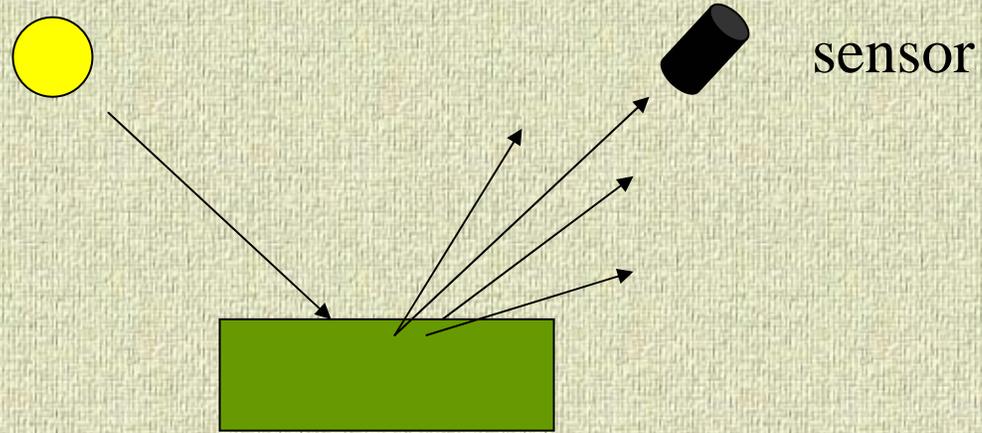


BRDF

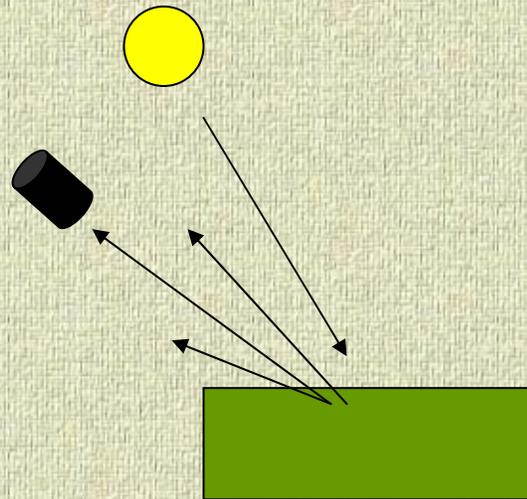


$$\text{BRDF} = L_r(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r) / E_i(\theta_i, \phi_i)$$

BRDF

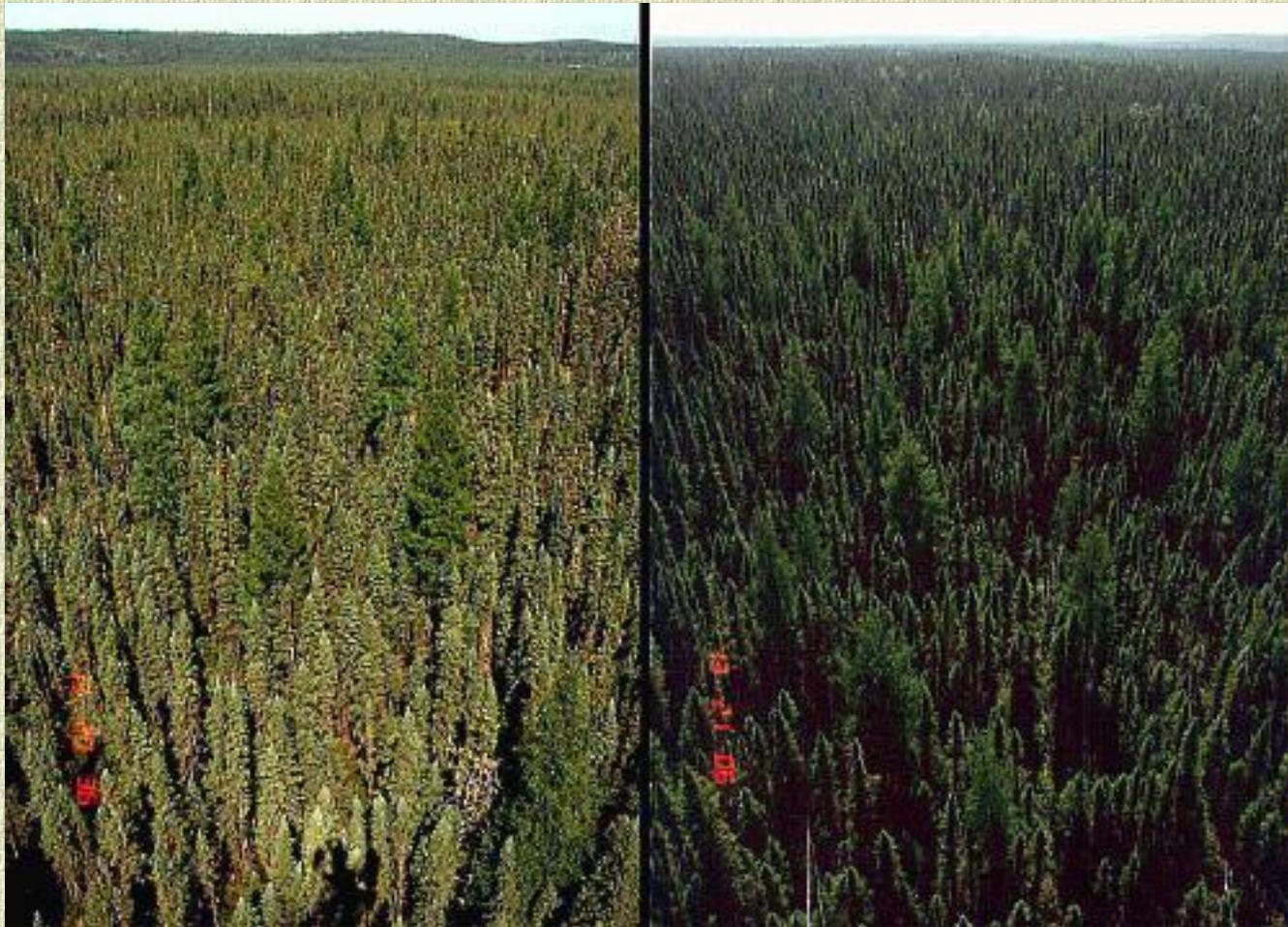


Forward scatter direction



Back scatter direction

BRDF



Backscatter direction

Forward scatter direction

BRDF



Backscatter direction

Forward scatter direction

Canopy BRDF is not constant as direction of illumination changes during day

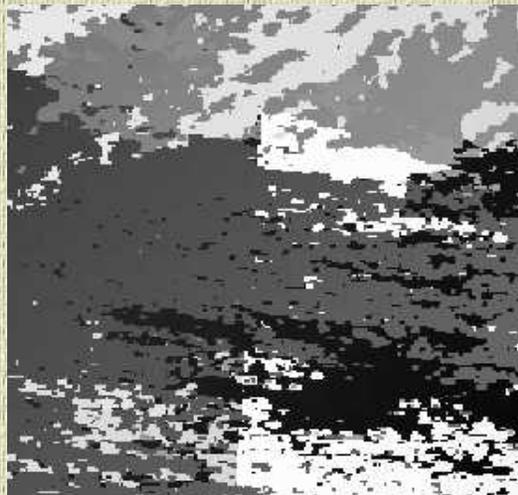


Угловые эффекты освещения и наблюдения поверхности : BRDF

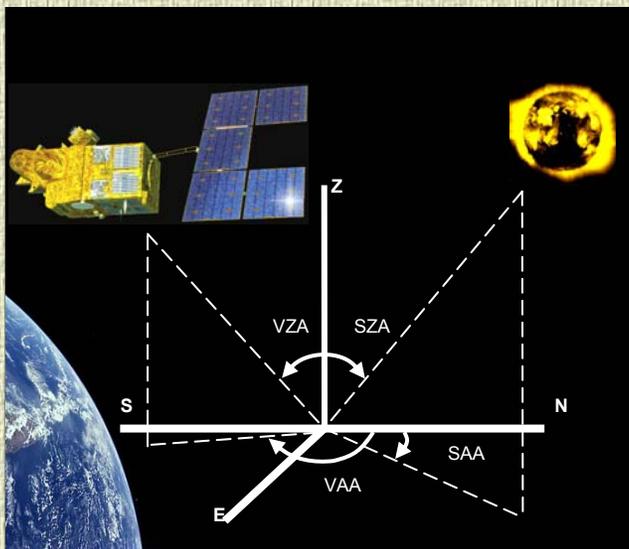
Изображение



VZA



SZA



VZA - зенитный угол наблюдения

SZA - зенитный угол Солнца

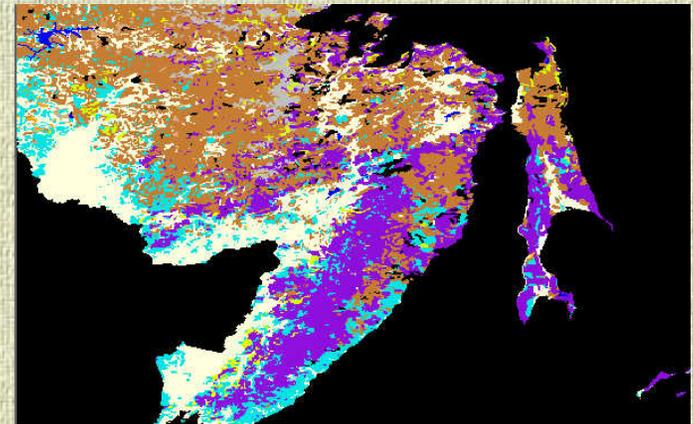
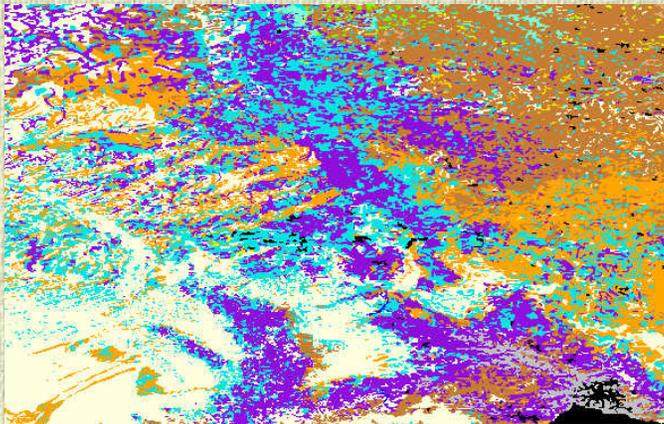
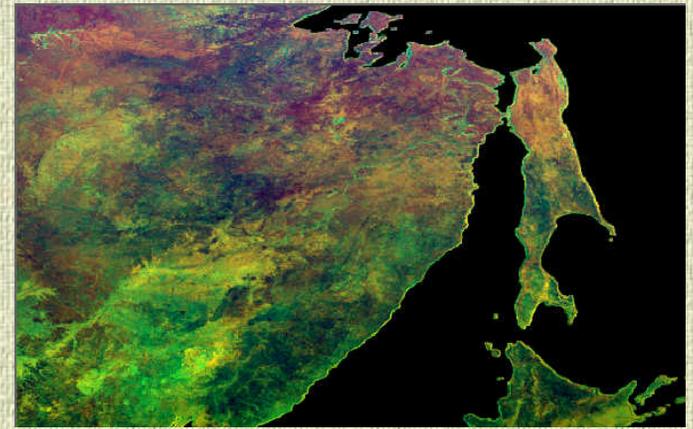
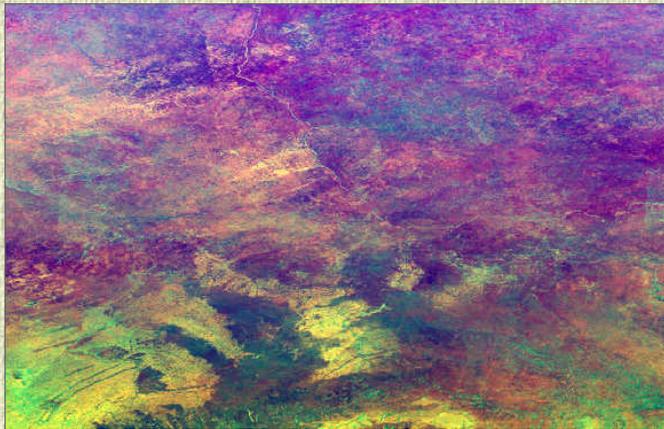
PAA - фазовый угол

Угловые характеристики наблюдений, выбранных по критерию $\max \text{NDVI}$

M(PHA)

M(VZA)

M(SZA)



Карта лесов
СССР

MRPV BRDF модель

$$\ln \frac{\rho_s^m}{H(\bar{\rho}, G)} = \ln \rho_o + (k - 1) \ln [\cos \theta_0 \cos \theta (\cos \theta_0 + \cos \theta)] - b_m \cos g$$

ρ_s^m

- коэффициент отражения поверхности

$H(\bar{\rho}, G)$

- hot-spot фактор

ρ_o, k, b_m

- параметры модели

θ_0, θ, g

- зенитный угол Солнца, зенитный угол наблюдения и фазовый угол соответственно

SAI - индексы анизотропности отражения поверхности

$$R_i^n = L_{ij}^1 + L_{ij}^2 R_j^n \quad \text{где} \quad R^n = \ln \frac{\rho_s^m}{H(\bar{\rho}, G)}$$

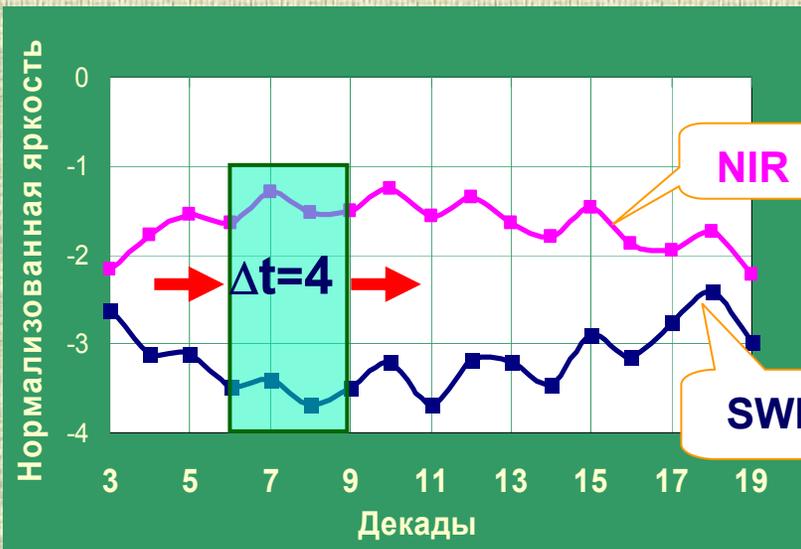
i и j - индексы спектральных каналов

R_i^n и R_j^n - нормализованные на hot-spot фактор значения коэффициента отражения в спектральных каналах i и j соответственно

L_{ij}^1 и L_{ij}^2 - коэффициенты линейного уравнения для пары спектральных каналов i и j

$$L_{ij}^1 - \text{SAI1} \quad L_{ij}^2 - \text{SAI2}$$

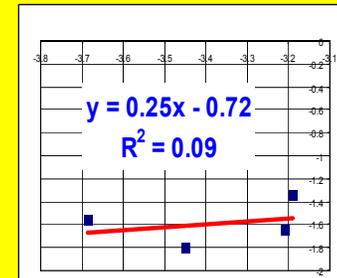
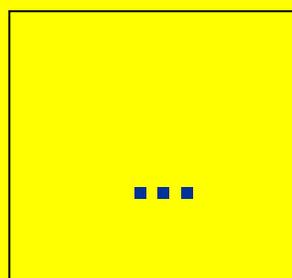
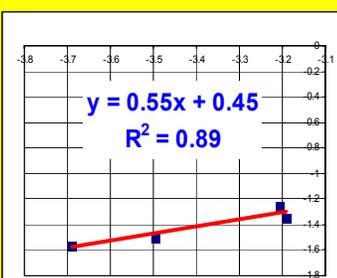
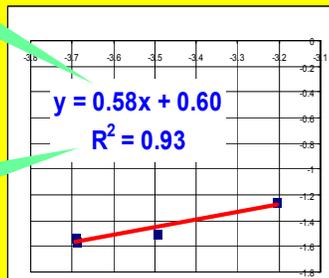
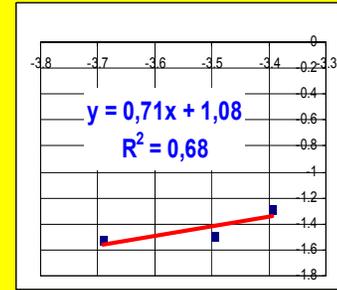
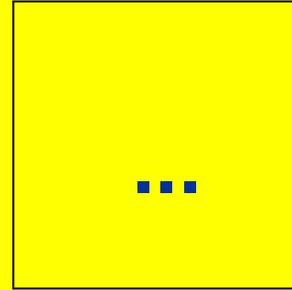
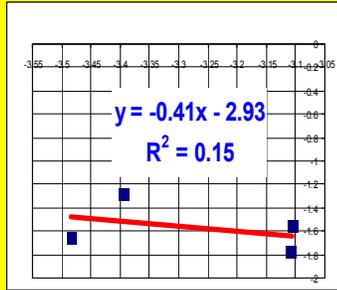
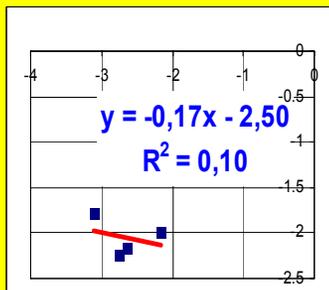
Оценка SAI по временным сериям наблюдений



Оценка **SAI1** и **SAI2** скользящим окном вдоль временного профиля наблюдений в спектральных каналах NIR и SWIR

SAI1 = 0.58

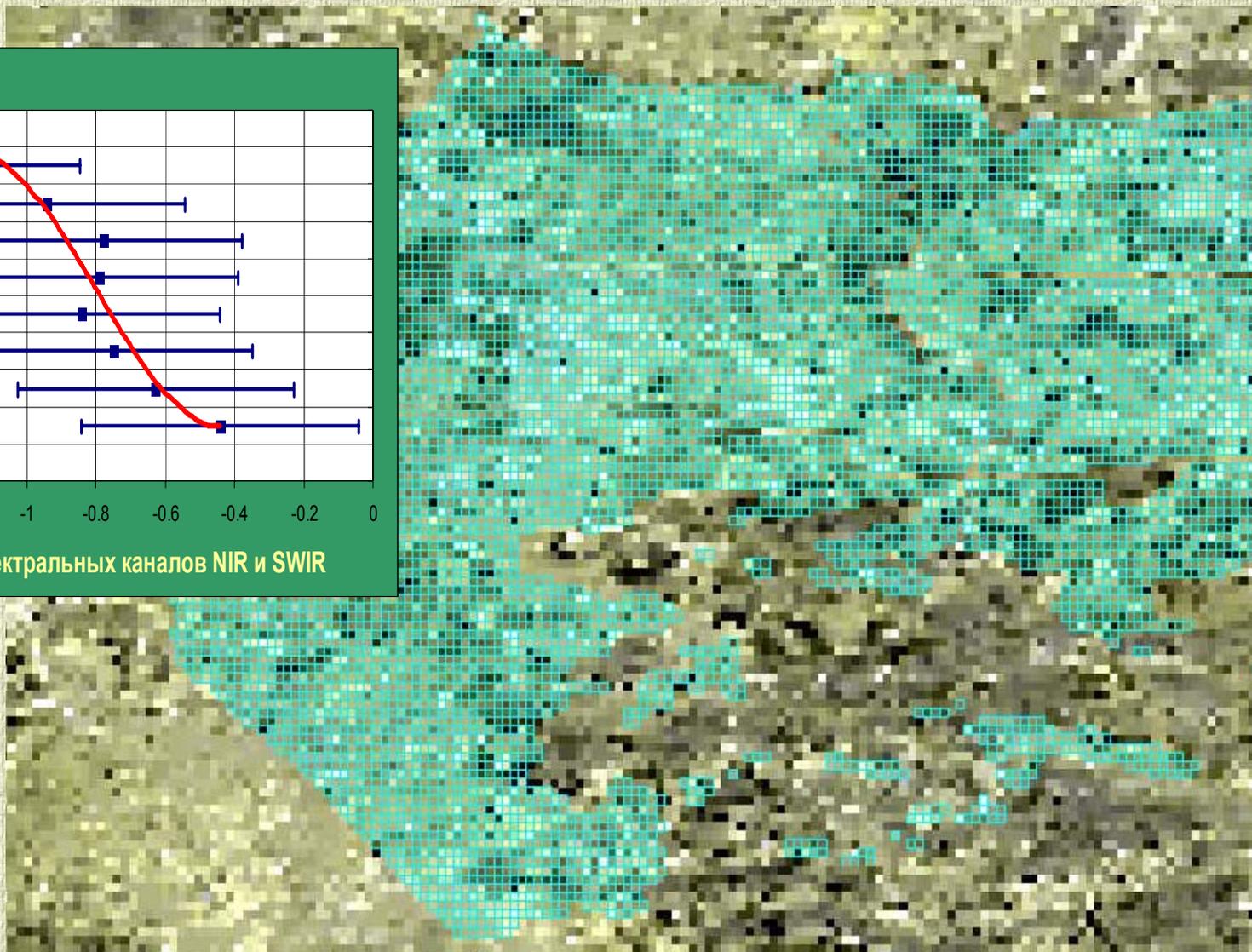
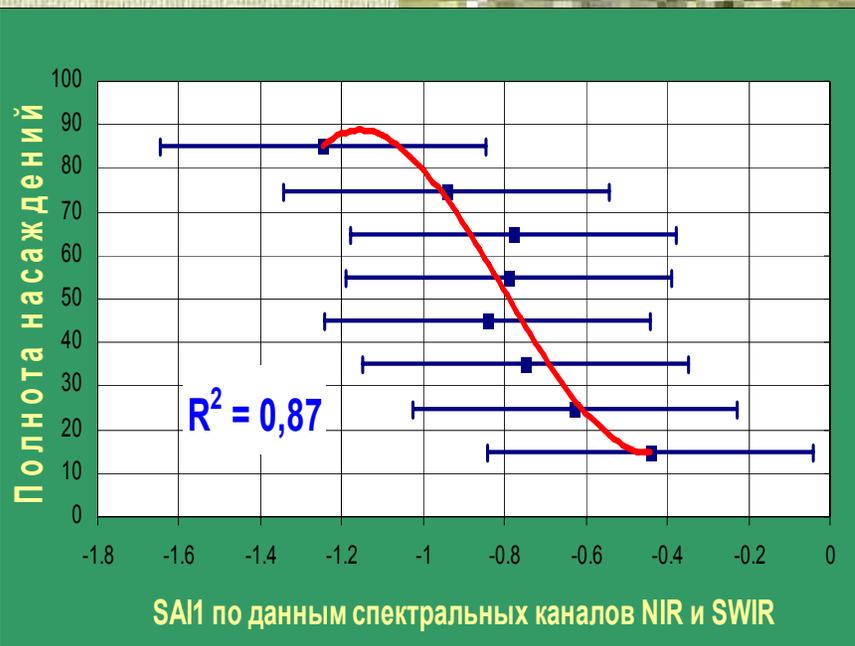
SAI2 = 0.60



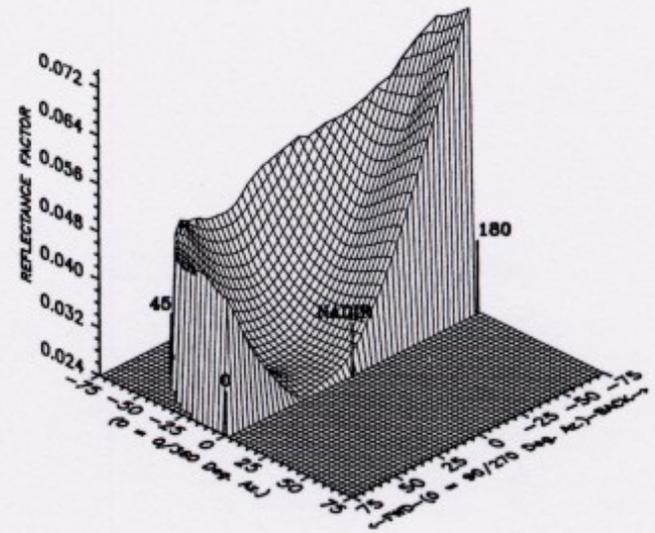
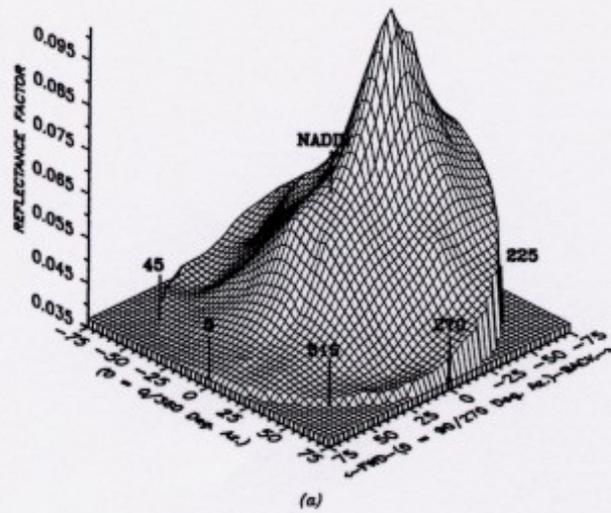
максимум

$R^2 = 0.93$

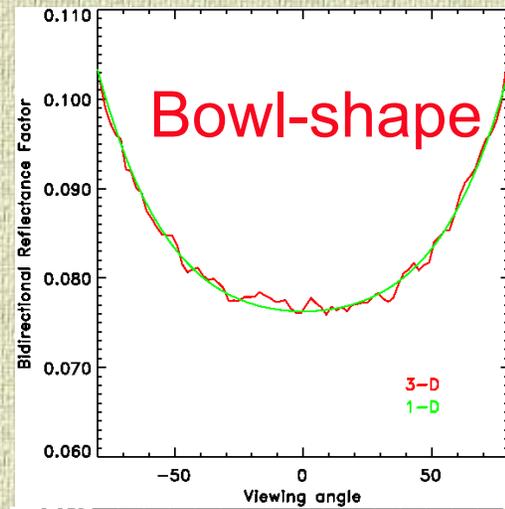
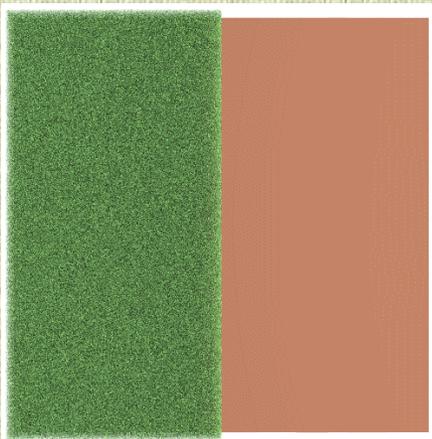
SAI и полнота лесных насаждений



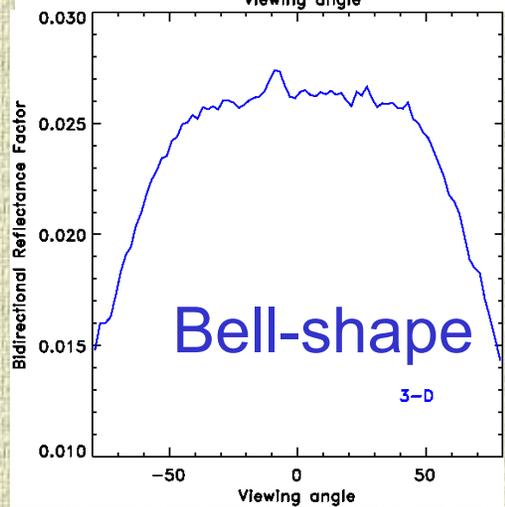
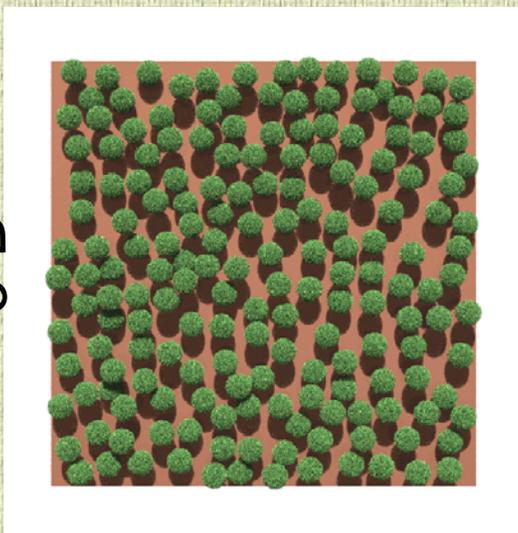
BRDF

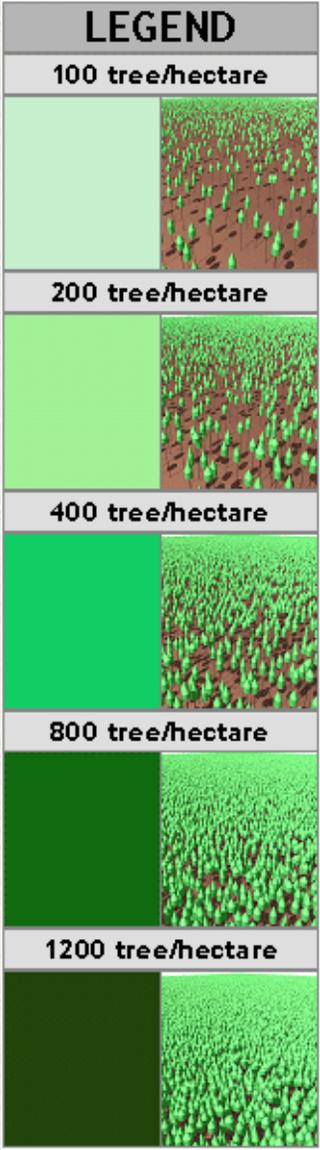


IPA



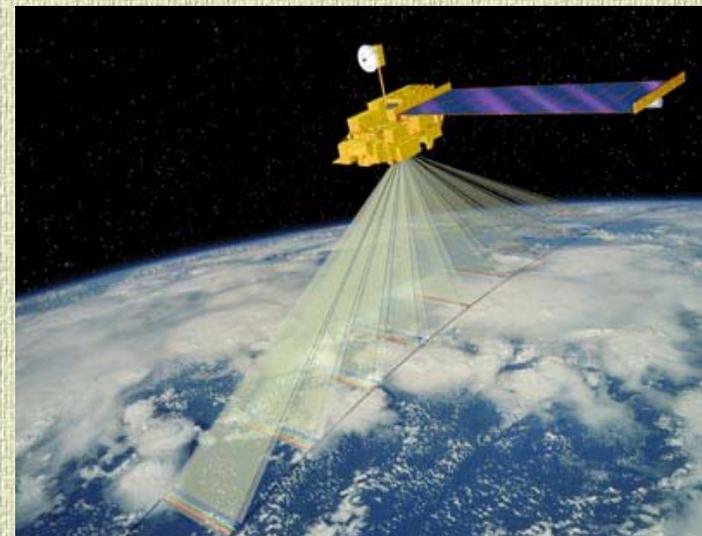
3-D



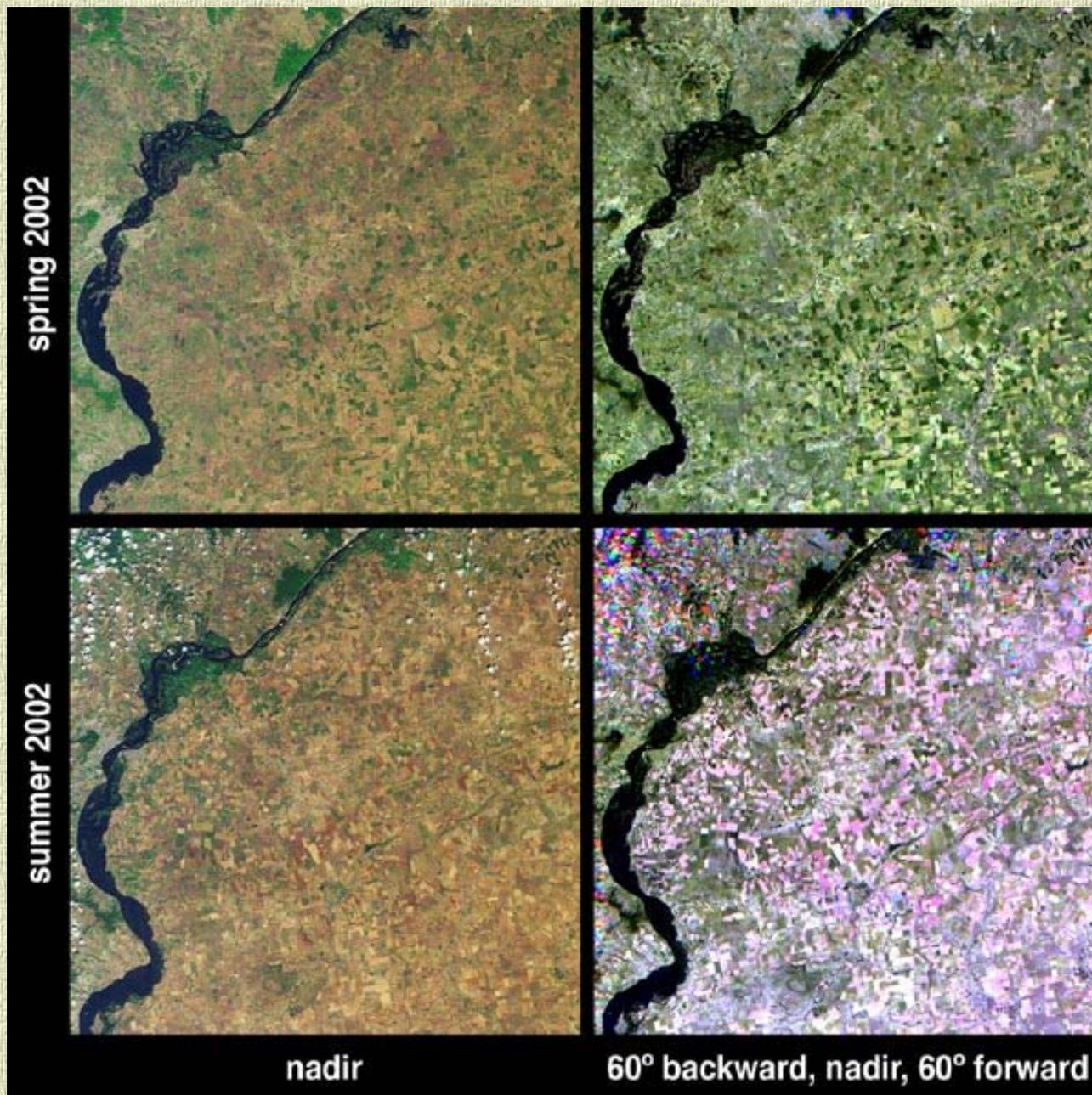


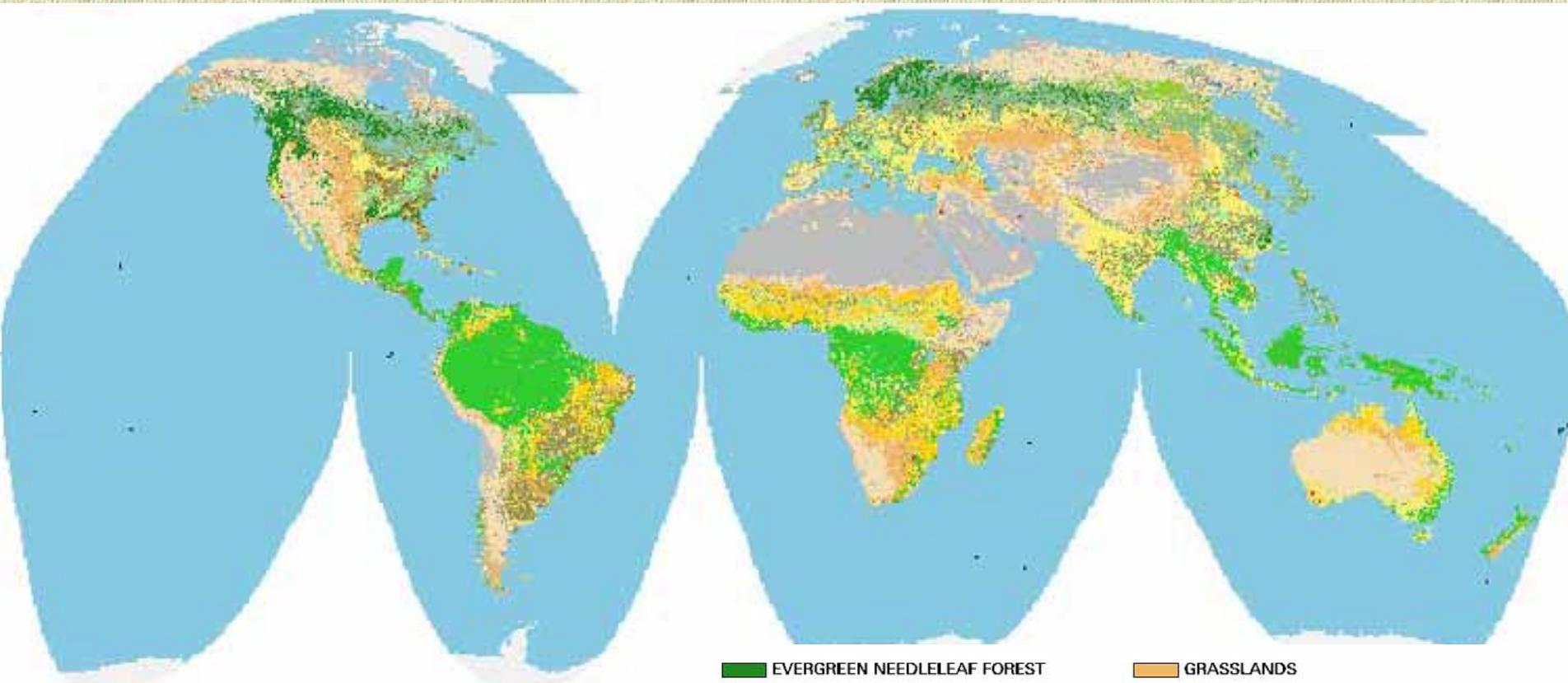
MISR: Multi-angle Imaging SpectroRadiometer

- Launched on Terra, 12/18/1999
- Exploits angular information in signal
 - Surface BRDF
 - Path lengths through atmosphere
- 4 spectral bands: blue, green, red, near-infrared
- 9 angles: 0° , fore and aft 26.1° , 45.6° , 60.0° , 70.5°
- Global coverage 2-9 days depending on latitude



MISR: Сельскохозяйственные земли в Саратовской области

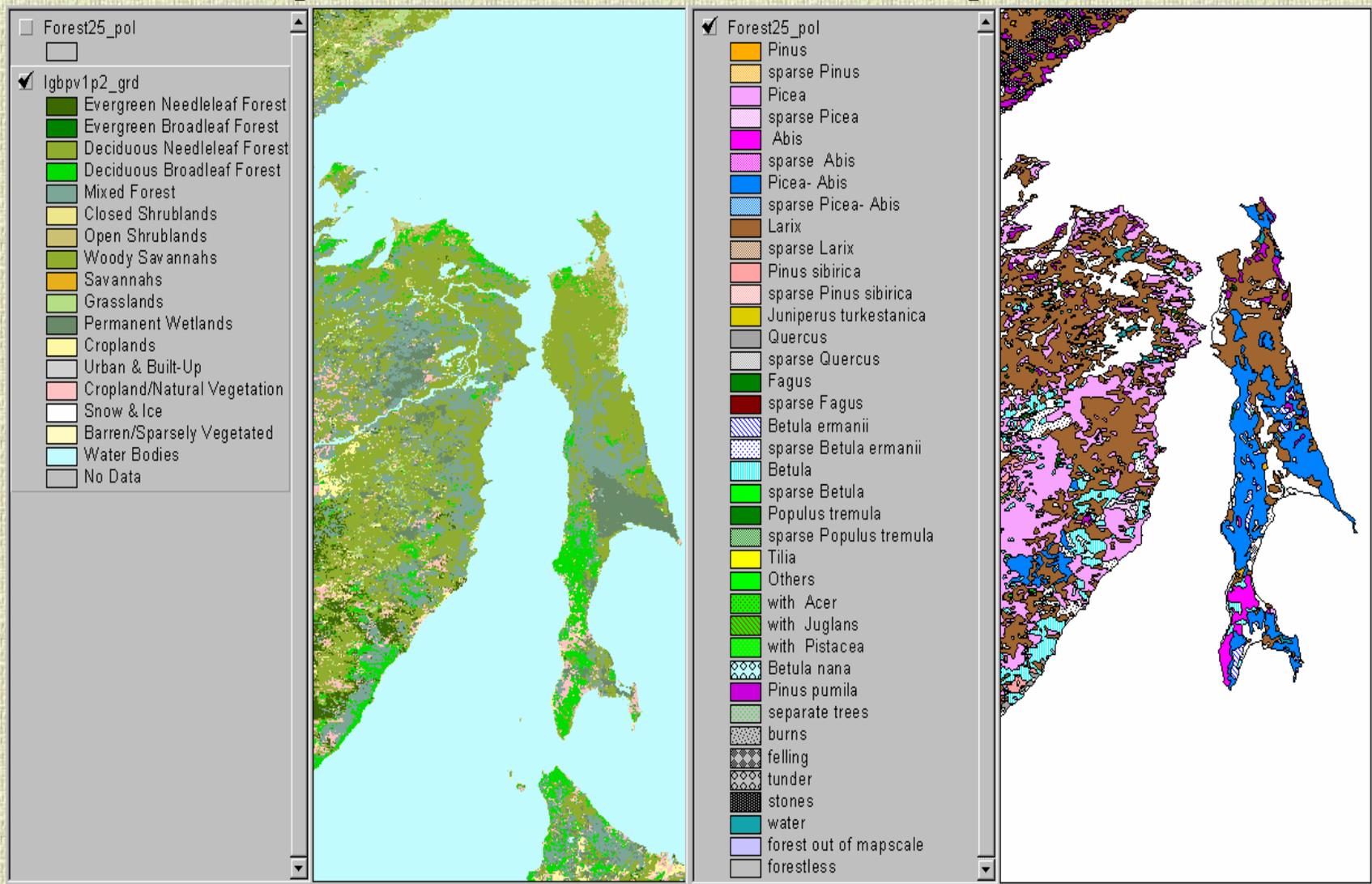




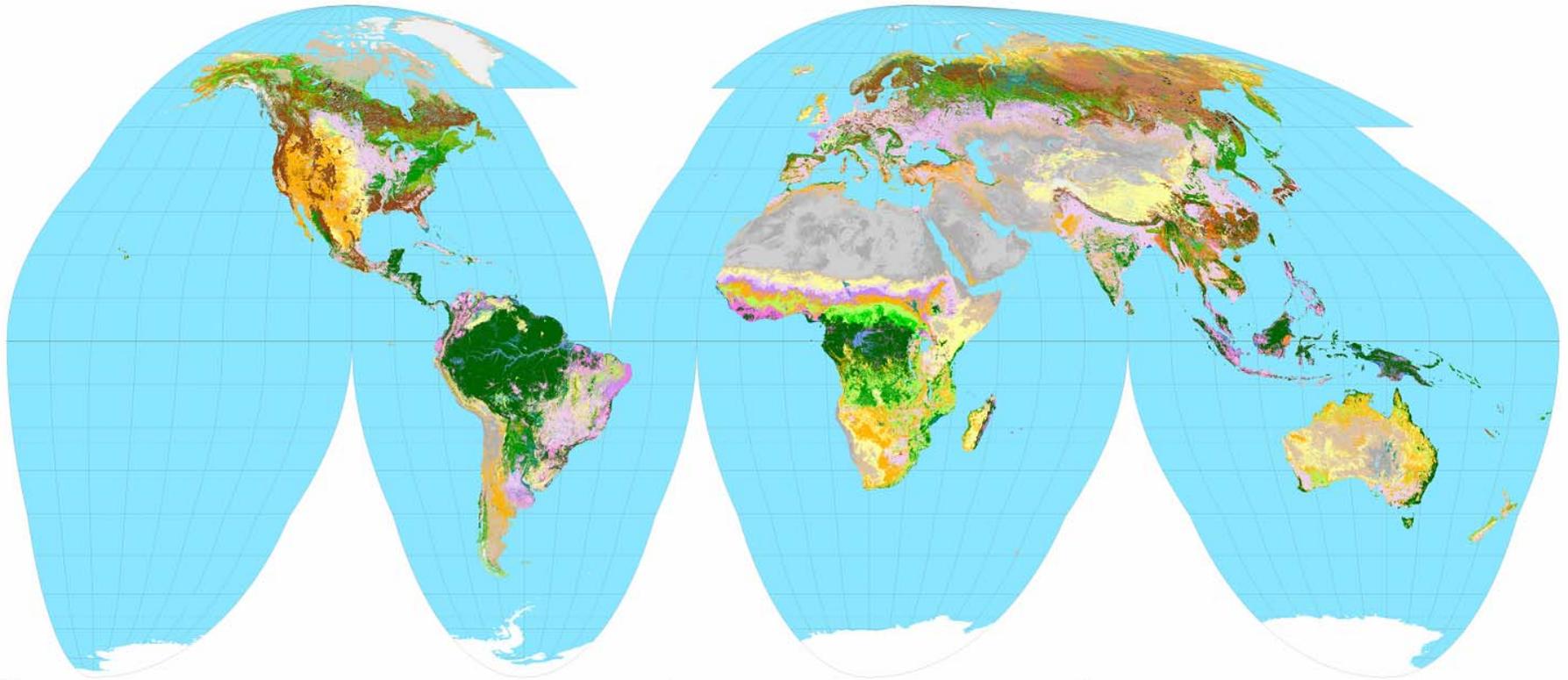
- | | |
|---|--|
| EVERGREEN NEEDLELEAF FOREST | GRASSLANDS |
| EVERGREEN BROADLEAF FOREST | PERMANENT WETLANDS |
| DECIDUOUS NEEDLELEAF FOREST | CROPLANDS |
| DECIDUOUS BROADLEAF FOREST | URBAN AND BUILT-UP |
| MIXED FORESTS | CROPLAND/NATURAL VEGETATION MOSAIC |
| CLOSED SHRUBLANDS | SNOW AND ICE |
| OPEN SHRUBLANDS | BARREN OR SPARSELY VEGETATED |
| WOODY SAVANNAS | WATER BODIES |
| SAVANNAS | |

Глобальная карта земного типов земного покрова полученная в рамках проекта IGBP DISCover по данным радиометра AVHRR со спутника серии NOAA

Comparison between the IGBP global land-cover map and the forest map of Russia



Global Land Cover 2000



Леса

	Лиственные вечнозеленые леса
	Лиственные листопадные леса: сомкнутые
	Лиственные листопадные леса: разреженные
	Хвойные вечнозеленые леса
	Хвойные листопадные леса
	Смешанные леса
	Леса в комплексе с другой естественной растительностью
	Поврежденные пожарами леса

Снега и льды

	Снега и льды
--	--------------

Сельскохозяйственные угодья

	Сельскохозяйственные угодья
	Сельскохозяйственные угодья в комплексе с лесами и другой естественной растительностью
	Сельскохозяйственные угодья в комплексе с травянистой и кустарниковой растительностью

Пустыни

	Песчаные
	Галечные
	Каменные

Другое

	Водные объекты
	Нет данных

Увлажненные земли

	Леса, регулярно затопляемые пресной или солоноватой водой
	Леса, регулярно затопляемые соленой водой
	Регулярно затопляемая травянистая или кустарниковая растительность

Травянистая и кустарниковая растительность

	Вечнозеленые кустарники
	Листопадные кустарники
	Травянистая растительность
	Разреженная травянистая или кустарниковая растительность

Урбанизированные территории

	Антропогенные объекты
--	-----------------------

Легенда карты типов земного покрова Северной Евразии

 ХВОЙНЫЕ ИСТОПАДНЫЕ
Deciduous Mixedleaf Forest

 СМЕТАННЫЕ С ПРЕОБЛАДАНИЕМ ИСТОПАННЫХ
Broadleaf \ Mixedleaf Forest

 СМЕТАННЫЕ
Mixed Forest

 СМЕТАННЫЕ С ПРЕОБЛАДАНИЕМ ХВОЙНЫХ
Mixedleaf \ Broadleaf Forest

 ИСТОПАННЫЕ
Deciduous Broadleaf Forest

 ХВОЙНЫЕ ВЕЧНОЗЕЛЕННЫЕ
Evergreen Mixedleaf Forest

БОБЕГІС \ ЦЕСУ

 ЦРНОБРЕЖНЯЯ ТРАВЯНО-КУСТАРНИКОВАЯ РАСТИТЕЛЬНОСТЬ
Riparian Vegetation

 ТРАВЯНО-МОШАЖИННЫЕ БОЛОТНЫЕ КОМПЛЕКСЫ
Raisa Bog

 БОЛОТА
Bog and Marsh

МЕТГАИДС \ ВОДНО-БОЛОТНЫЕ КОМПЛЕКСЫ

 ИСТОПАННЫЕ
Broadleaf Deciduous Shrubs

 ХВОЙНЫЕ ВЕЧНОЗЕЛЕННЫЕ
Mixedleaf Evergreen Shrubs

ЭНКУВГАИДС \ КУСТАРНИК

 КУСТАРНИКОВАЯ
Shrub Tundra

 ТРАВЯНИСТАЯ
Sedge Tundra

 КУСТАРНИКОВАЯ
Prostrate Shrub Tundra

 ПОЛЯНАЯ
Barren Tundra

ТУИДКА \ ТУИДКА

 СТЕП
Steppe

 ТУЛА
Humid Grassland

ТРАВЯНИСТАЯ РАСТИТЕЛЬНОСТЬ
GRASSLAND \

OTHER VEGETATION TYPES AND COMPLEXES / ДРУГАЯ РАСТИТЕЛЬНОСТЬ И РАСТИТЕЛЬНЫЕ КОМПЛЕКСЫ

 Recent Burns
Свежие лесные гари

 Croplands
Сельскохозяйственные земли

 Forest - Natural Vegetation Complex
Леса в комплексе с другой естественной
растительности

 Forest - Cropland Complex
Леса в комплексе с сельскохозяйственными
землями

 Cropland - Grassland Complex
Сельскохозяйственные земли в комплексе
с лугами

NON-VEGETATED LAND COVER TYPES / НЕПОКРЫТЫЕ РАСТИТЕЛЬНОСТЬЮ ЗЕМЛИ

 Bare soil and Rock
Пустыня и гольцы

 Permanent snow / ice
Вечные снега и льды

 Inland water bodies
Реки и внутренние водоемы

 Urban
Урбанизированные территории

 Salt-pans
Солончаки

 Country borders
Границы государств

SPOT 4 – VEGETATION Инструмент

пространственное разрешение :

- ✓ 1.15 км при наблюдении в надир
- ✓ 1.7 км при отклонении оси визирования до +/- 50°

спектральные диапазоны :

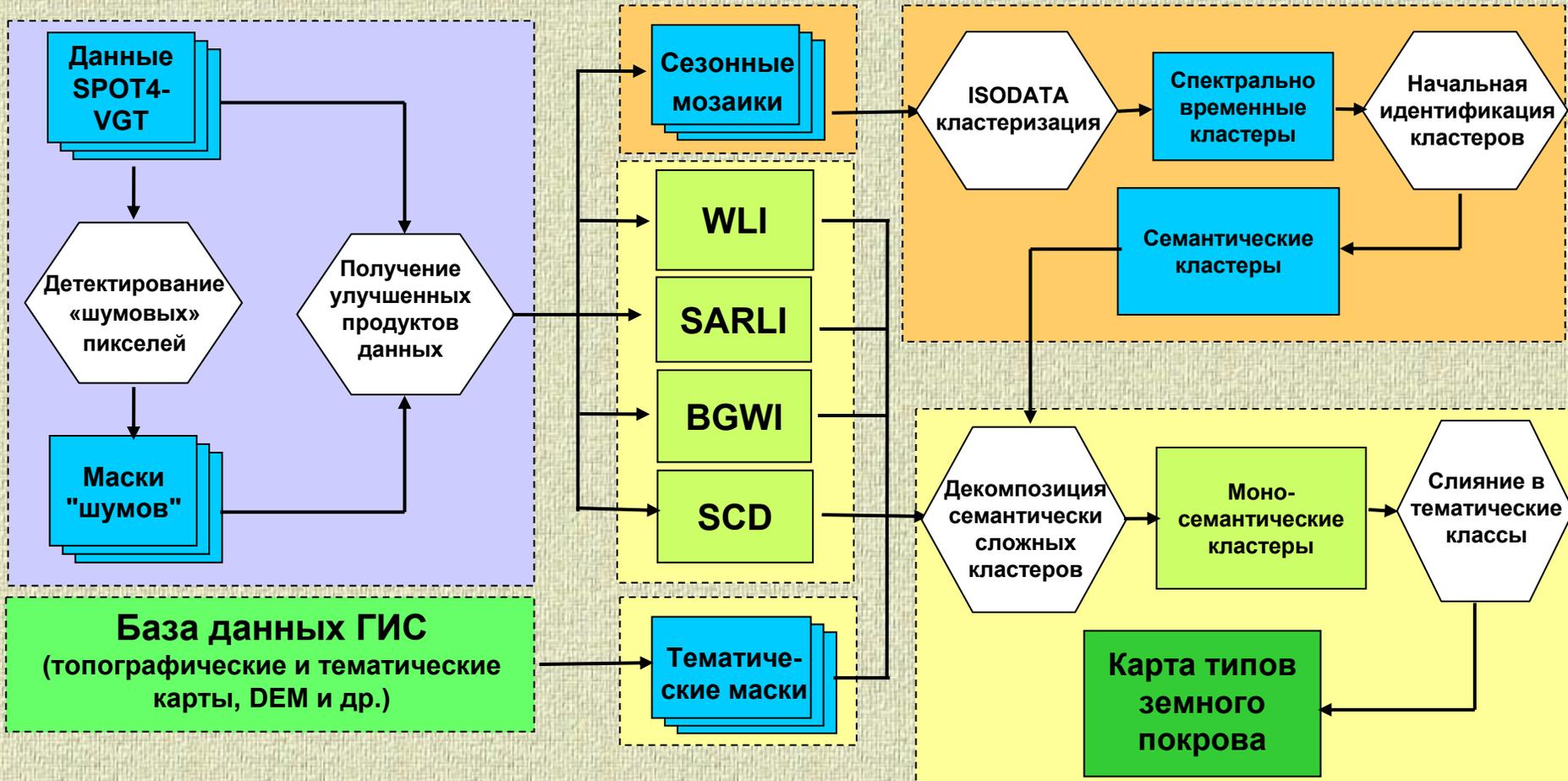
- ✓ 0.43 – 0.47 мкм
- ✓ 0.61 – 0.68 мкм
- ✓ 0.78 – 0.89 мкм
- ✓ 1.58 – 1.75 мкм



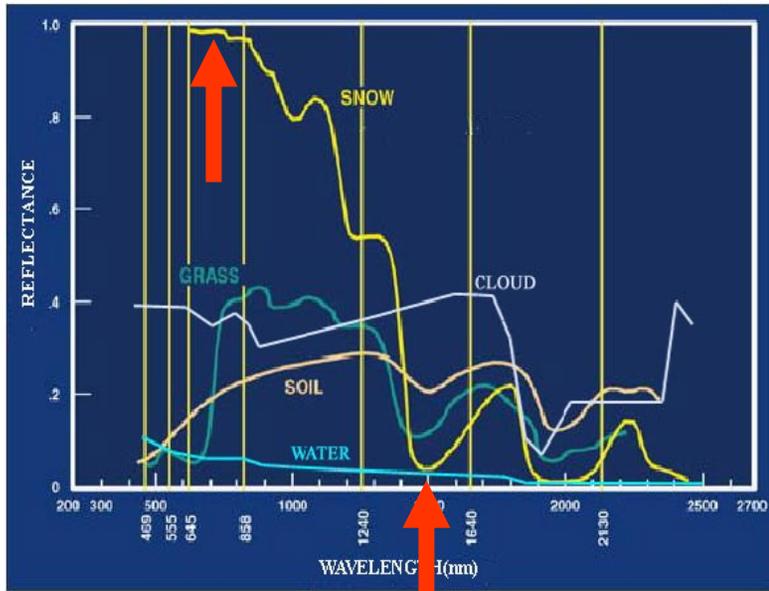
Метод анализа данных

Этап 1: Предварительная обработка изображений и получение улучшенных продуктов данных

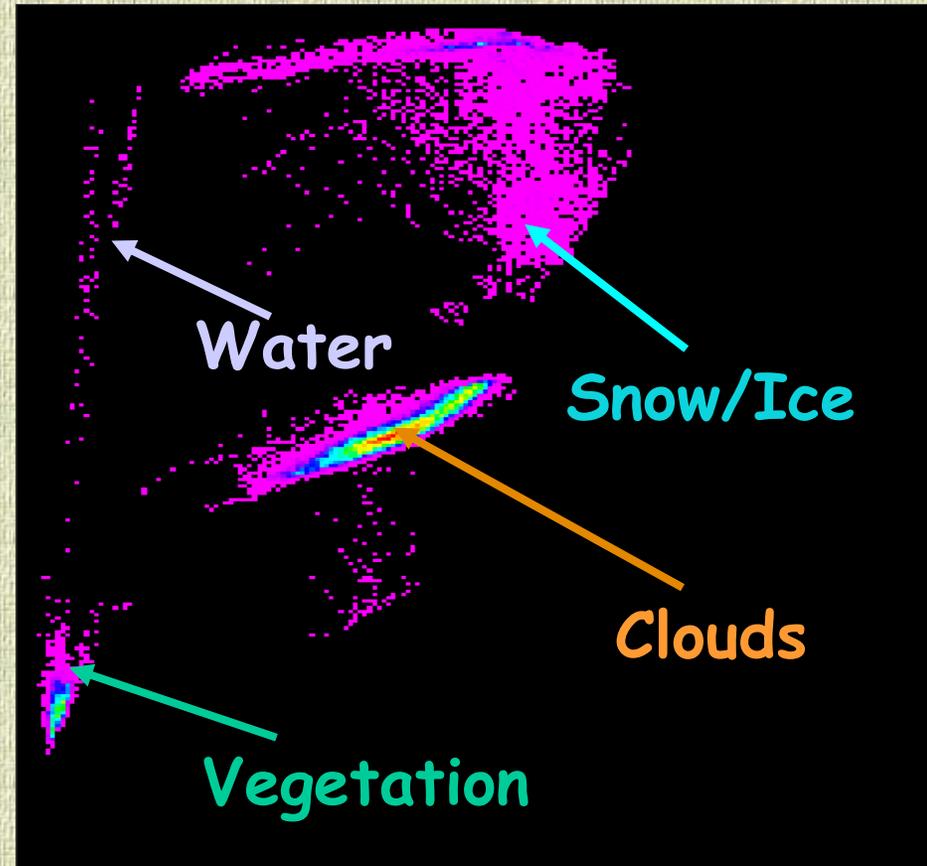
Этап 2: Классификация и тематический анализ данных



Нормализованный Разностный Индекс Снега : NDSI



NDSI

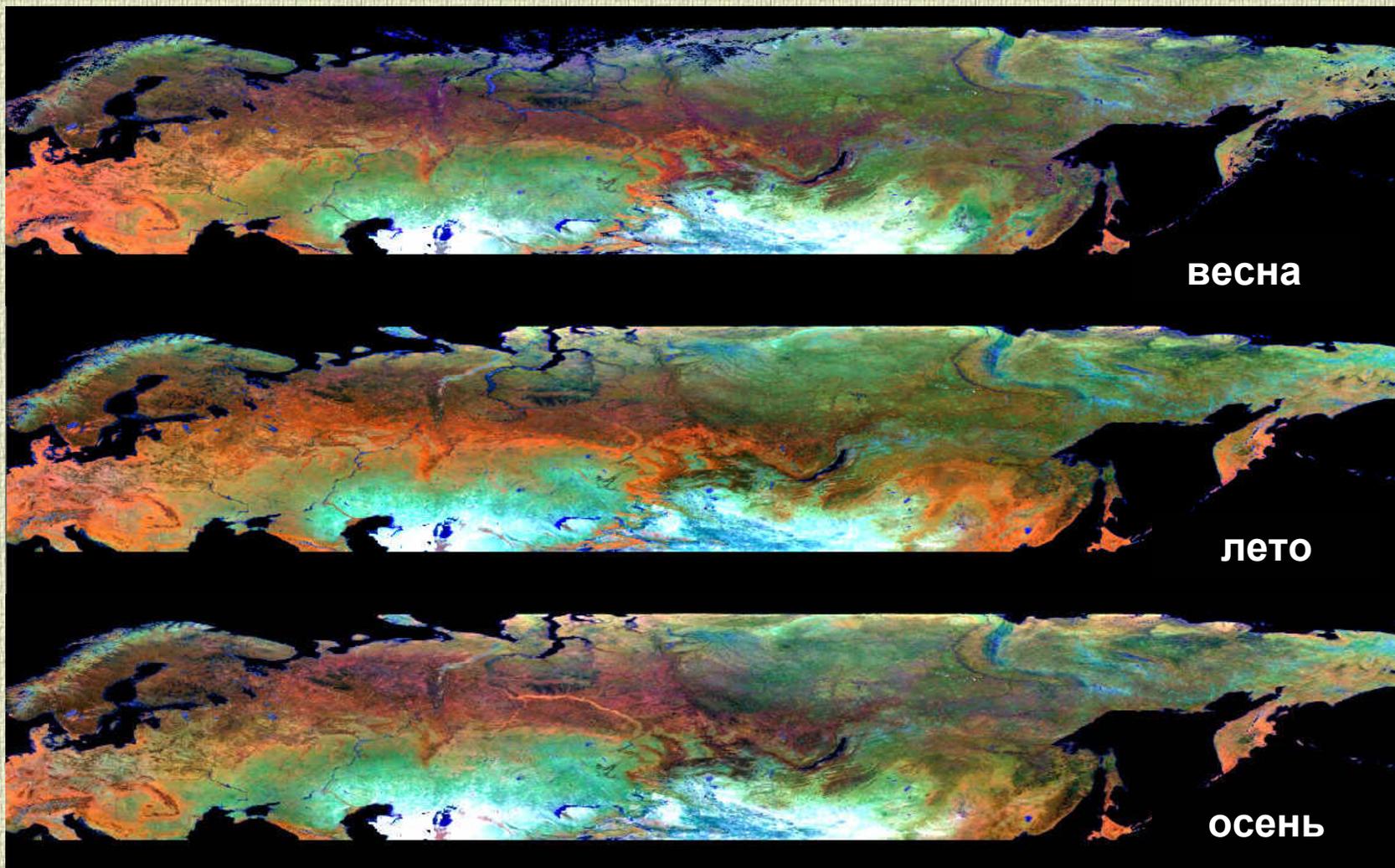


Red channel

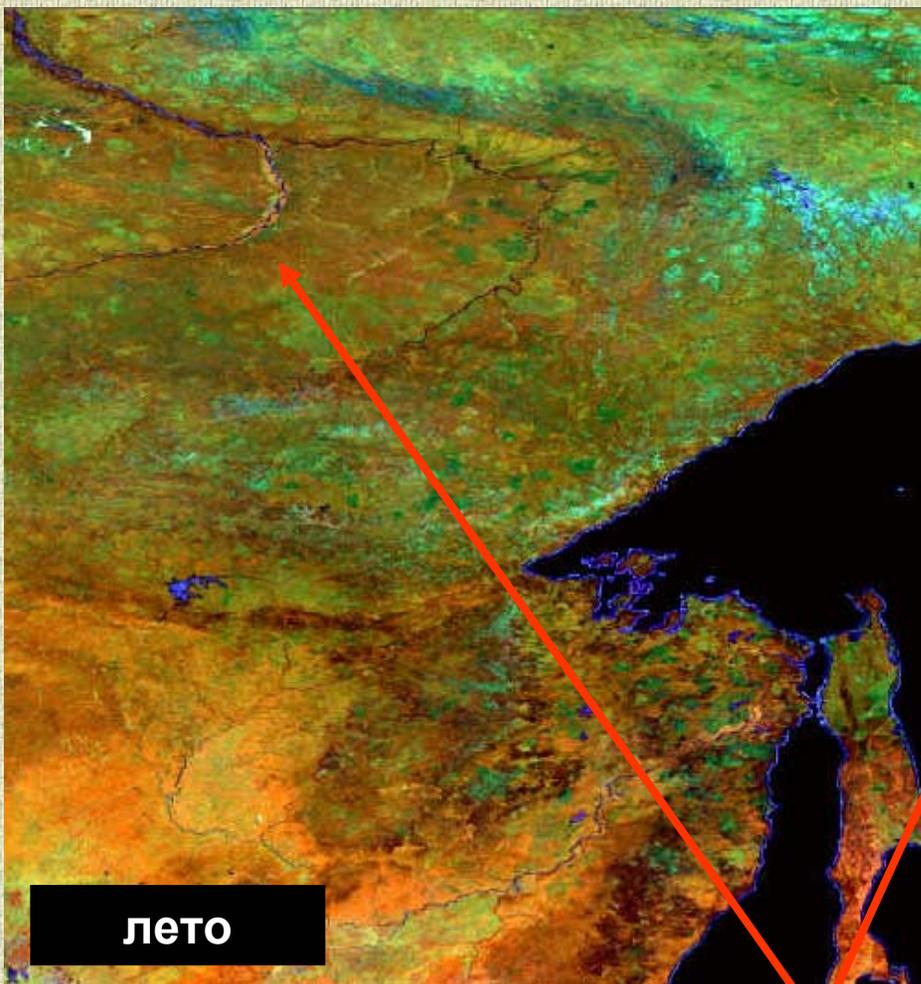
$$NDSI = \frac{R_{blu} - R_{swir}}{R_{blu} + R_{swir}}$$

From Hall et al., 1998: "Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) for the MODIS Snow-, Lake Ice- and Sea Ice-Mapping Algorithms. Version 4.0"

Сезонные мозаики изображений

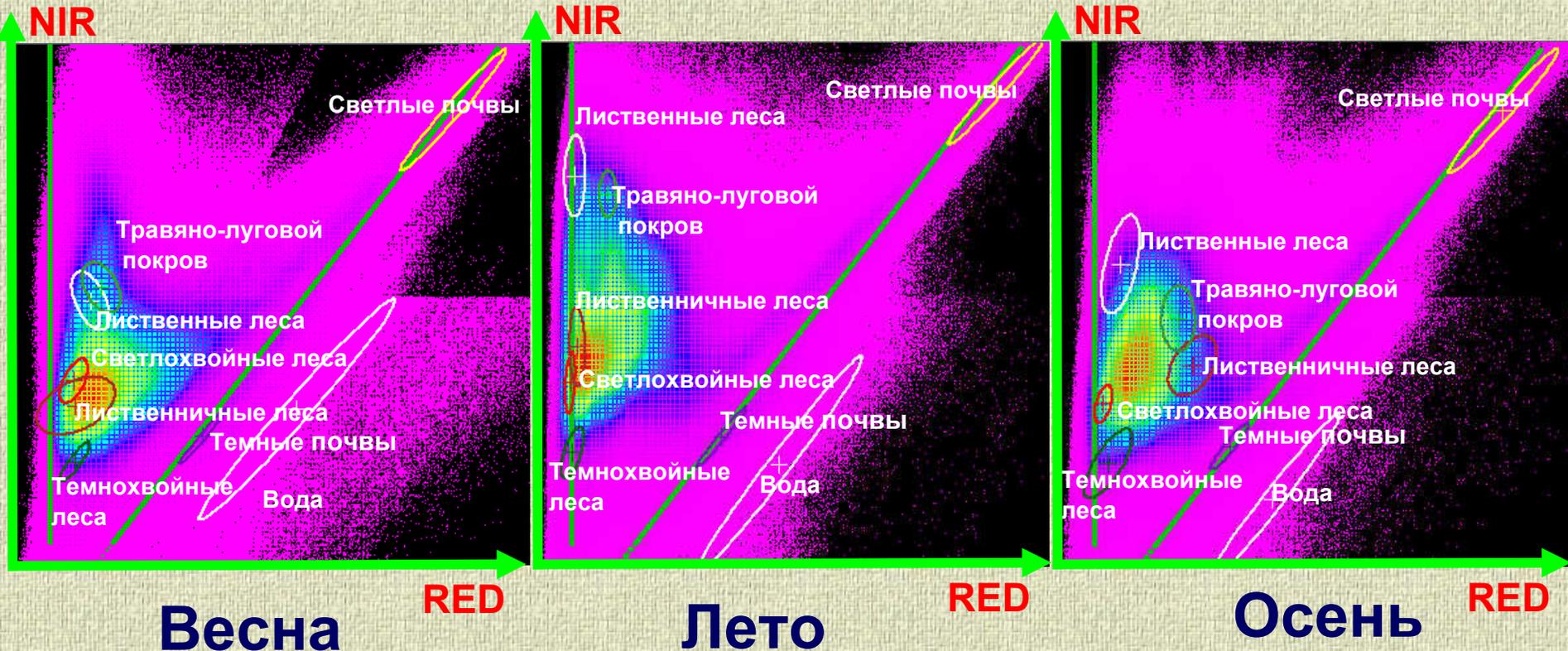


Фенологические изменения в лесах

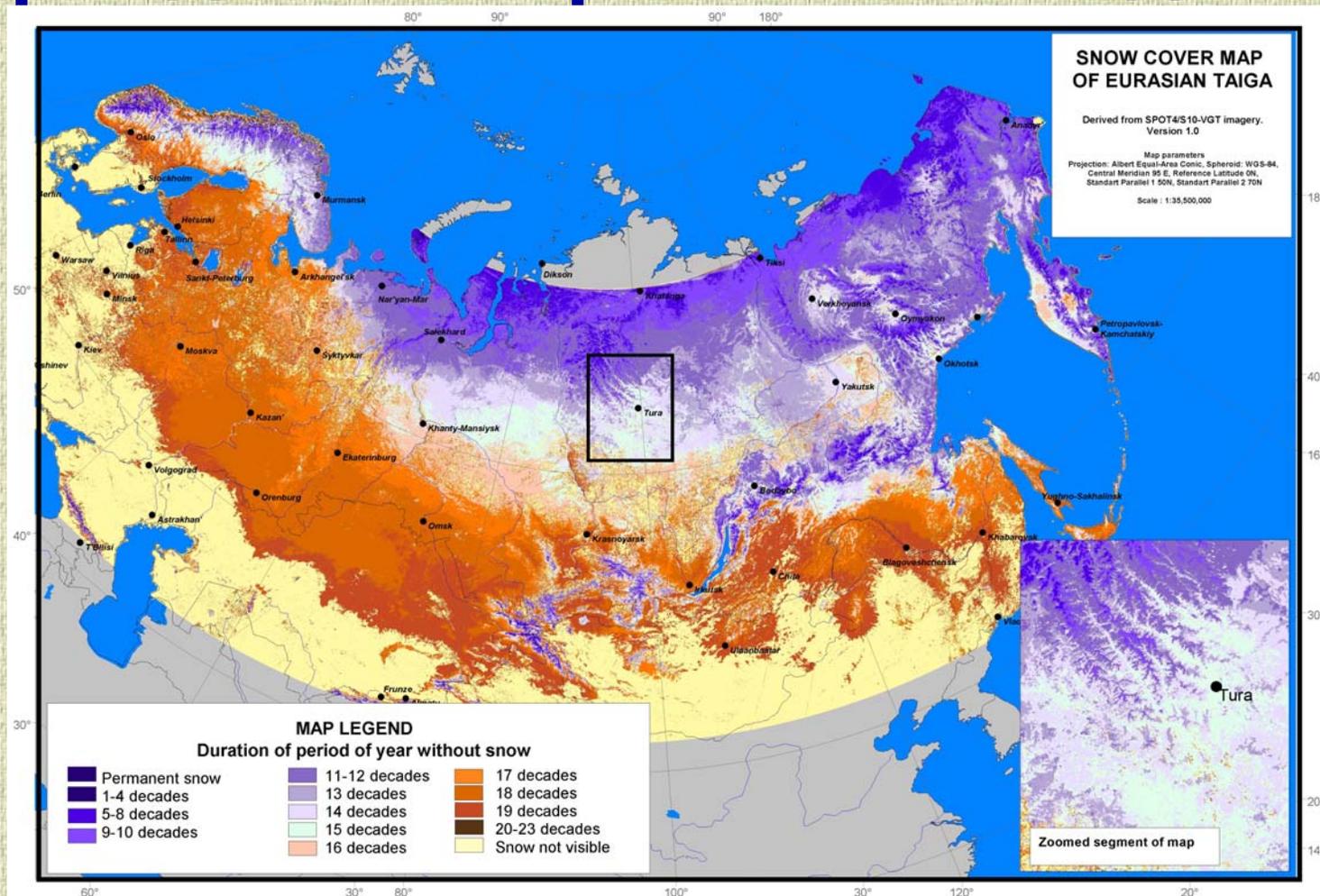


Насаждения лиственницы в Якутии

Интерпретация кластеров в RED-NIR пространстве спектральных признаков

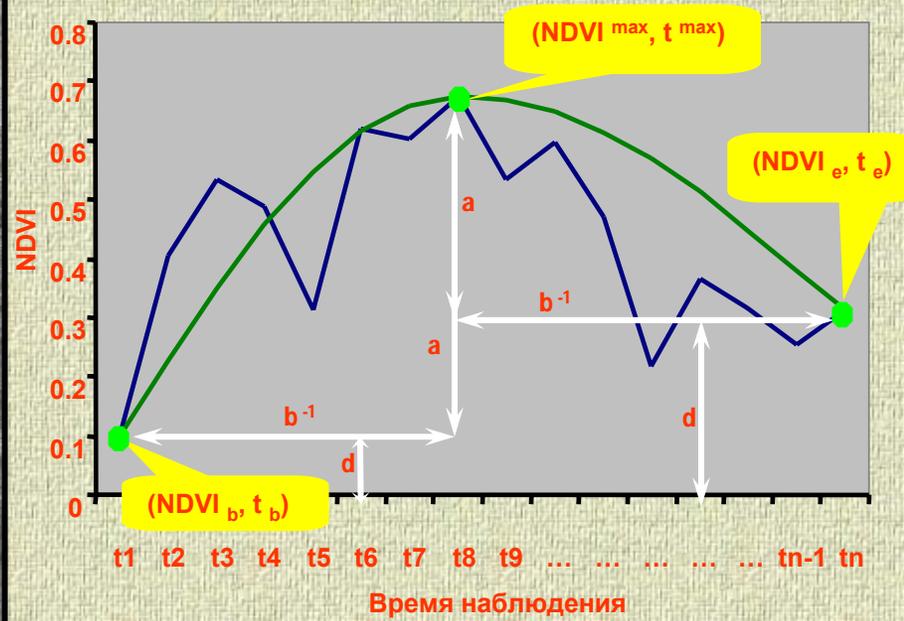
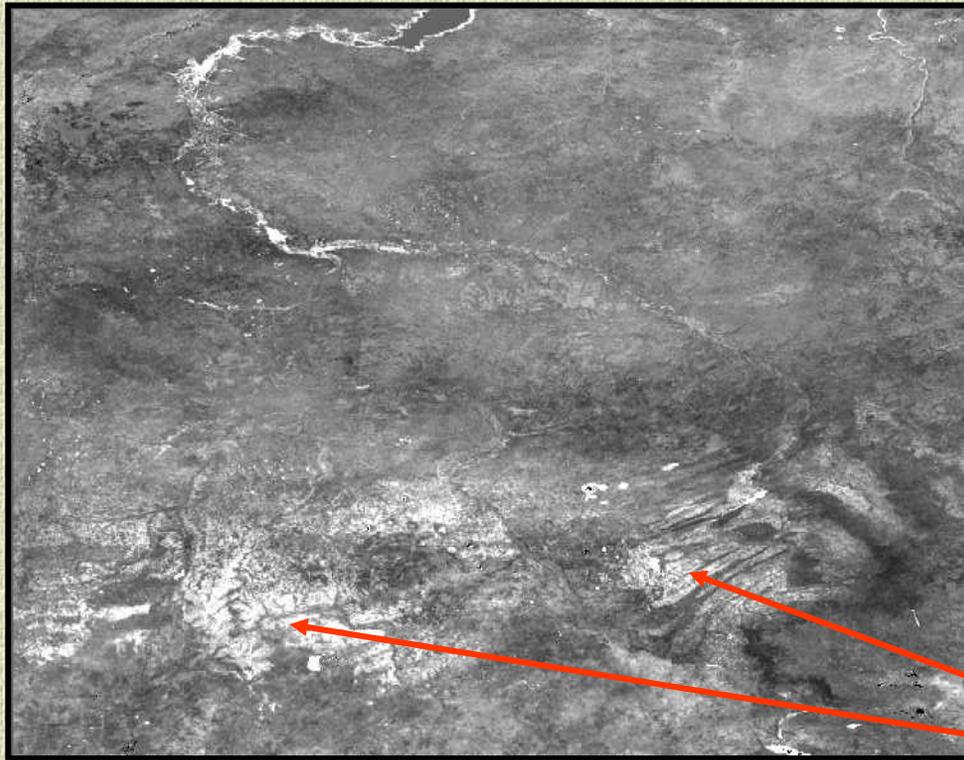


Продолжительность бесснежного периода в интервале наблюдений



Рассматриваемый интервал наблюдений 21.03.1999 - 11.11.1999

Индекс Волнового Подобия - WLI



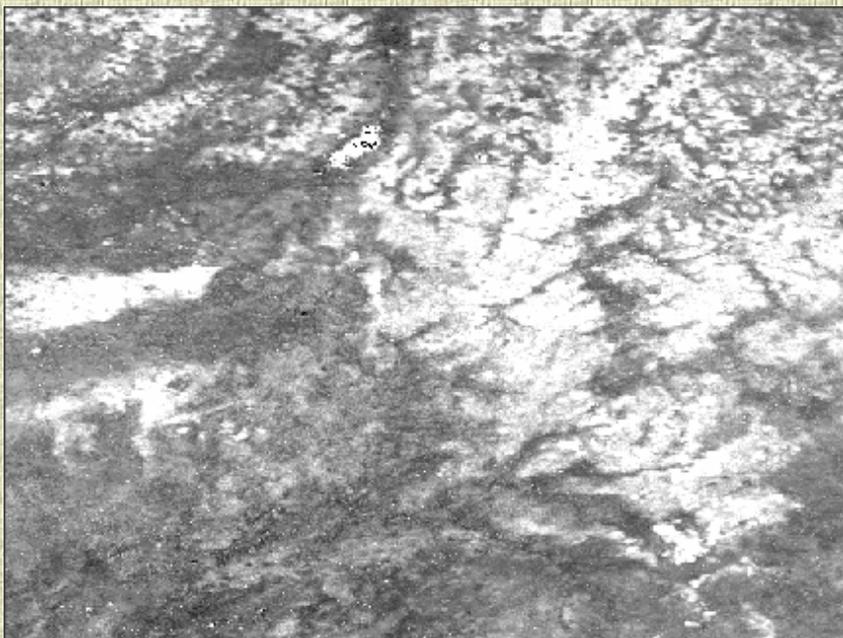
Пахотные земли

$$WLI = \frac{\sum_t NDVI^p - \sum_t NDVI}{\sum_t NDVI}$$

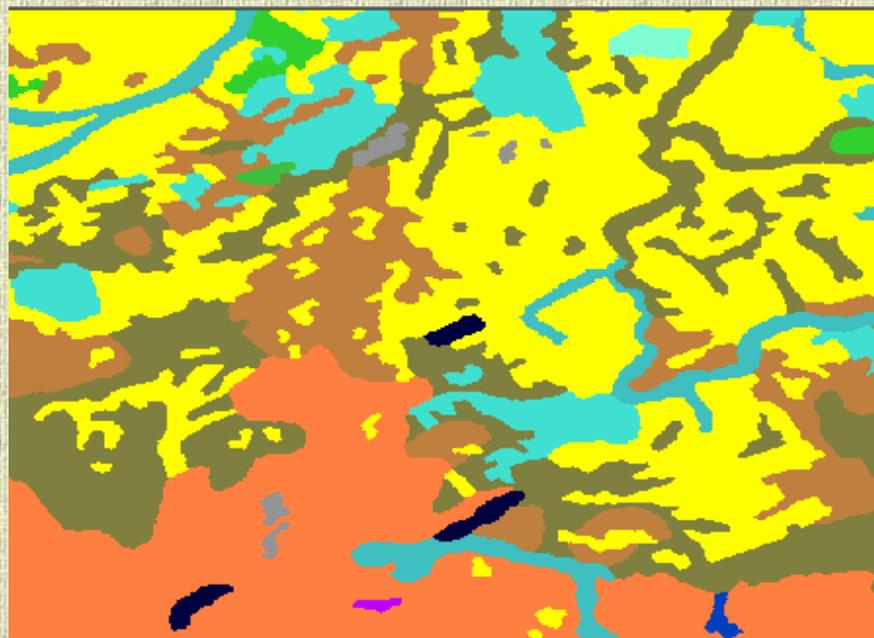
где $NDVI^p = a * \sin\left(\frac{\pi}{2} * (b * t + c)\right) + d$

Сравнение изображения WLI и карты использования земель Казахстана

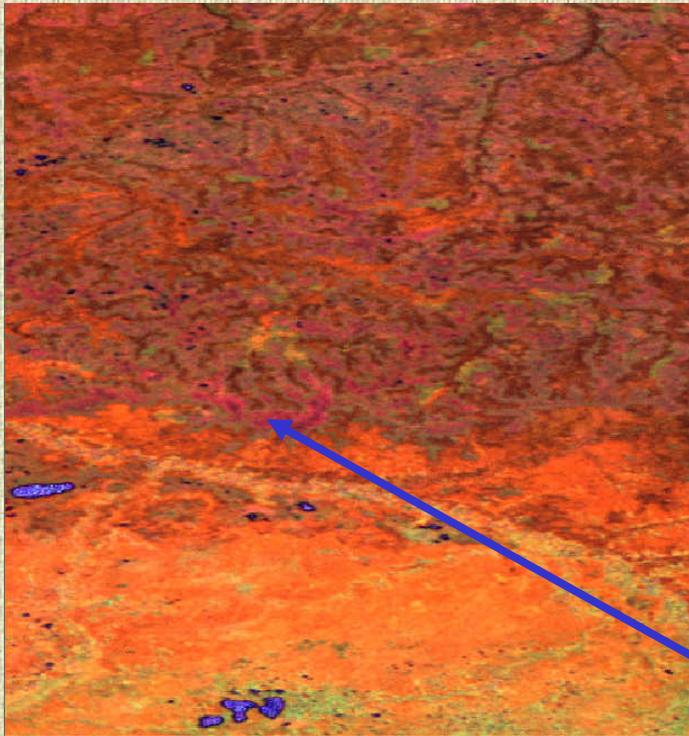
WLI



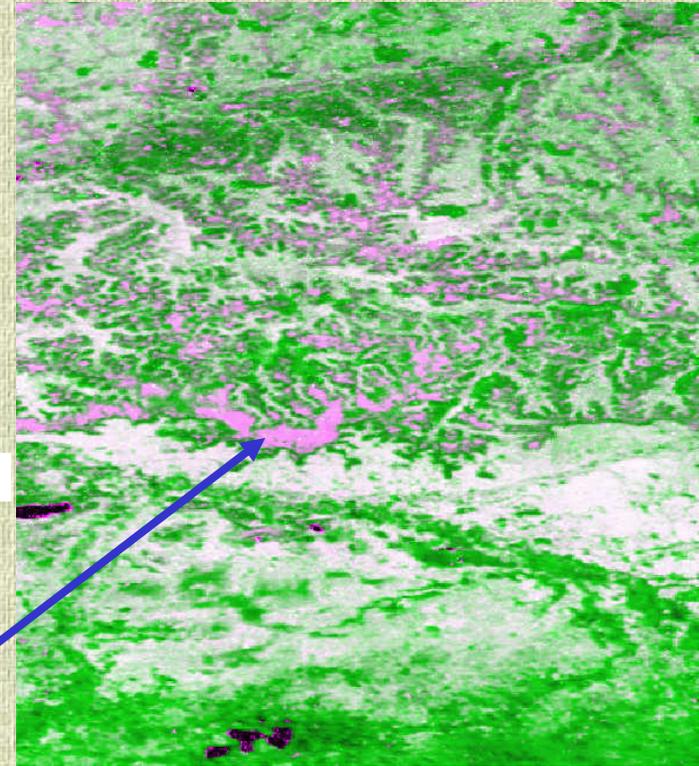
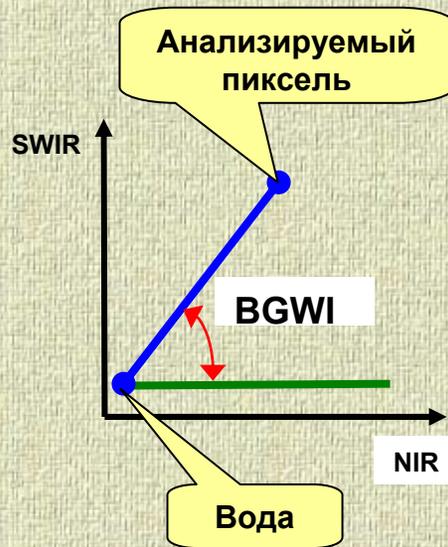
Карта использования земель



Биспектральный Градиентный Индекс Влажности - BGWI



Летняя мозаика изображений
NIR-MIR-RED



Заболоченные земли

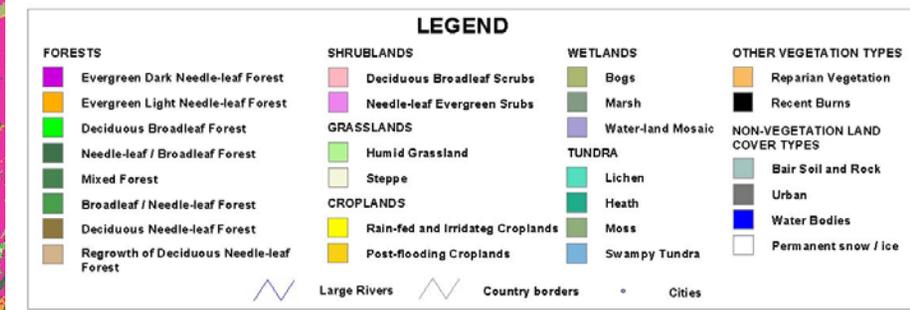
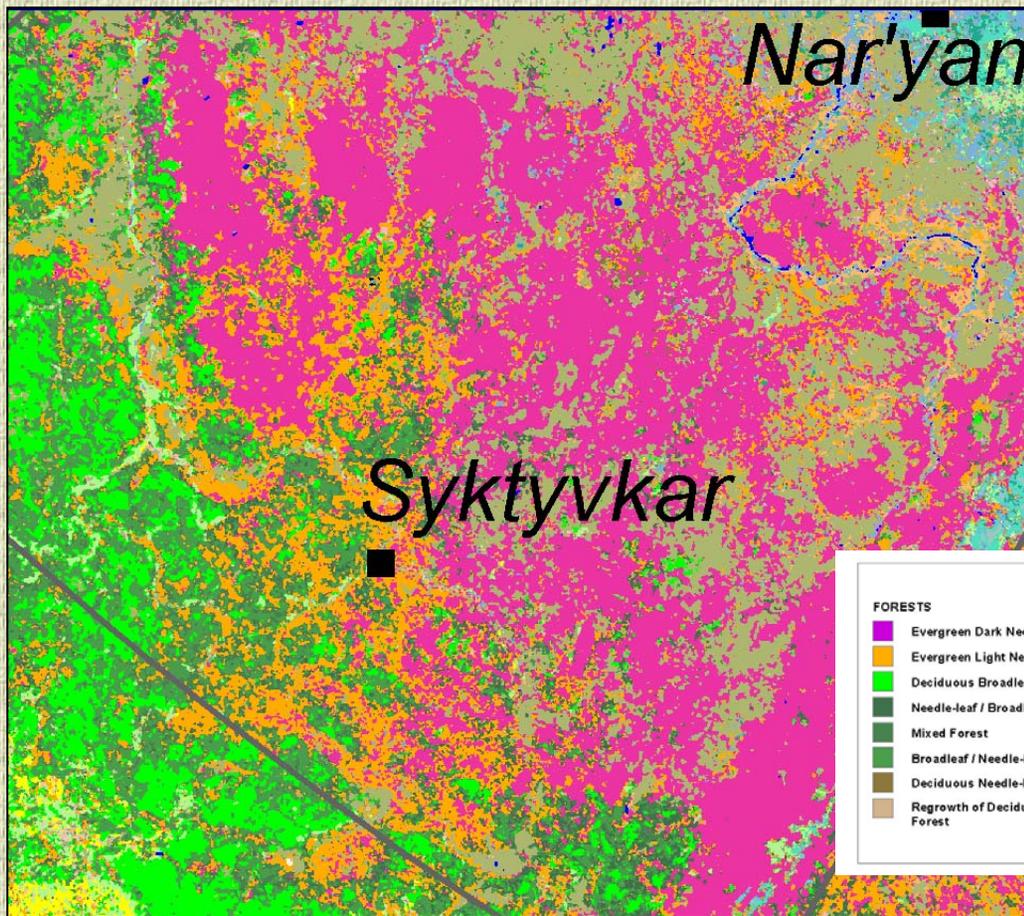
BGWI-NDVI-BGWI

Тематическая интерпретация спектральных кластеров



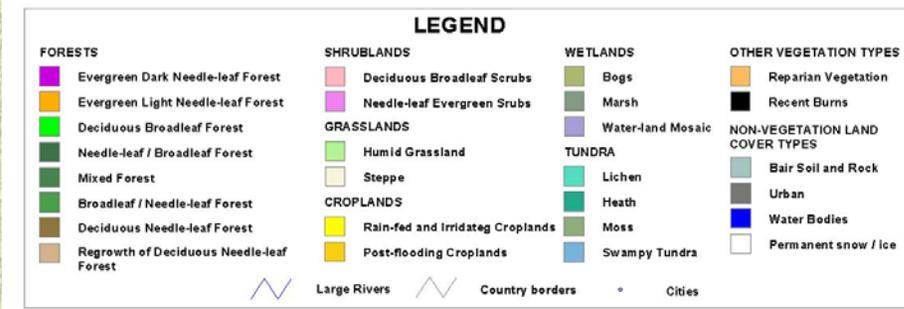
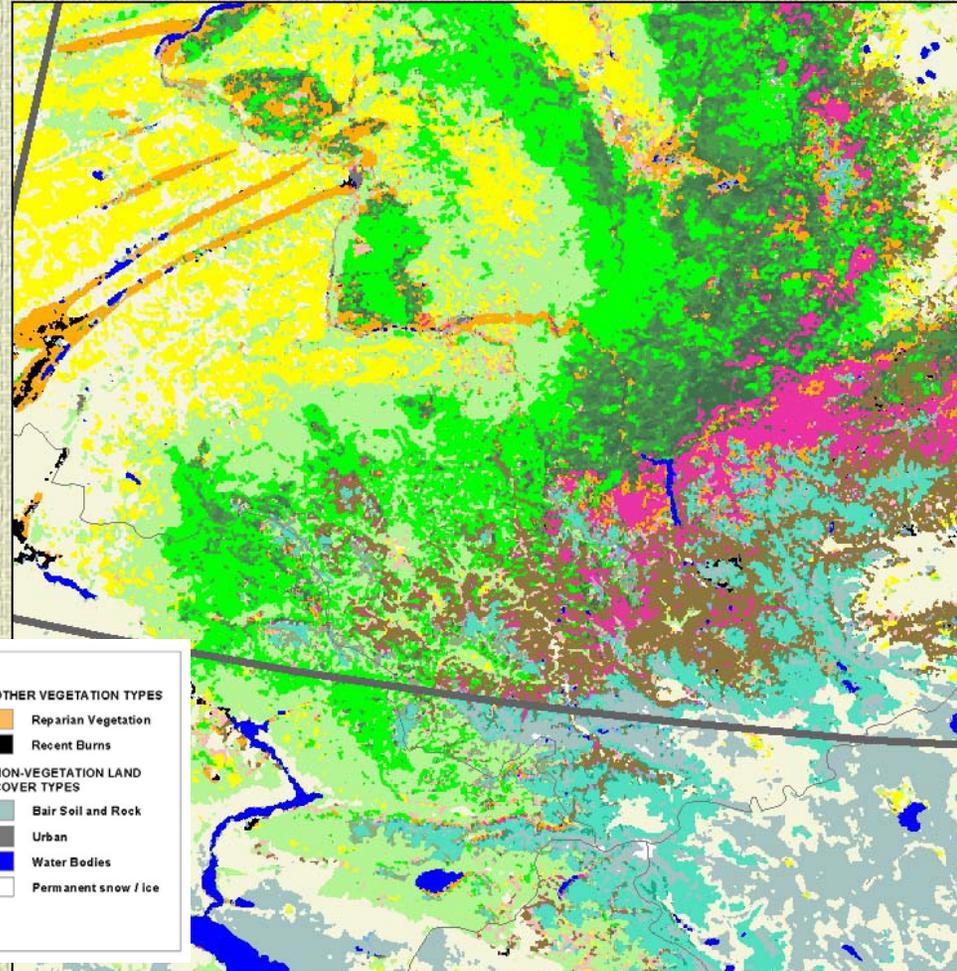
Карта наземных экосистем :

Регион Коми

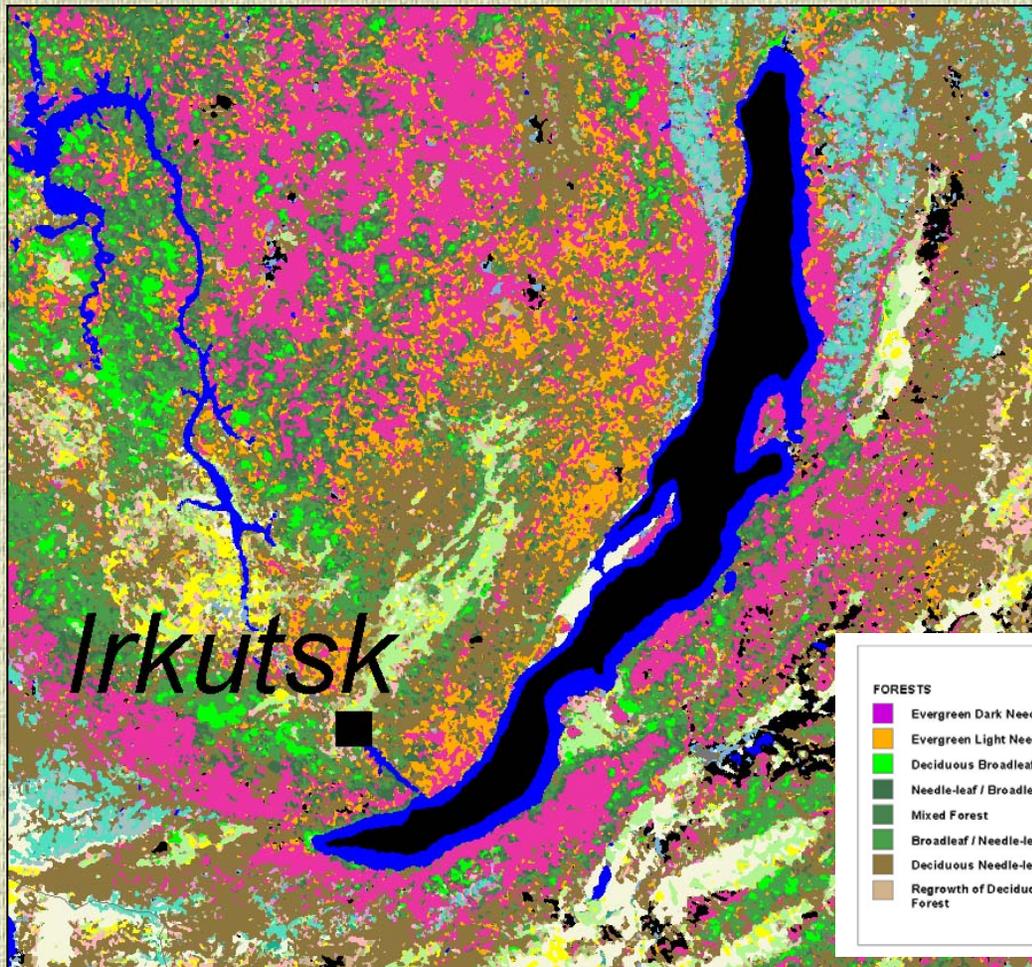


Карта наземных экосистем :

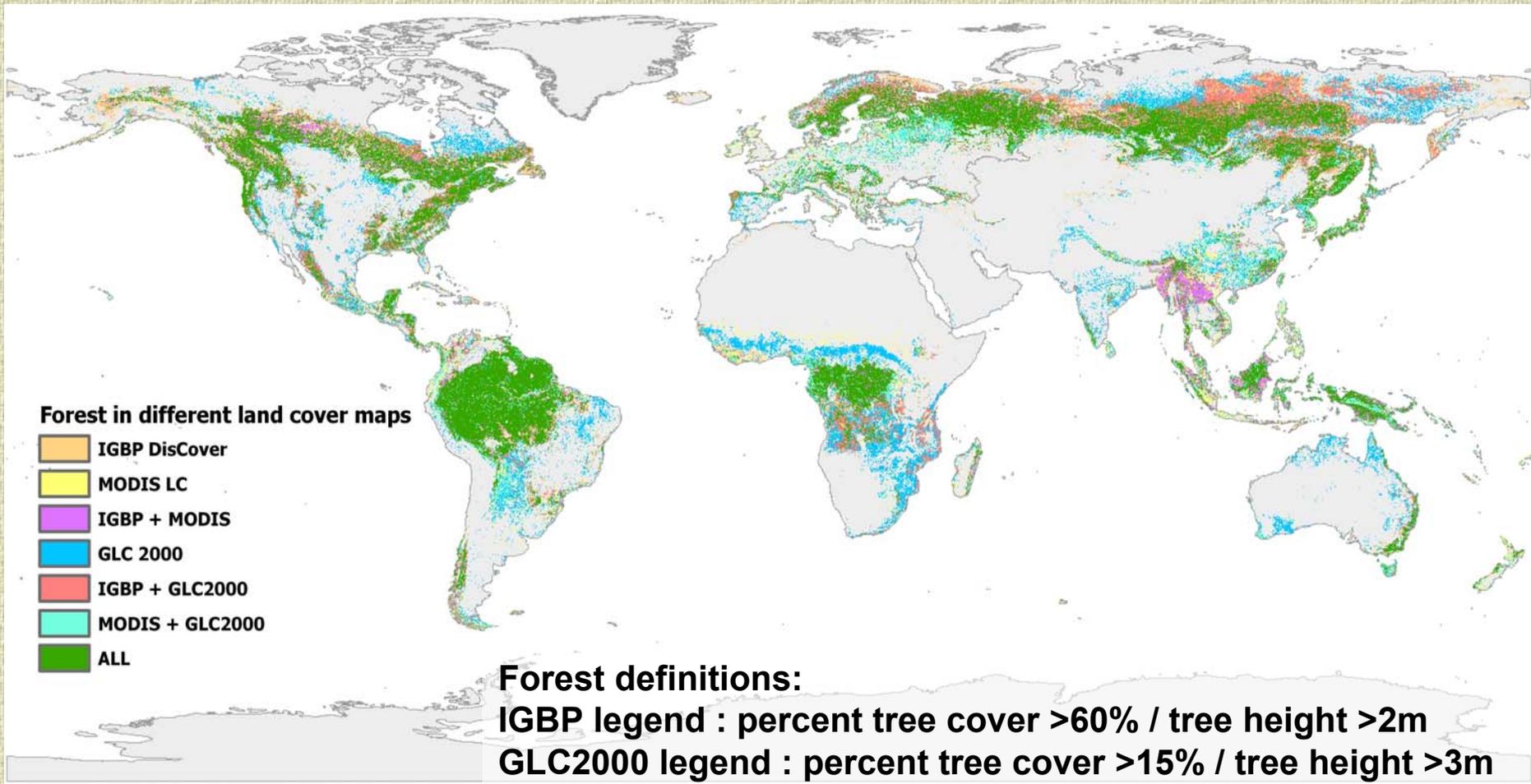
Регион Алтая



Карта наземных экосистем : Регион оз. Байкал

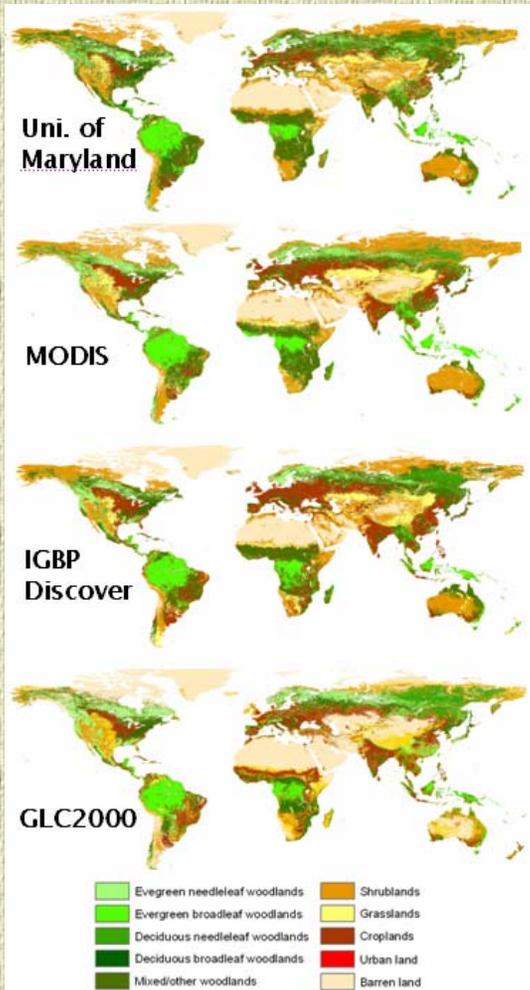


Forest areas in global land cover maps



Common ground for land characterization

Existing global land cover datasets



Common land cover classifiers (LCCS)

Cover type/ life form



Leaf longevity



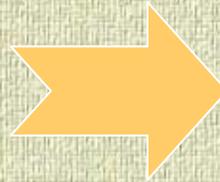
Leaf type



Terrestrial / aquatic + regularly flooded



Cultivated and managed/ (semi-)natural



GLC2000 translated to IPCC

Legend



GLC2000 Code	Description	IPCC Class
10	Forest	Forest land
20	Barren land	Other land
30	Grassland	Grassland
40	Wetlands	Wetlands
50	Settlements	Settlements
60	Other land	Other land

GLC2000

Translator

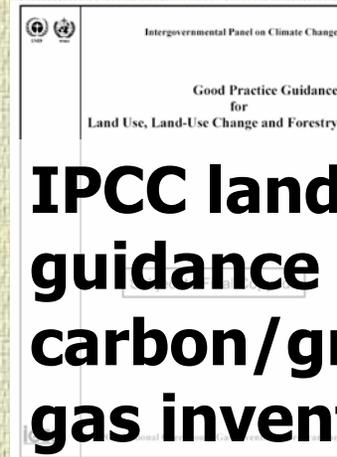


Land Cover Classification System 2
LCCS

Demarcation
Legend
Translator
Quit

Authors | About LCCS | Disclaimer

IPCC class	LCCS Label	LCCS Code	Description
Forest land	Forest	10	Forest
Cropland	Cropland	20	Cropland
Grassland	Grassland	30	Grassland
Wetlands	Wetlands	40	Wetlands
Settlements	Settlements	50	Settlements
Other land	Other land	60	Other land

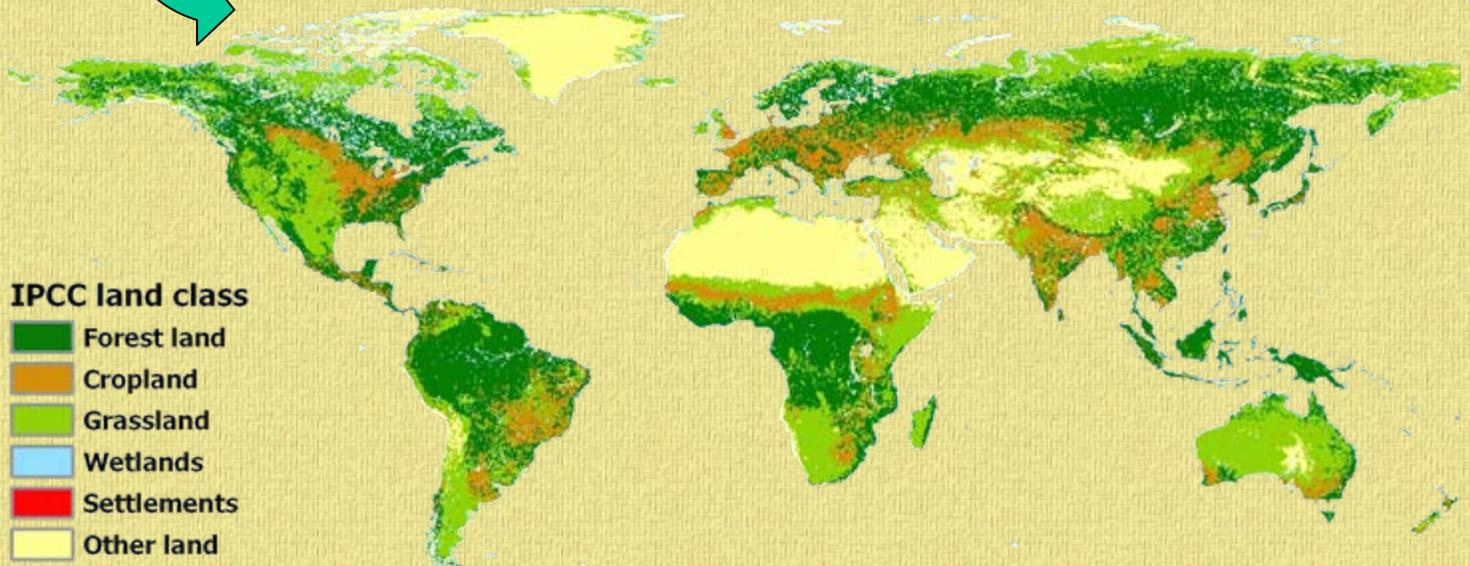


Intergovernmental Panel on Climate Change
Good Practice Guidance
for
Land Use, Land-Use Change and Forestry

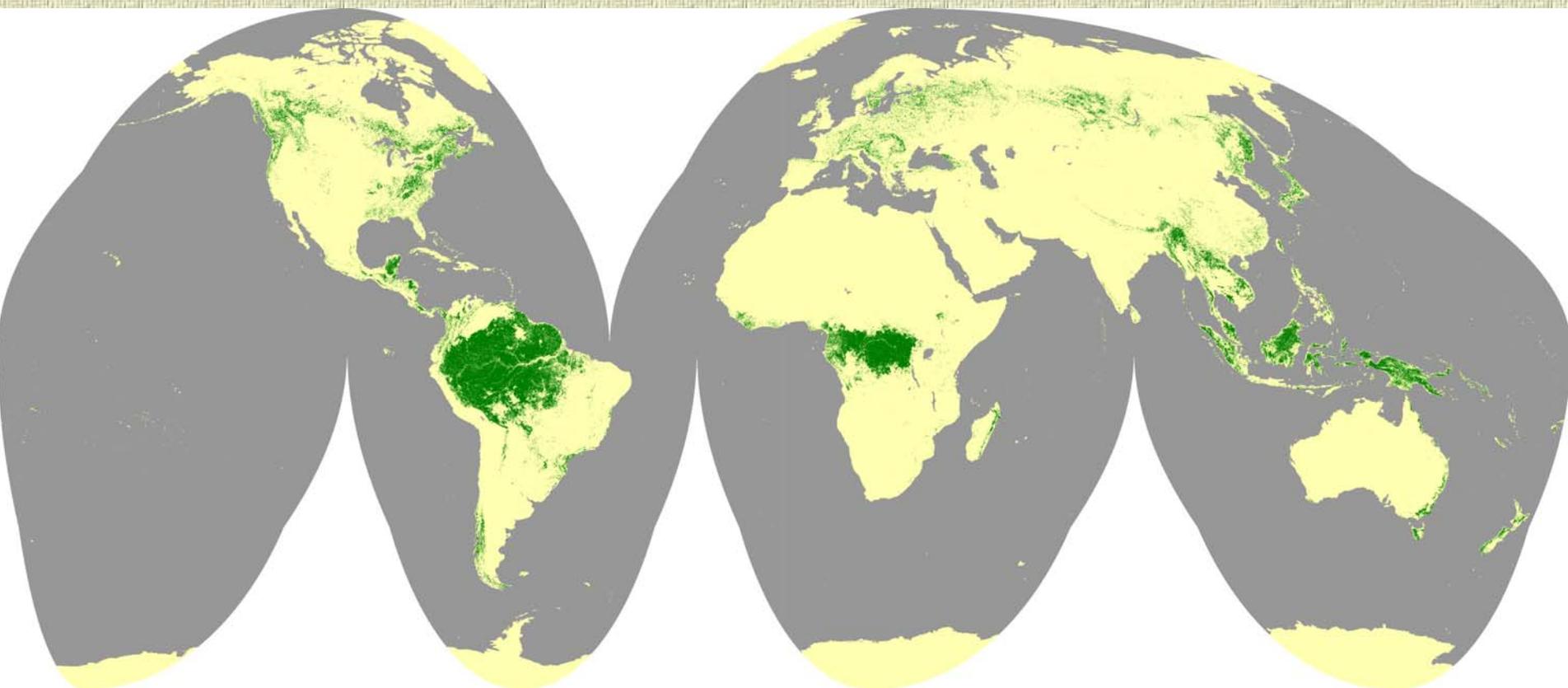
IPCC land use guidance for carbon/greenhouse gas inventory calc.

Harmonized map

- IPCC land class
- Forest land
 - Cropland
 - Grassland
 - Wetlands
 - Settlements
 - Other land



Vegetation continuous fields products from MODIS data



0% 100%



Percent tree cover threshold

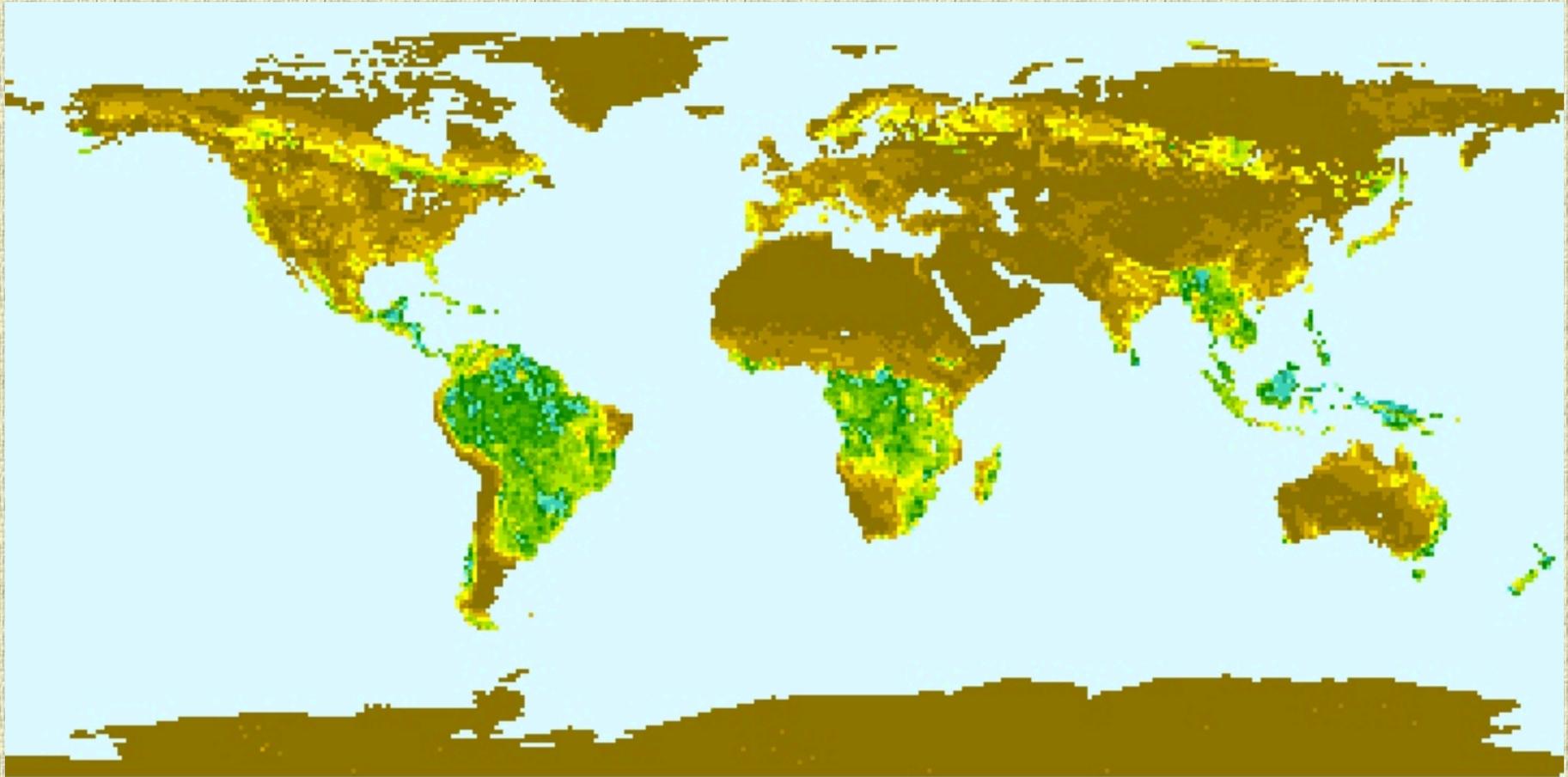


Vegetation satellite monitoring: possible approach

$$F(t) = F_t(t) + F_p(t) + F_d(t) + e(t)$$

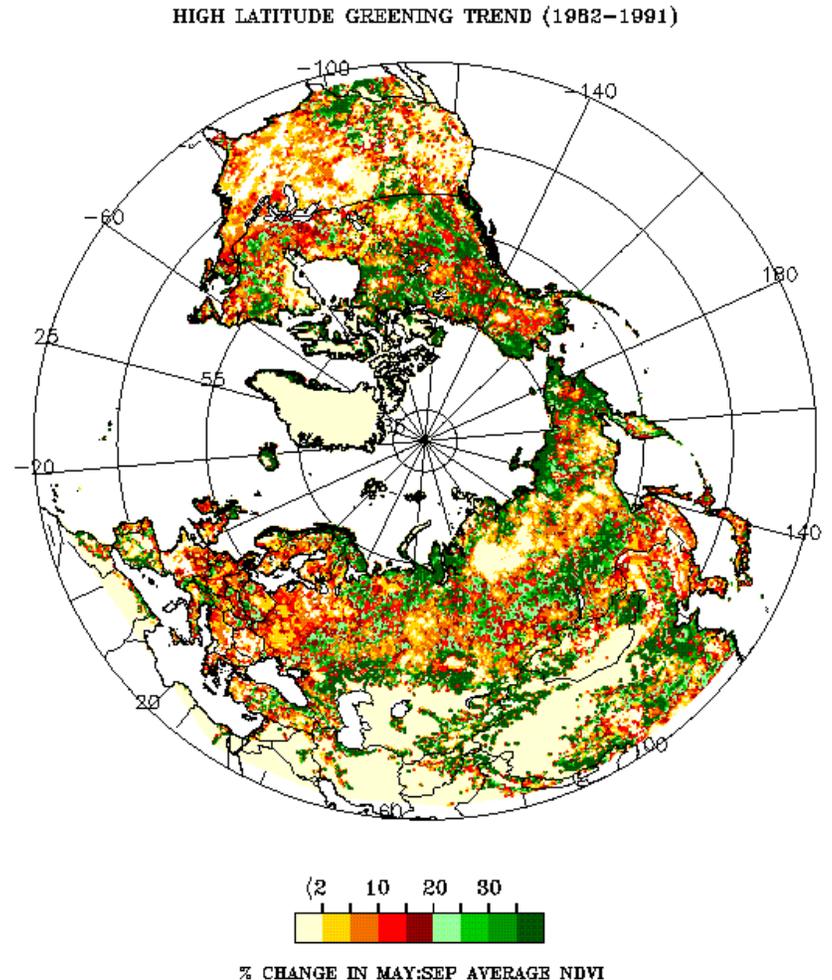
- $F_t(t)$ – trends of land cover properties
- $F_p(t)$ – periodic component due to land cover phenological changes
- $F_d(t)$ – rapid changing component due to land cover disturbances
- $e(t)$ – random noise due to factors of technical and natural origins, which are not corresponding to changes of land cover

Фенологическая динамика наземных экосистем



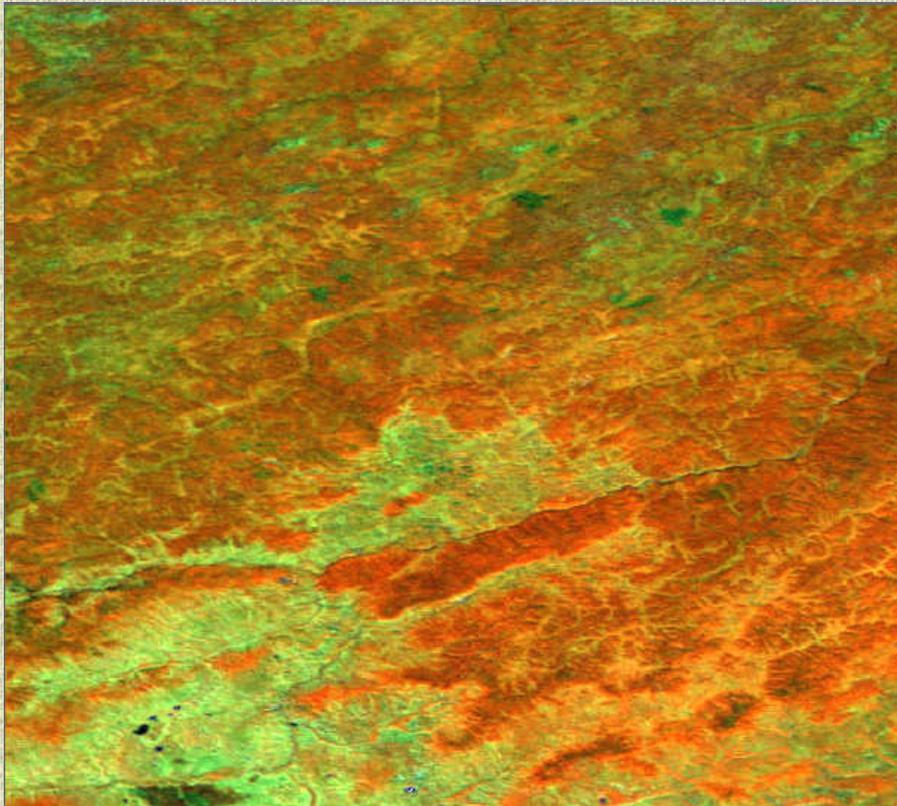
Change in NDVI from 1982 to 1990

There has been a documented change in the seasonality of the NDVI in high northern latitudes (Myneni *et al.*, Nature, 1997)

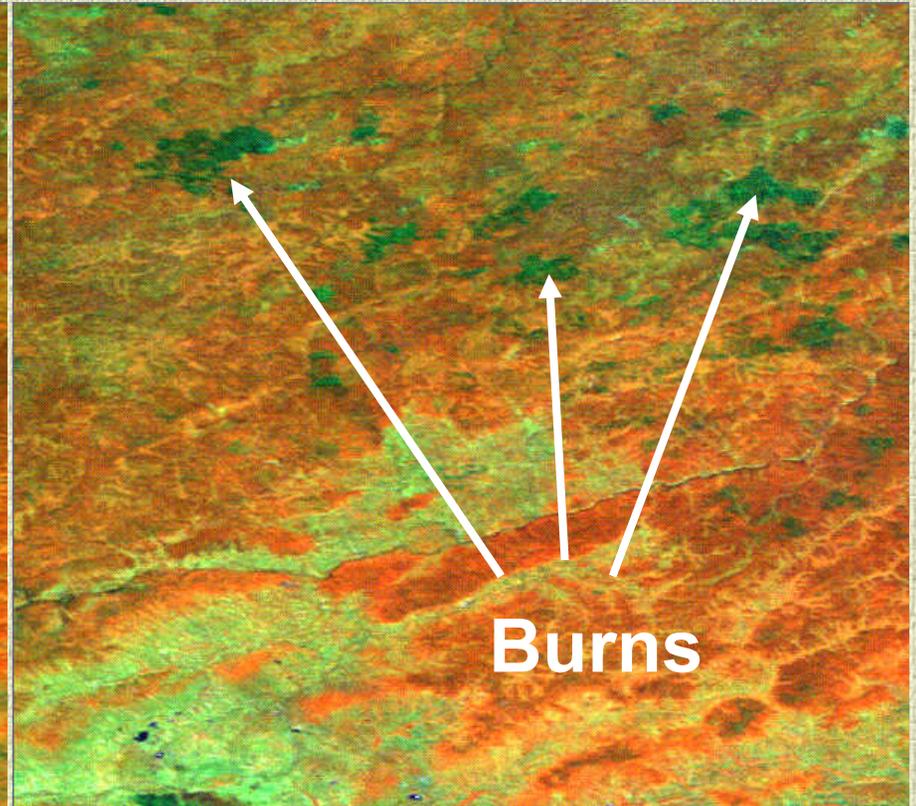


Vegetation change resulted from fires

Summer of 1999



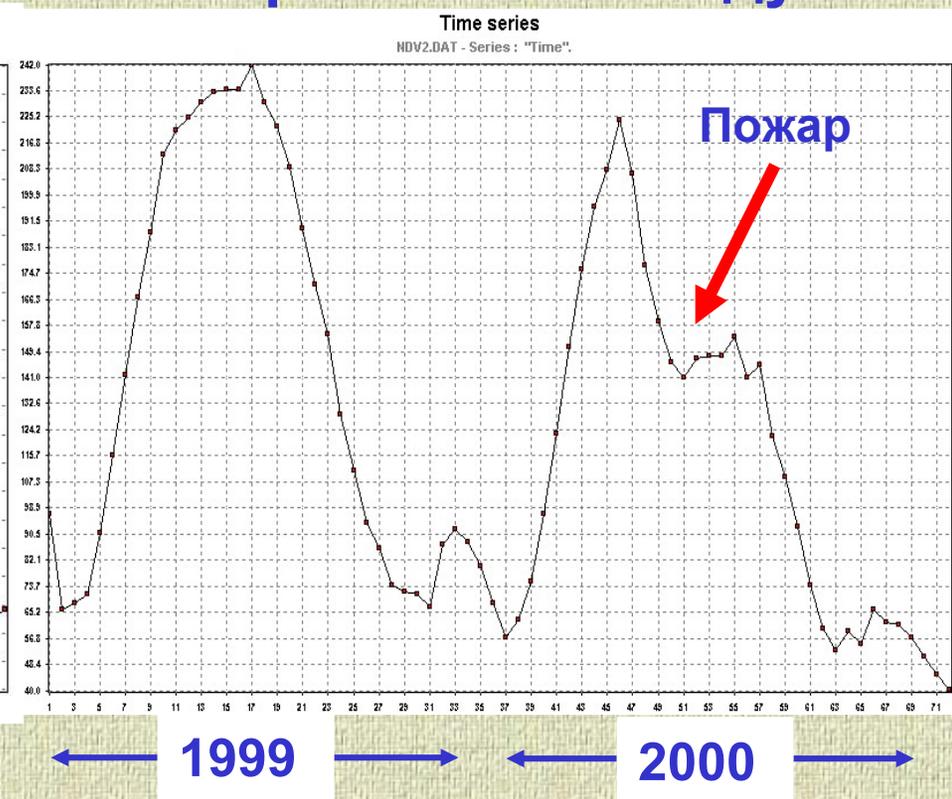
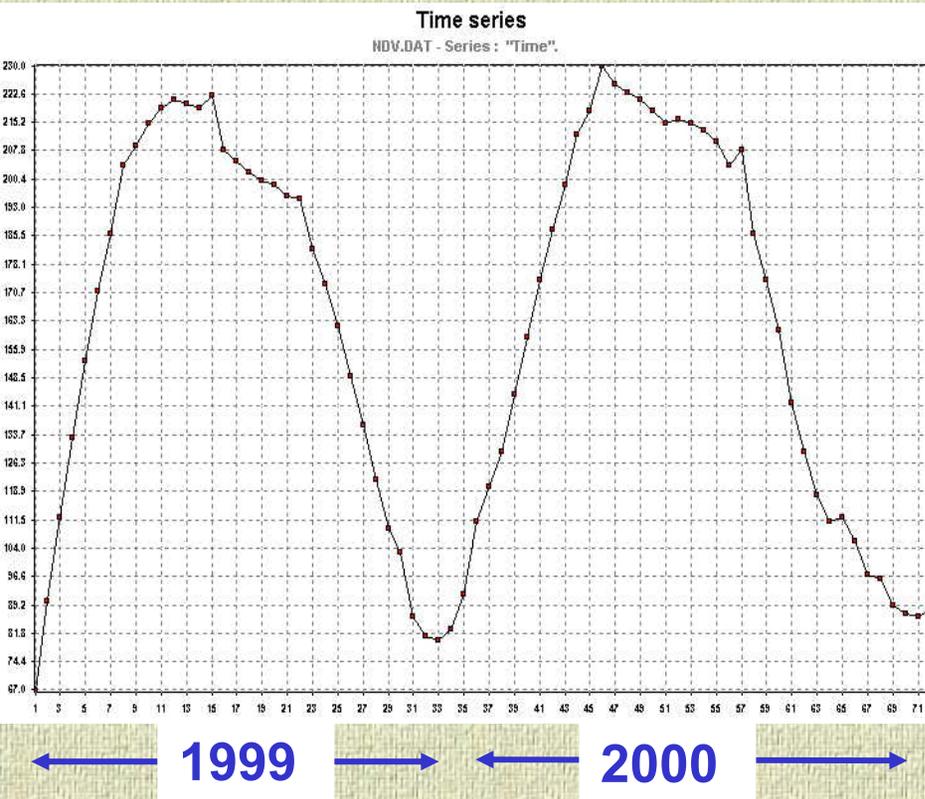
Summer of 2000



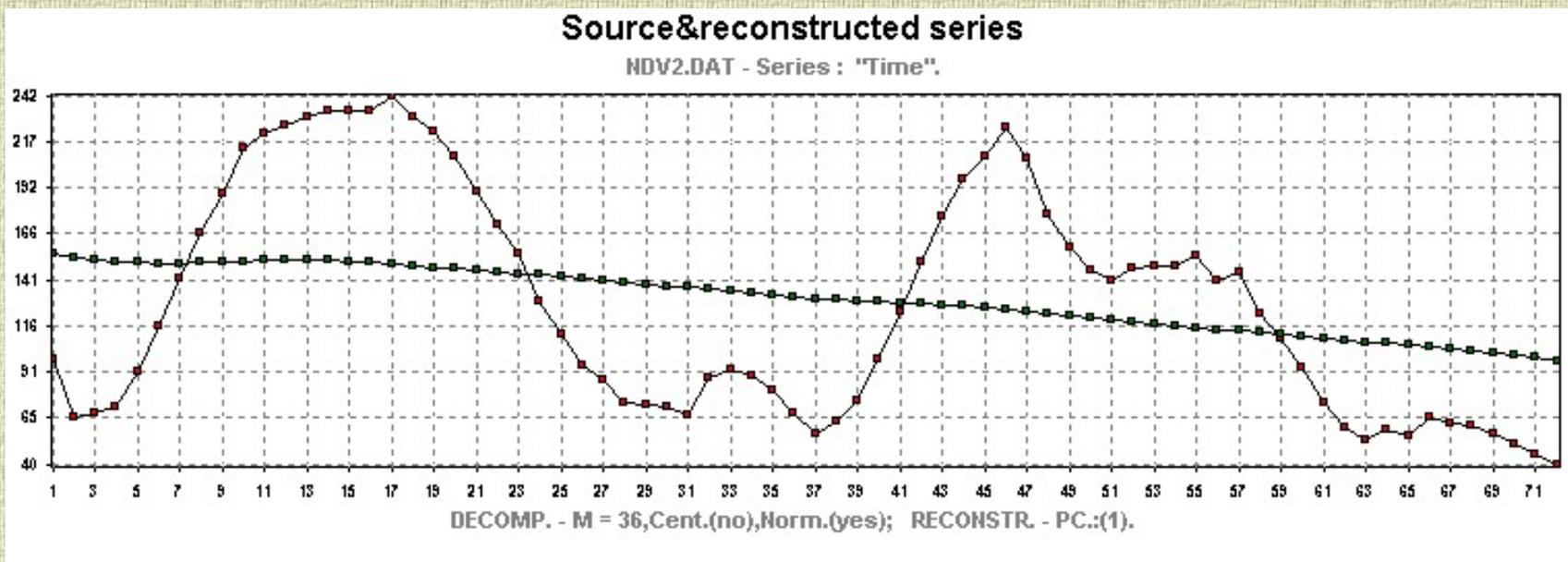
Временные профили NDVI за период 1999-2000 годов

Неповрежденные леса

Леса поврежденные пожарами в 2000 году



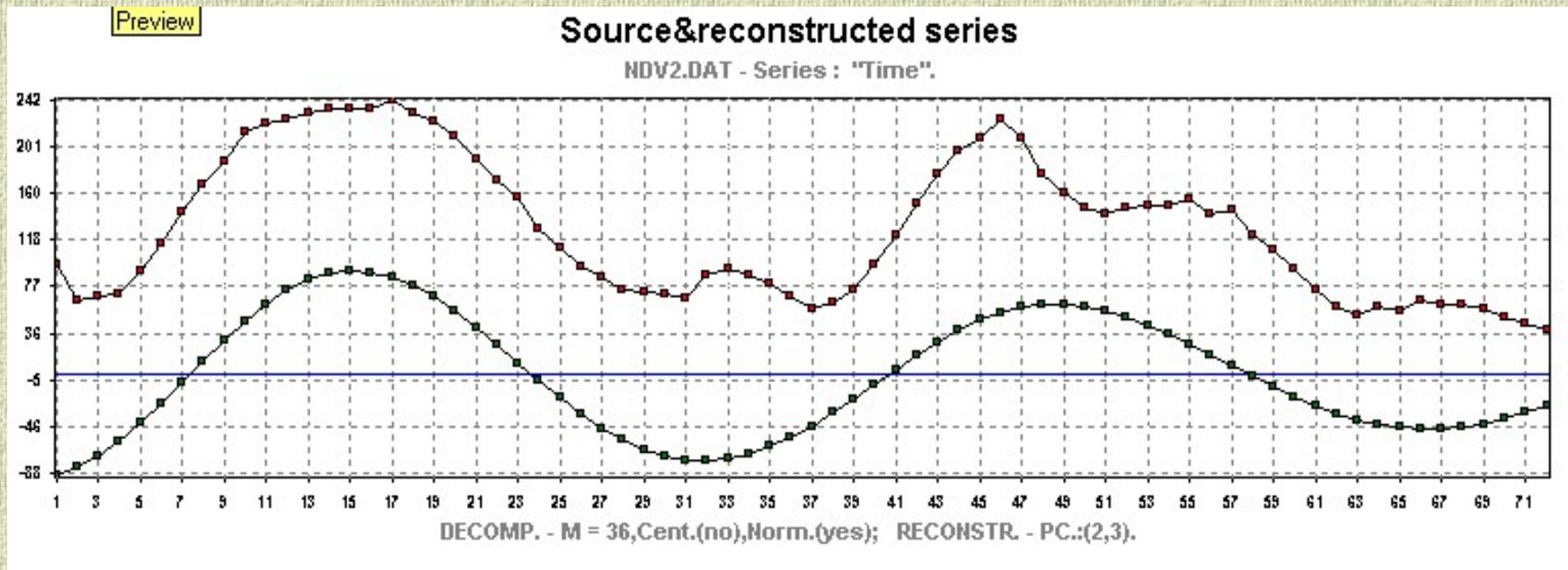
Сингулярный спектральный анализ: выделение трендовой компоненты из временного профиля NDVI



← 1999 →

← 2000 →

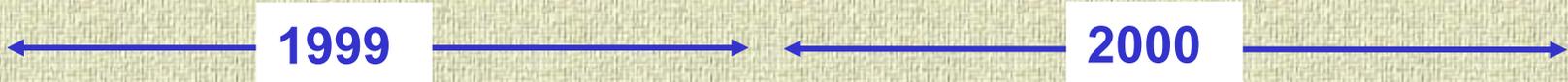
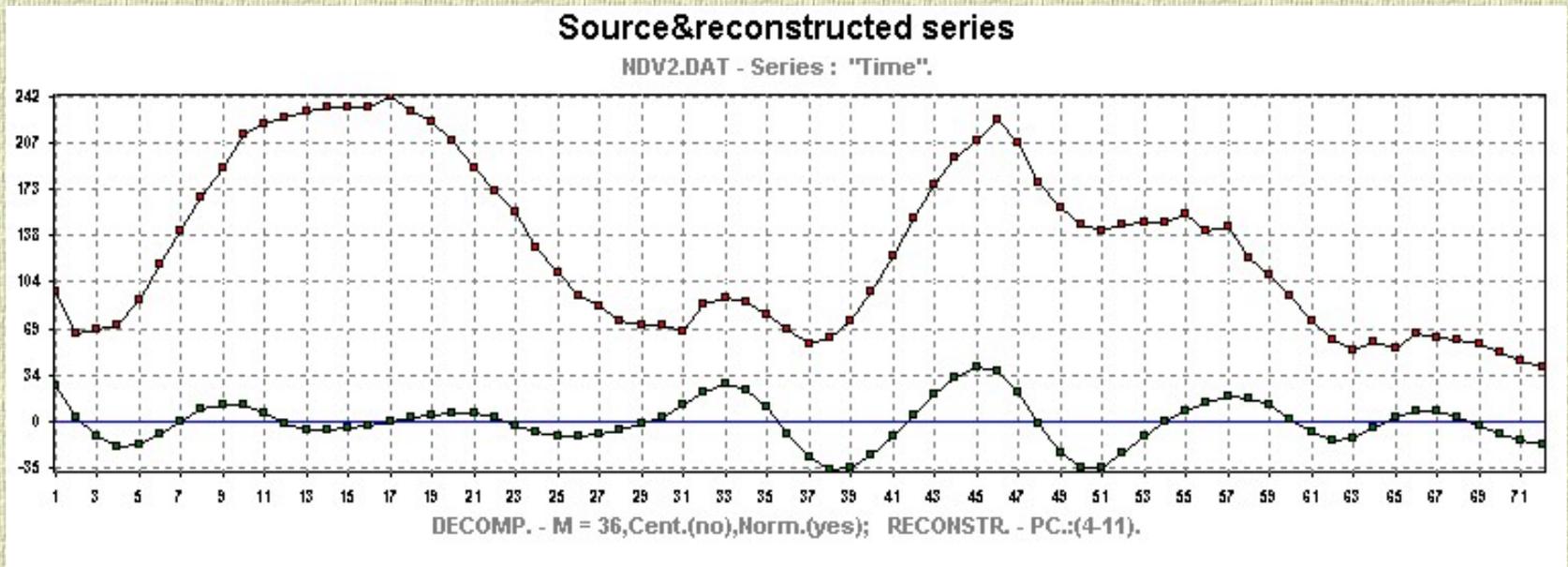
Сингулярный спектральный анализ: выделение сезонной компоненты из временного профиля NDVI



1999

2000

Сингулярный спектральный анализ: выделение компоненты возмущающих изменений из временного профиля NDVI



Приоритетные направления развития методов анализа данных

Интеграция физических моделей в процесс анализа :

- Моделей спектрального смешения ;
- BRDF моделей ;
- Моделей сезонной динамики растительности ;

Интеграция тематических фактов и знаний в процесс анализа :

- Базы пространственных (не спутниковых) данных ;
- Экспертные системы ;
- Биоклиматические, экологические и др. модели ;

Мультисенсорный подход (синергизм данных)

- На уровне исходных данных ;
- На уровне результатов анализа данных ;

Приоритетные тематические задачи

- **выявление и оценка качественных изменений** растительного покрова с использованием данных низкого пространственного разрешения и выборочных наблюдений высокого разрешения
- мониторинг **фенологических изменений** растительного покрова по данным низкого пространственного разрешения
- оценка **биофизических параметров и структурных характеристик** растительности (поисковая фаза) :
 - параметры горизонтальной структуры (проективное покрытие, фракционный состав)
 - параметры вертикальной структуры растительности
 - LAI, FPAR, APAR, NPP