

# Преимущества Индекса Листовой Поверхности для Оценки Фенологических Характеристик Лесов России

Н.В. Шабанов, В.А. Егоров, Т.С. Миклашевич,  
Е.А. Стыценко, С.А. Барталев

ИКИ РАН, Москва, Россия



СПД33-2023, ИКИ РАН  
15 ноября 2023 г.

# Постановка задачи

Фенологические метрики (**фенометрики**)- это статистические характеристики динамики “зеленого” покрова земли. Под зеленым покровом понимается листва/хвоя участвующая в процессе фотосинтеза. Широко известны такие фенометрики, как начало и конец вегетационного сезона, максимум и минимум сезонных вариаций и т.п.

Количественная оценка фенометрик зависит от выбора **базовой переменной**, сезонный профиль которой анализируется в процессе расчёта фенометрик. В большинстве работ используется в качестве базовой переменной вегетационные индексы (**NDVI, EVI**)- радиометрические параметры, подверженные влиянию почвы для разреженной растительности, выходят на насыщение для плотной растительности (и прочее)- таким образом вносят систематическую ошибку в оценку фенометрик

Целью данной работы является концептуально понять преимущества использования биофизического параметра **LAI**, который свободен от недостатков вегетационных индексов и является прямой оценкой количества зеленого листового покрова.

Работа выполнена по территории **лесов России**

# Базовые переменные

1) **NDVI**

$$\text{NDVI} \equiv (N - R)/(N + R)$$

2) **EVI2** (двух-канальный EVI)

$$\text{EVI2} \equiv G \cdot (N - R)/(N + C \cdot R + 1)$$

где коэффициенты были выбраны для сенсора MODIS  $G=2.5$ ,  $C=2.4$

3) **FPAR** (Fraction of Photosynthetically Active Radiation Absorbed by Vegetation)

$$\text{FPAR} = \int_{400nm}^{700nm} a(\lambda) \cdot e(\lambda) d\lambda$$

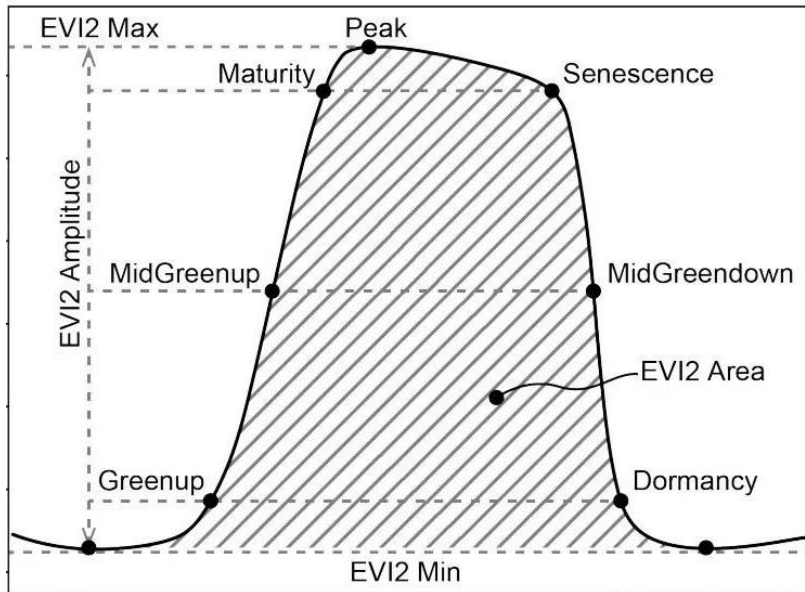
где  $\lambda$  это длина волны в спектральном диапазоне фотосинтеза,  $a(\lambda)$  коэффициент поглощения солнечного излучения растительным покровом,  $e(\lambda)$  функция планка, моделирующая поток падающего солнечного излучения

4) **LAI** (Leaf Area Index)- индекс листовой поверхности- это суммарная величина площади поверхности листов (одна сторона) на единицу площади земной поверхности ( $m^2/m^2$ ) для широколиственных пород и как половина поверхности хвои на единицу площади земной поверхности для хвойных пород леса.

# Данные

- 1) IKI MODIS LAI, FPAR, NDVI, EVI2- ежедневные интерполированные композиты по территории России, пространственное разрешение 230 м, 2020 г
- 2) IKI MODIS forest species (доминирующие породы леса)- ежегодный продукт, пространственное разрешение 230 м, 2020 г
- 3) NASA MODIS MCD12Q2 – ежегодный фенологический продукт на разрешении 500м, 2020 г

# Алгоритм расчёта фенометрик

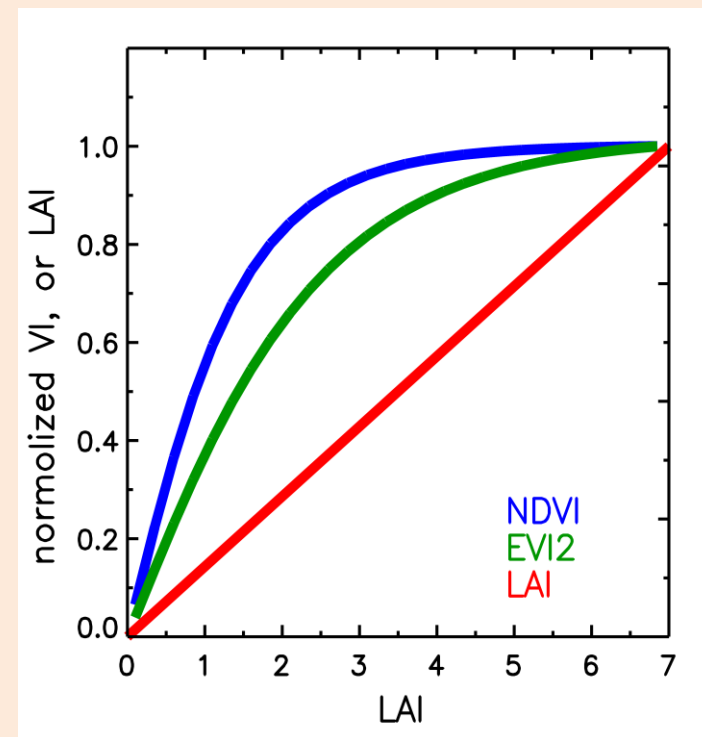
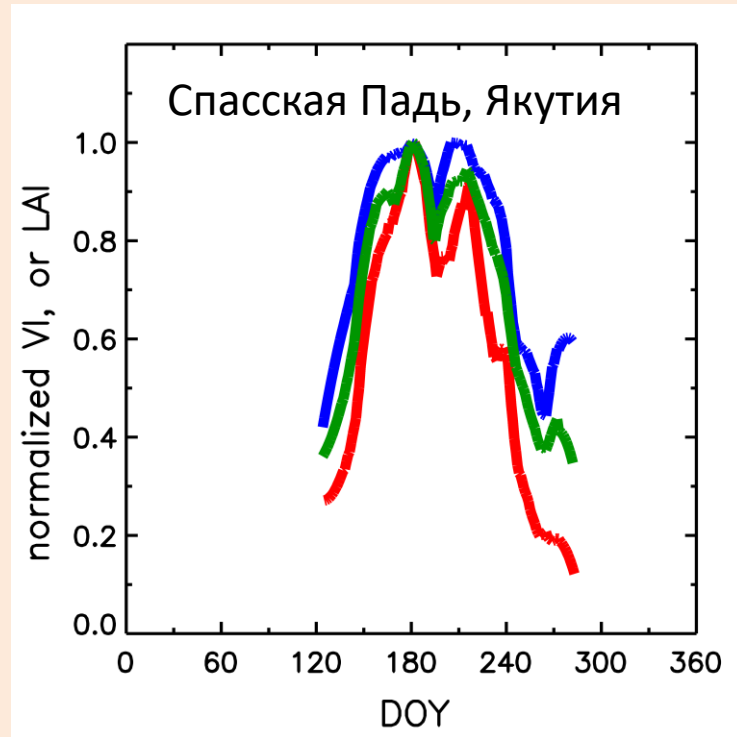


Phenometrics	Definition
<b>Green-up</b>	Date when base variable first crosses 15% of Amplitude of its variations
<b>Mid Greening</b>	Date when base variable first crosses 50% of Amplitude of its variations
<b>Maturity</b>	Date when base variable first crosses 90% of Amplitude of its variations
<b>Maximum</b>	Date when seasonal maximum is achieved
<b>Senescence</b>	Date when base variable last crosses 90% of Amplitude of its variations
<b>Mid Browning</b>	Date when base variable last crosses 50% of Amplitude of its variations
<b>Dormancy</b>	Date when base variable last crosses 15% of Amplitude of its variations
<b>Minimum</b>	Minimum value of the base variable
<b>Duration*</b>	Difference between Mid Green-down and Mid Green-up dates
<b>Greening Spread*</b>	Difference between Maturity and Green-up dates
<b>Browning Spread*</b>	Difference between Dormancy and Senescence dates
<b>Amplitude</b>	Difference between maximum and minim of base variable
<b>Integral</b>	Integral of base variable from Green-up to Dormancy

Мы адаптировали расчёт фенометрик из алгоритма NASA MCD12Q2 (версия 6.1). Однако применили его вместо сезонного профиля EVI2 к профилю LAI.

Кроме стандартных фенометрик мы добавили Duration, Greening Spread и Browning Spread.

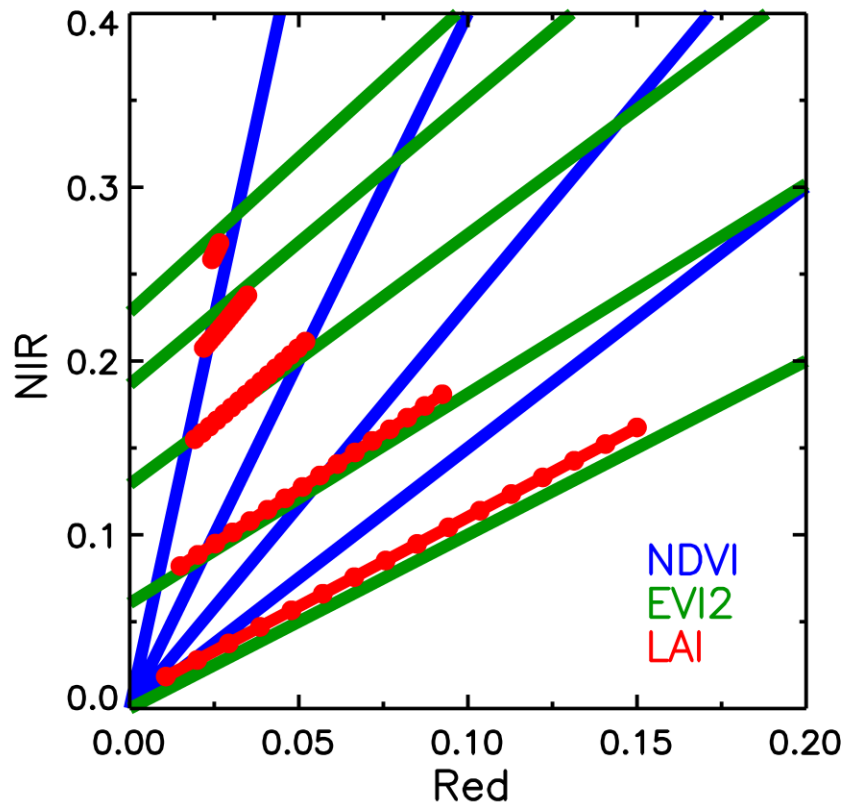
# Сравнение сезонных профилей NDVI, EVI2 и LAI



Сезонные профили NDVI, EVI2 и LAI нормализовали на максимальное значение и сравнили: LAI имеет самую компактную продолжительность вегетационного сезона

Это вызвано выпуклостью кривой VI-LAI: для любого значения LAI, нормализованное значение VI всегда выше нормализованного LAI, ввиду эффекта насыщения VI с ростом LAI.

# Сравнение изолиний NDVI, EVI2 и LAI



**Изолинии индекса**- это кривые в Red-NIR пространстве вдоль которых индекс остается постоянным.

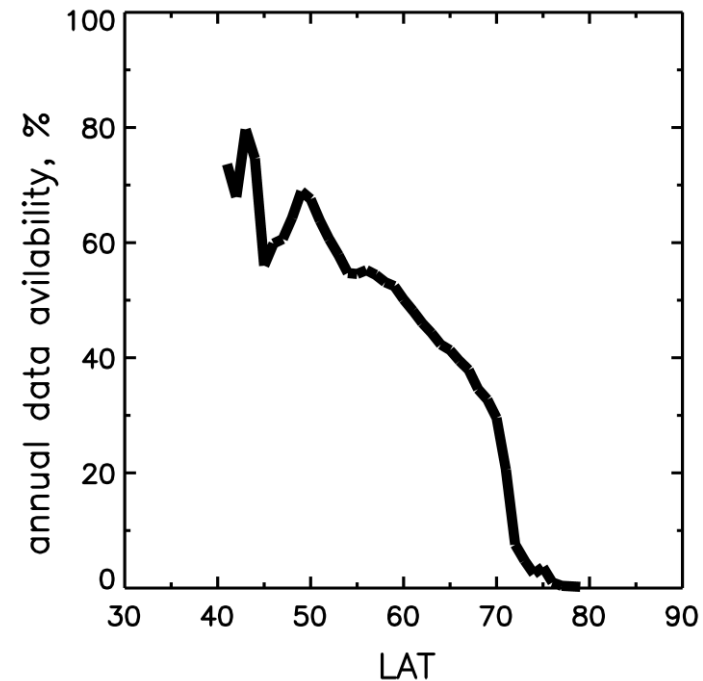
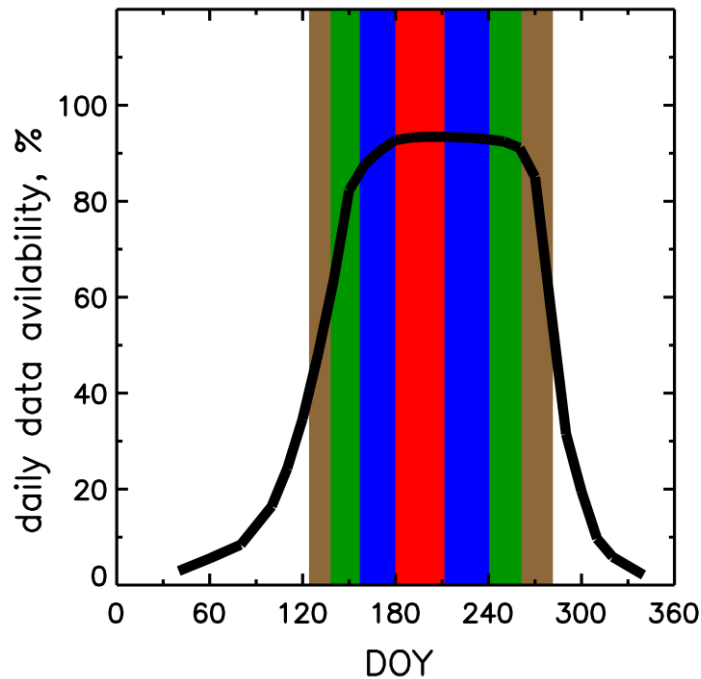
Для NDVI и EVI2 уравнения изолиний можно вывести аналитически, для LAI только численно на основе Уравнения Переноса (УП)

$$\text{NDVI} = \text{const} = A \rightarrow N = (1+A)/(1-A)R$$

$$\text{EVI2} = \text{const} = B \rightarrow N = (G + C \cdot B)/(G - B)R + B/(G - B)$$

- Изолинии **NDVI** сходны с изолиниями LAI только в том что увеличивают свой наклон со своим ростом.
- Изолинии **EVI2** могут хорошо совпадать с изолиниями LAI при малых значениях однако расходятся при больших

# Пространственно-временное покрытие MODIS данных

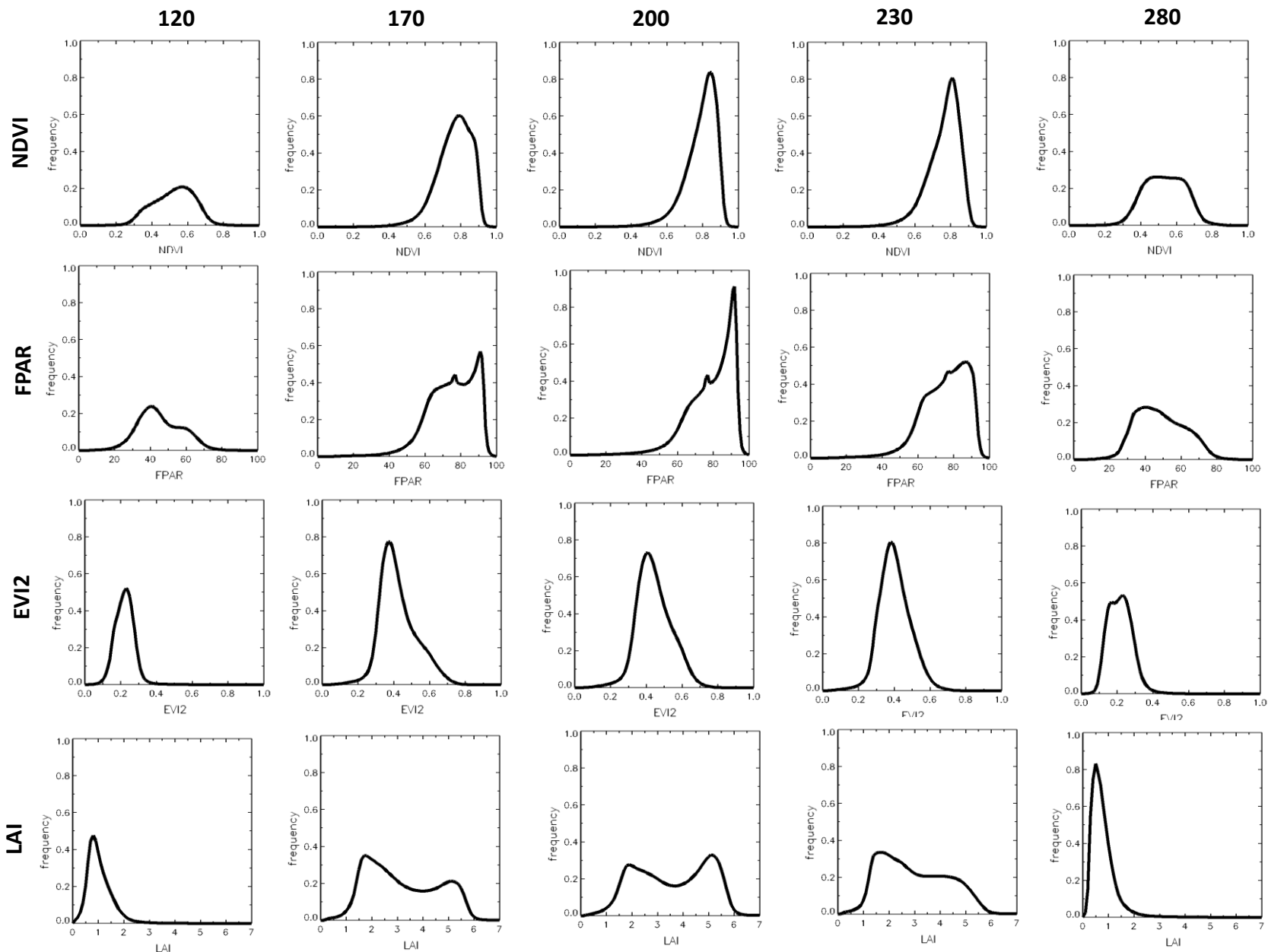


LAI>15% LAI>50% LAI>90% LAI=min ← Сезонные вариации LAI (% от амплитуды)

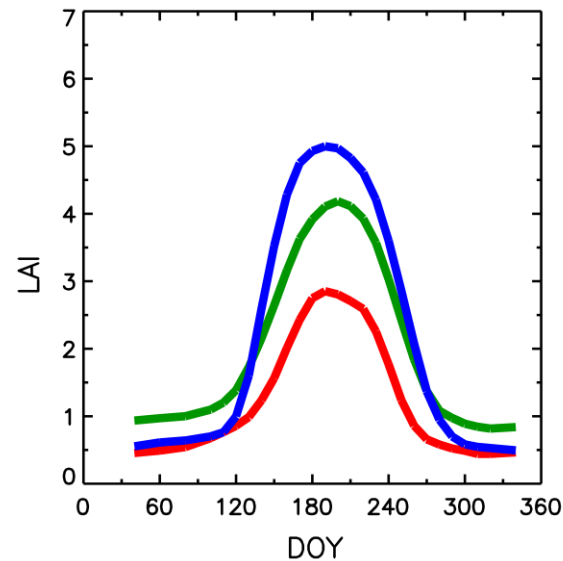
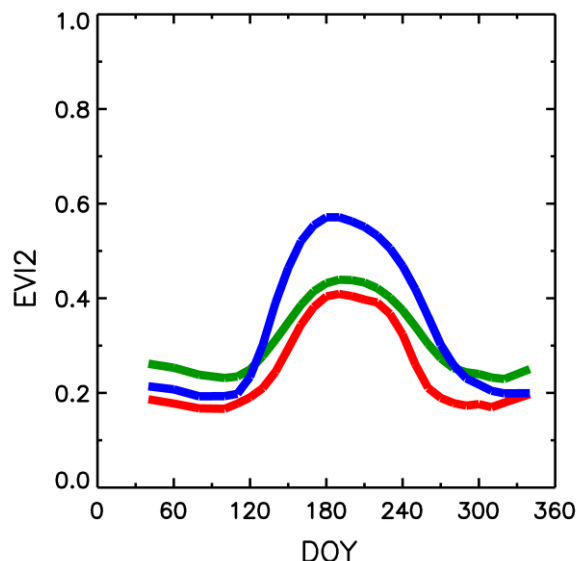
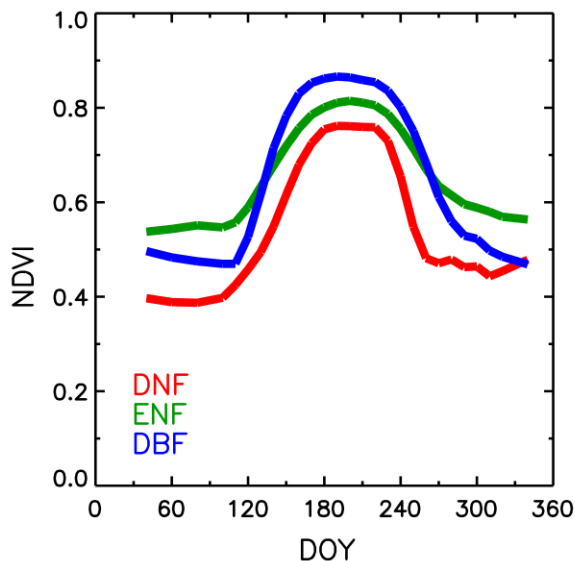
- **Daily data availability** – отношение количества пикселей с валидным LAI к полному количеству пикселей леса
- **Annual data availability**- отношение пикселей из широтного диапазона  $\Delta$ LAT за весь год к полному количеству пикселей занятых лесом из того же диапазона
- Сезонное покрытие MODIS данных тесно связано с сезонностью LAI: как только с земли сходит снег/уменьшается зимняя облачность- начинается рост LAI



# Сезонные вариации распределений NDVI, FPAR, EVI2 и LAI

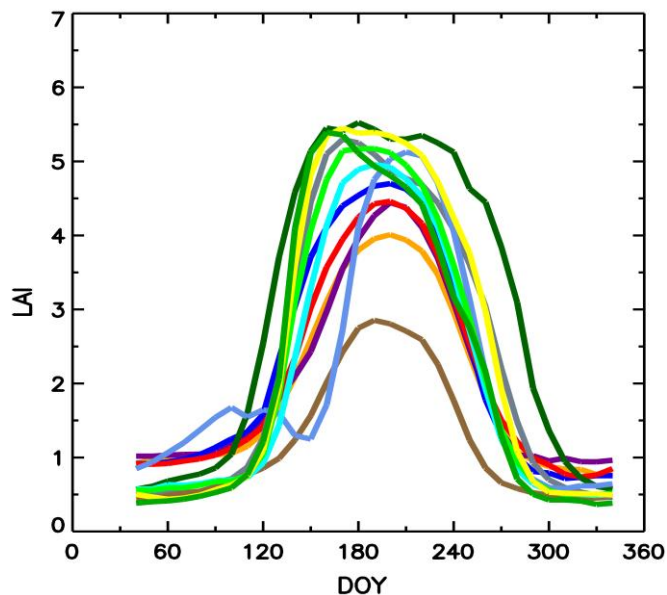


# Усредненные по классам лесов сезонные профили NDVI, EVI2 и LAI

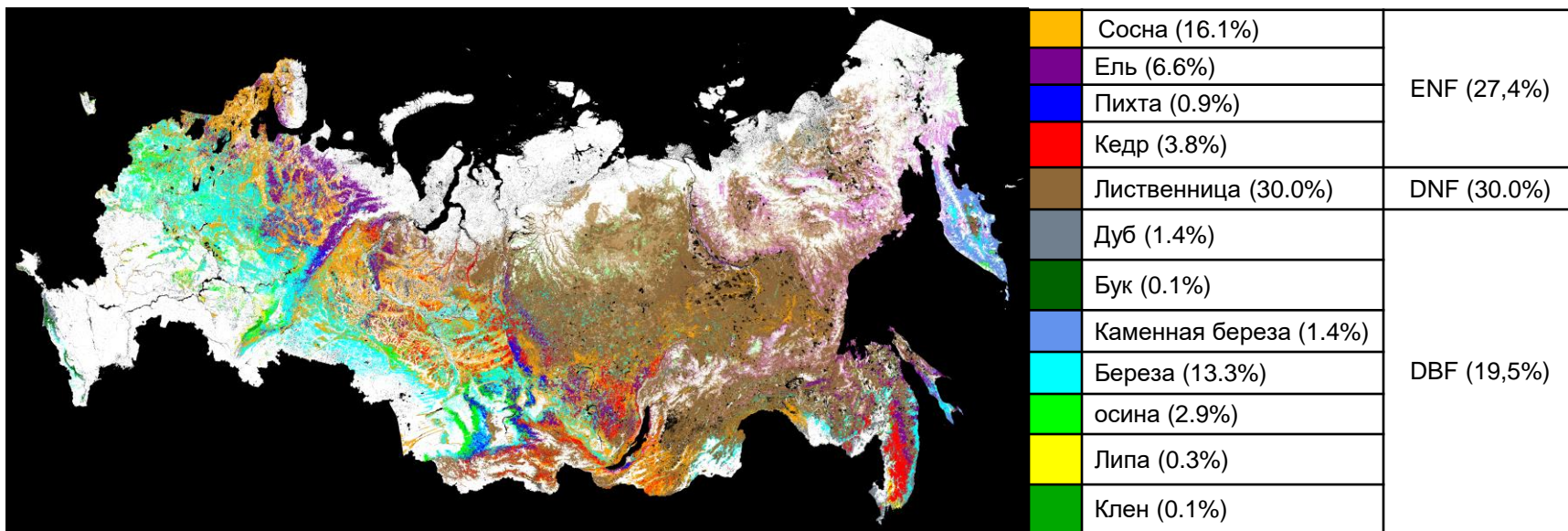


- **NDVI**: сезонный профиль достигает высоких величин летом (0.8-0.9), но остается высоким и зимой (0.4-0.5). Низкое использование динамического диапазона. Слабая делимость по классам леса
- **EVI2**: значения зимой более низкие, но сезонный максимум тоже занижается по сравнению с NDVI. Также низкое использование динамического диапазона. Но улучшено разделение между хвойными и широколиственными классами
- **LAI**: Наиболее высокое использование динамического диапазона. Лучшая делимость по классам

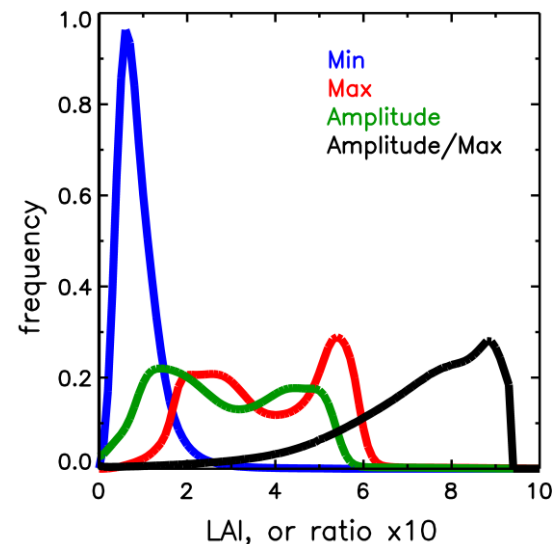
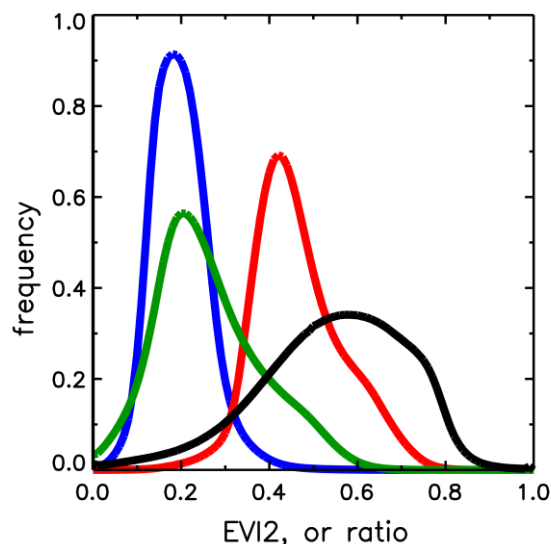
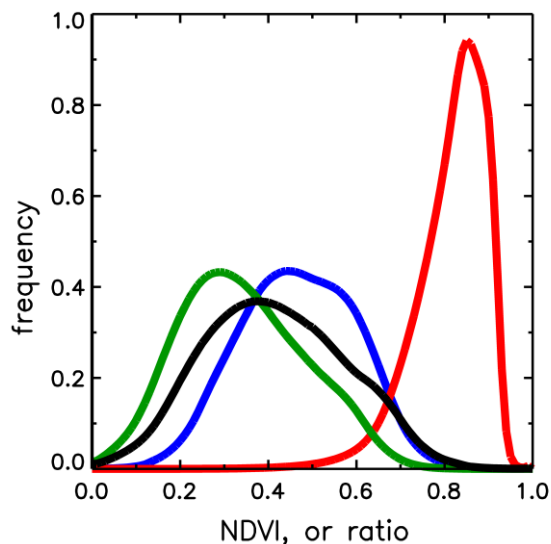
# Усредненные по породам лесов сезонные профили LAI



- Сезонные вариации LAI имеют хорошую разделяемость по породам: как по амплитуде, так и по продолжительности вегетационного сезона, так и по временной фазе
- Все породы имеют единственный сезонный максимум кроме Каменной березы
- Хвойные породы имеют высокую амплитуду сезонных вариаций, возможно из-за низкого фотосинтеза зимой

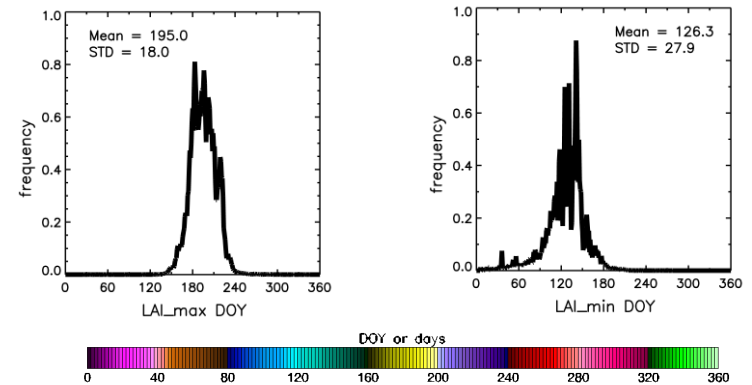
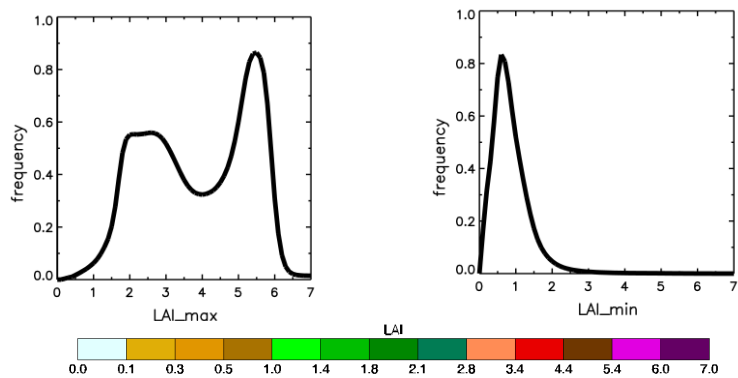
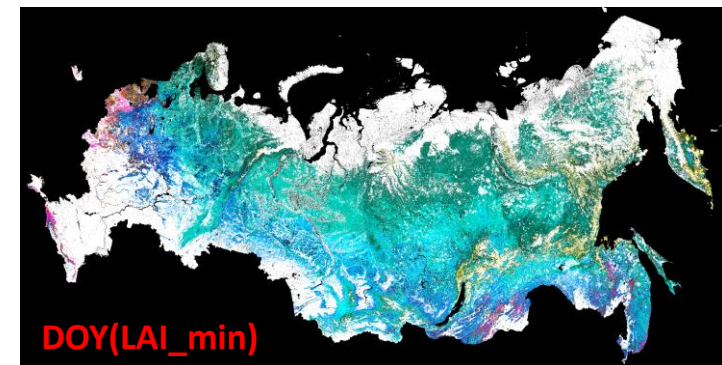
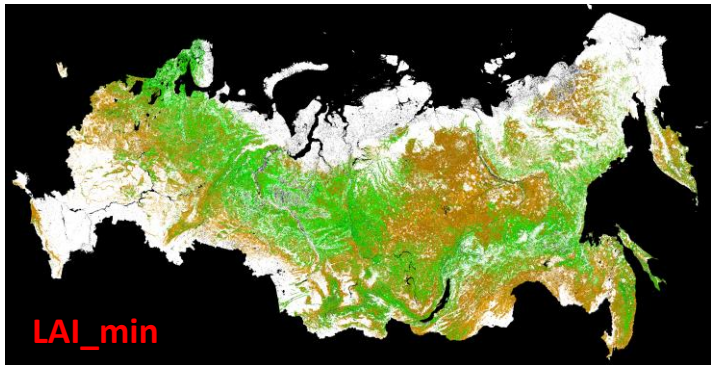
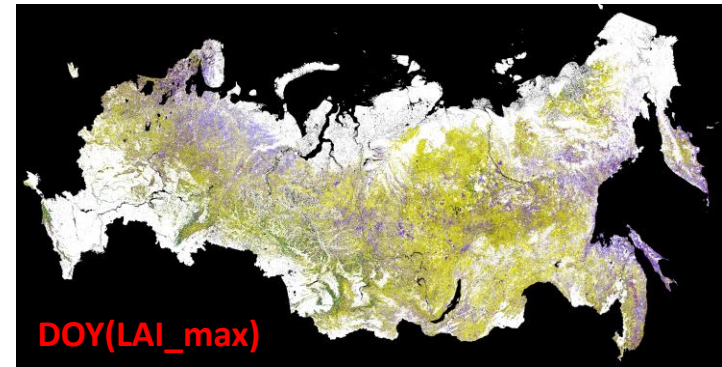
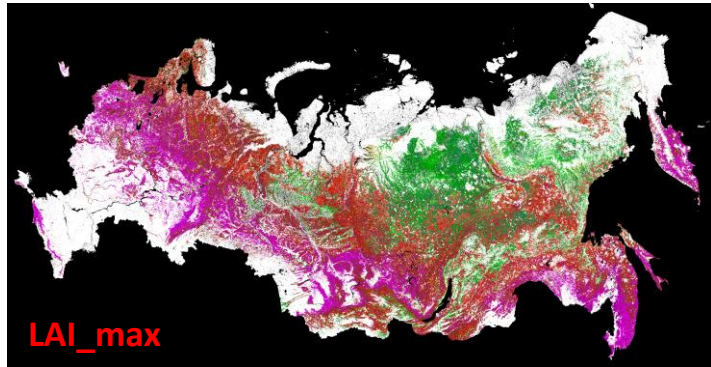


# Какая переменная лучше (NDVI, EVI2, LAI) для оценки фенометрик?



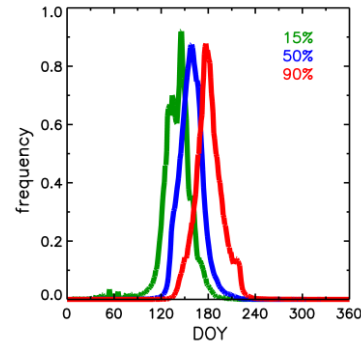
- NDVI и EVI2 имеют разные диапазоны вариаций. Какой индекс лучше для расчёта фенометрик? Как сопоставить с LAI?
- Выбран критерий- уровень использования динамического диапазона. Для его расчёта использовано отношение Amplitude/Max. Абсолютное значение максимума не имеет значения- его можно масштабировать. Имеет значение часть диапазона [0-Max] которая задействована в сезонных вариациях (Amplitude)
- Ранжирование индексов по Amplitude/Max: NDVI(0.4) →EVI2(0.6) →LAI(0.9)

# Сезонные максимум и минимум LAI

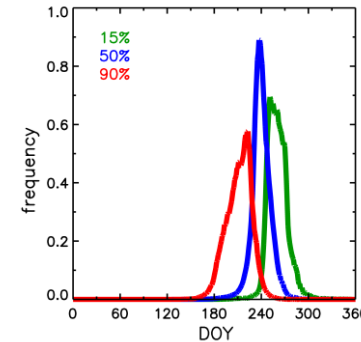
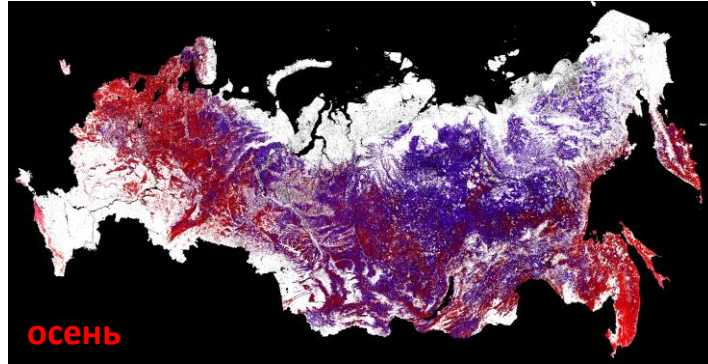


День сезонного макс всегда позже дня 172 (20 июня) – дня летнего солнцестояния<sup>13</sup>

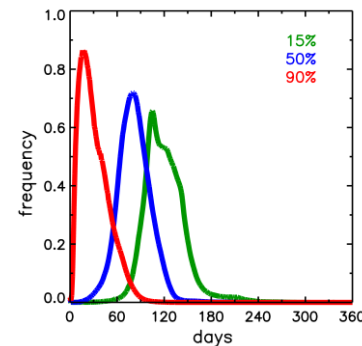
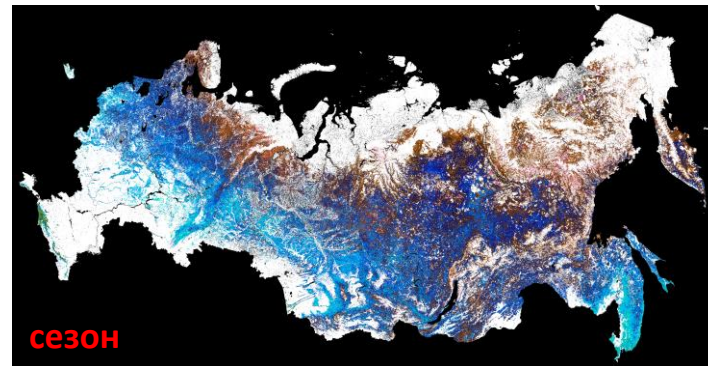
# Фенометрики на основе IKI LAI



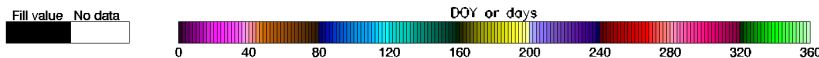
Прослеживается широтная зависимость наступления весны- более поздно на севере. Однако Восточная Сибирь выделяется ранней весной



более ранняя осень на севере



Продолжительность вегетационного сезона тоже имеет широтную зависимость. Восточная Сибирь имеет большую продолжительность из-за ранней весны



# Зависимость фенометрик от породы леса

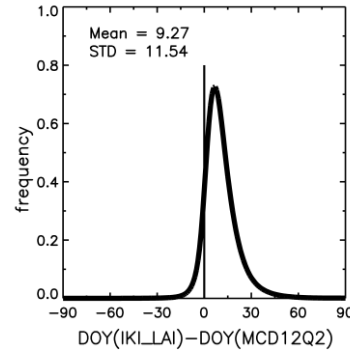
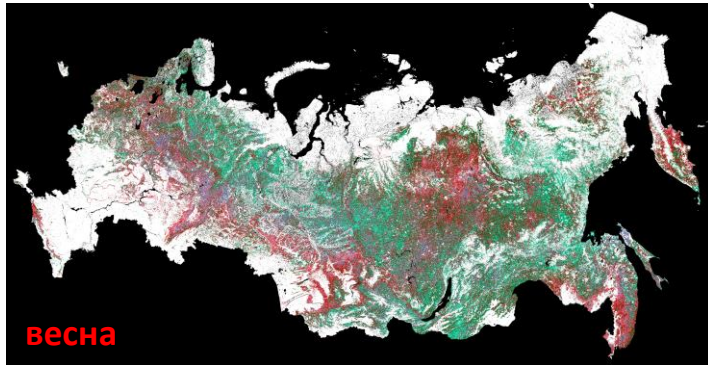
(1)									
Классы леса	Породы леса	Весеннее Min LAI		Max LAI		Осеннее Min LAI		Амплитуда LAI	
		LAI	DOY	LAI	DOY	LAI	DOY	Greening	Browning
<b>DNF</b>	редкая лиственница	0.9	145	2.3	195	0.5	271	1.4	1.8
	лиственница	0.8	128	3.4	194	0.5	279	2.6	2.9
<b>ENF</b>	сосна	1.1	116	4.4	196	0.9	282	3.3	3.5
	ель	1.2	124	4.8	200	1.0	279	3.6	3.8
	пихта	1.3	118	5.0	192	1.1	270	3.7	3.9
	кедр	1.1	111	4.8	196	0.9	283	3.7	3.9
<b>DBF</b>	дуб	0.5	79	5.9	183	0.4	318	5.4	5.5
	бук	0.6	54	5.9	187	0.5	331	5.3	5.4
	Каменная береза	1.1	160	5.5	207	0.5	294	4.4	5.0
	береза	0.6	109	5.4	189	0.5	287	4.8	4.9
	осина	0.6	103	5.7	183	0.6	288	5.1	5.1
	липа	0.5	104	5.9	182	0.4	309	5.4	5.5
	клен	0.5	112	5.8	172	0.4	302	5.3	5.4

# Зависимость фенометрик от породы леса (2)

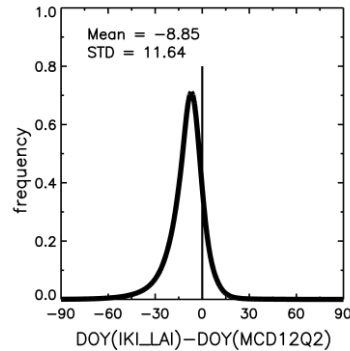
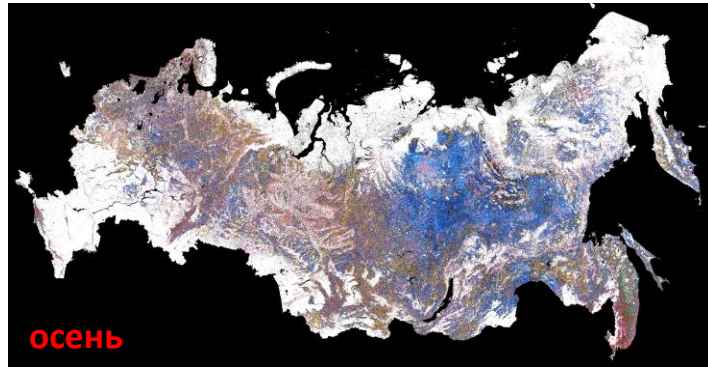
(2)												
Классы леса	Породы леса	даты и интервал весеннего роста				Даты и интервал осеннего увядания				Продолжительность вегетационного сезона		
		15%	50%	90%	интервал	90%	50%	15%	интервал	15%	50%	90%
<b>DNF</b>	Редкая лиственница	151	165	185	34	209	235	253	44	102	70	24
	лиственница	141	159	182	41	209	237	256	47	114	78	27
<b>ENF</b>	сосна	131	154	181	50	213	242	265	52	133	87	32
	ель	137	160	185	48	215	242	263	48	126	82	31
	пихта	127	145	171	44	214	241	259	45	132	96	43
	кедр	126	150	178	52	214	243	265	51	139	92	36
<b>DBF</b>	дуб	121	138	159	37	212	252	278	66	156	114	53
	бук	108	127	150	42	235	276	297	62	188	149	85
	Каменная береза	166	175	191	25	225	249	266	41	100	74	35
	береза	129	149	169	40	211	243	265	54	135	94	41
	осина	124	142	162	38	209	243	266	57	142	101	47
	липа	122	137	156	34	217	254	273	56	151	116	60
	клен	124	135	150	26	204	239	267	63	143	103	54



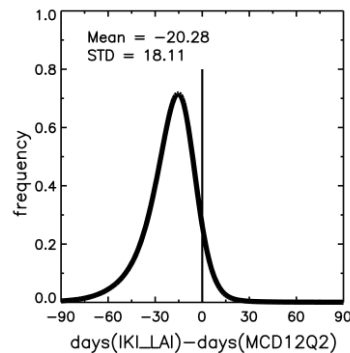
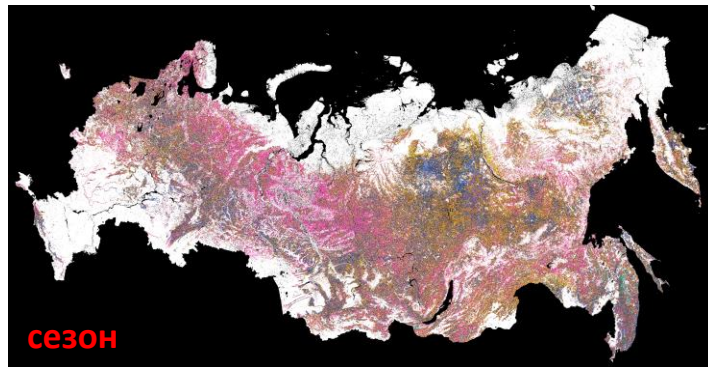
# Сравнение фенометрик IKI LAI и MCD12Q2



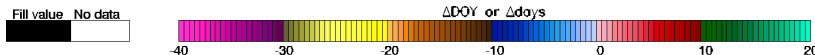
Используя LAI вместо EVI2 весна наступает позже. В особенности эффект заметен на севере европейской части и юге Сибири



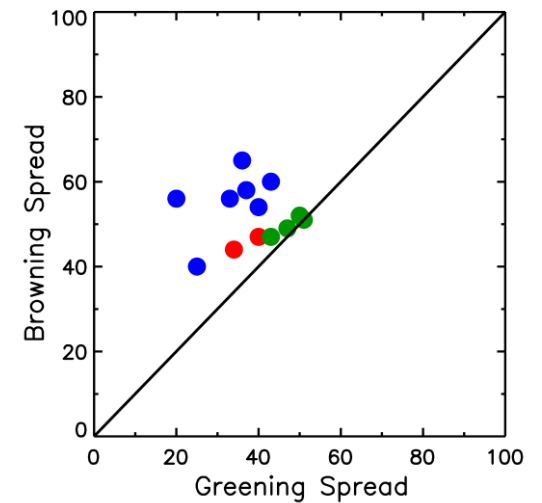
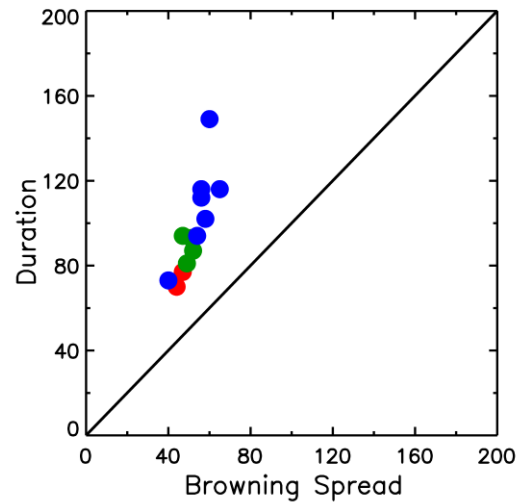
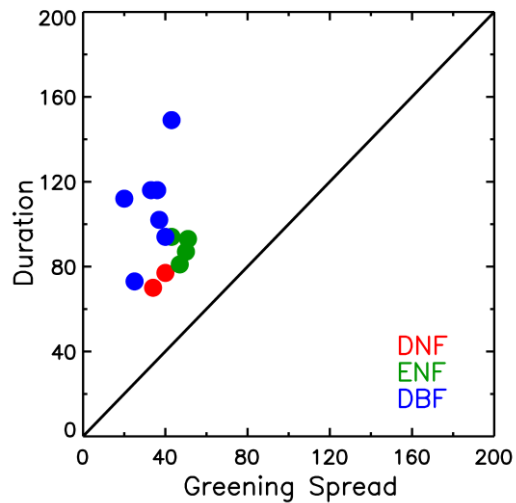
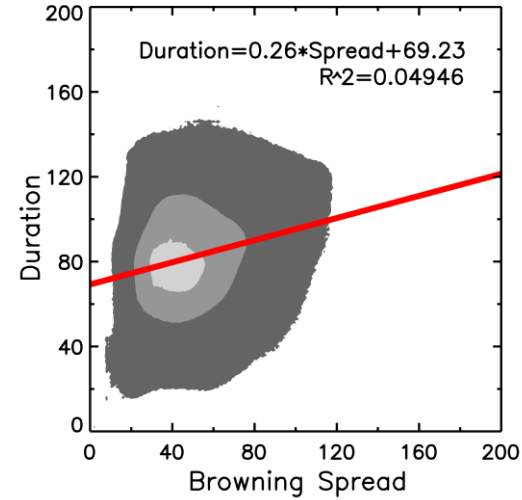
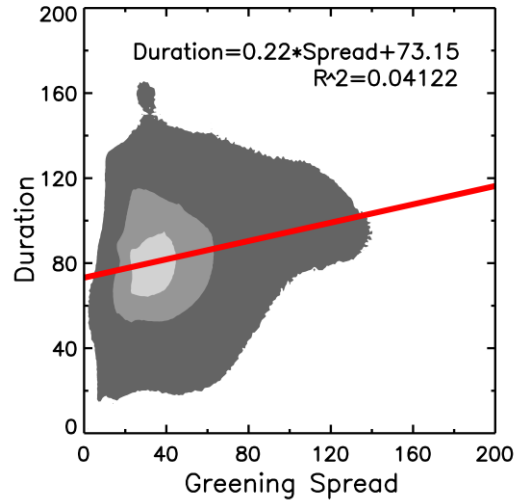
.. а также более ранняя осень с акцентом на те-же регионы.



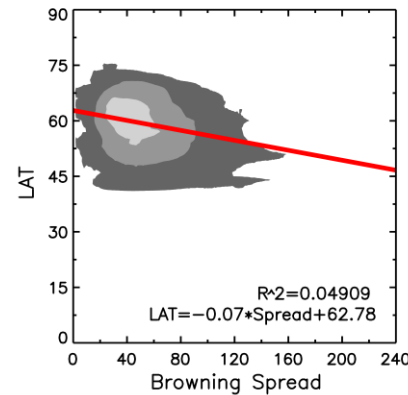
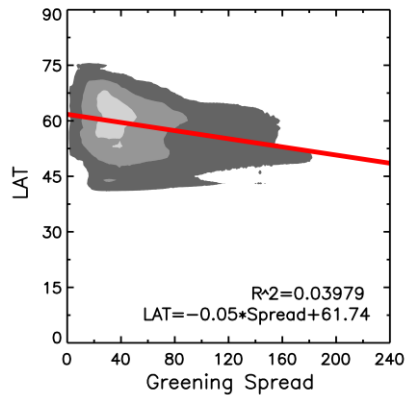
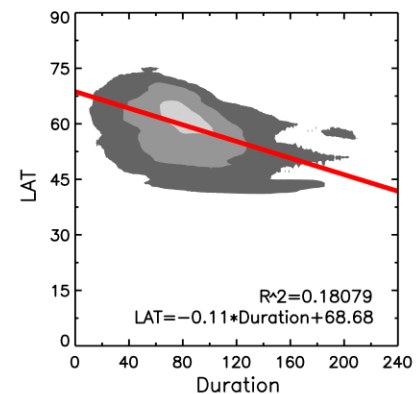
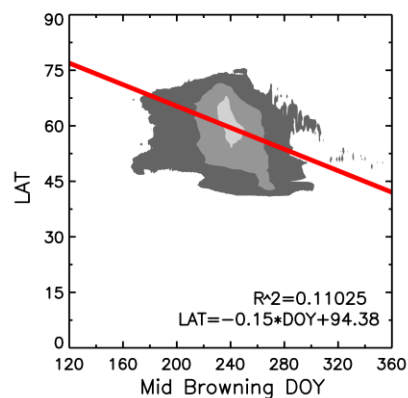
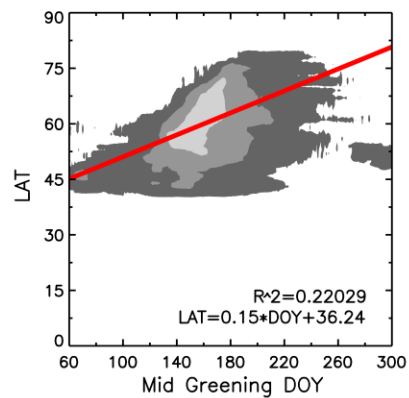
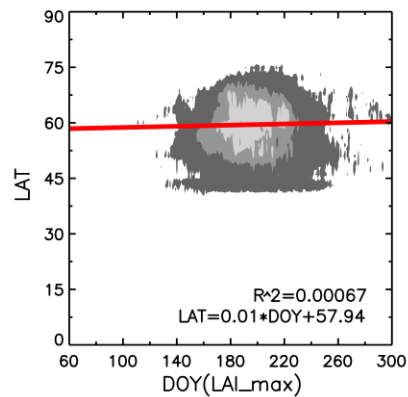
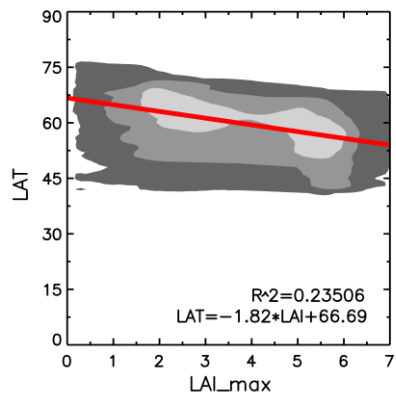
В целом более поздняя весна на 9.3 дней, более ранняя осень на 8.9 дней и более коротки вегетационный сезон на 20.3 дней



# Статистические соотношения между продолжительностью сезона и весенним расцветом и осенним увяданием



# Статистическая зависимость фенометрик от широты



# Основные результаты

- Дано концептуальное объяснение различия сезонных профилей радиометрических параметров VI (NDVI и EVI2) и биофизического параметра LAI.
- Преимущество LAI перед VI:
  - А) VI (радиометрические параметры) подвержены влиянию почвы для разреженного леса и насыщению для плотного леса. LAI- это эталон, показывающий количество листьев
  - В) LAI (биофизический параметр) наиболее эффективно использует свой динамический диапазон, обладает лучшей чувствительностью к зеленой массе и к породам леса
- Используя суточный MODIS LAI продукт были рассчитан продукт IKI LAI фенометрики для лесов России. Рассчитаны вариации фенометрик как функция пород леса
- Фундаментальной проблемой остается сильная вариация LAI хвойных пород. Крайне низкие значения зимой могут быть вызваны отсутствием фотосинтеза хвои.

Shabanov, N.V., et al. (2023). Utility of LAI for Monitoring Phenology of Russian Forests. *Remote Sensing*, 15, 5419, <https://doi.org/10.3390/rs15225419>

Работа выполнена в рамках реализации важнейшего инновационного проекта государственного значения "Разработка системы наземного и дистанционного мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов на территории Российской Федерации, обеспечение создания системы учета данных о потоках климатически активных веществ и бюджете углерода в лесах и других наземных экологических системах» (рег. № 123030300031-6). Обработка данных ДЗЗ проводилась с использованием ресурсов ЦКП «ИКИ-Мониторинг», развиваемого и поддерживаемого в рамках темы «Мониторинг» (госрегистрация № 01.20.0.2.00164).