

**Двадцать третья международная конференция  
«СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ  
ИЗ КОСМОСА»**

*10-14 ноября 2025, Москва, Россия*

*Институт космических исследований РАН*

**Определение породного состава и возрастных классов  
древостоев Центрально-Черноземного района по  
многовременным изображениям Sentinel-2**

*Дмитриев Е.В. (ИВМ РАН), Кондранин Т.В. (МФТИ),  
Мельник П.Г. (МГТУ им. Н. Э. Баумана), Донской С.А. (Рослесинфорг)*

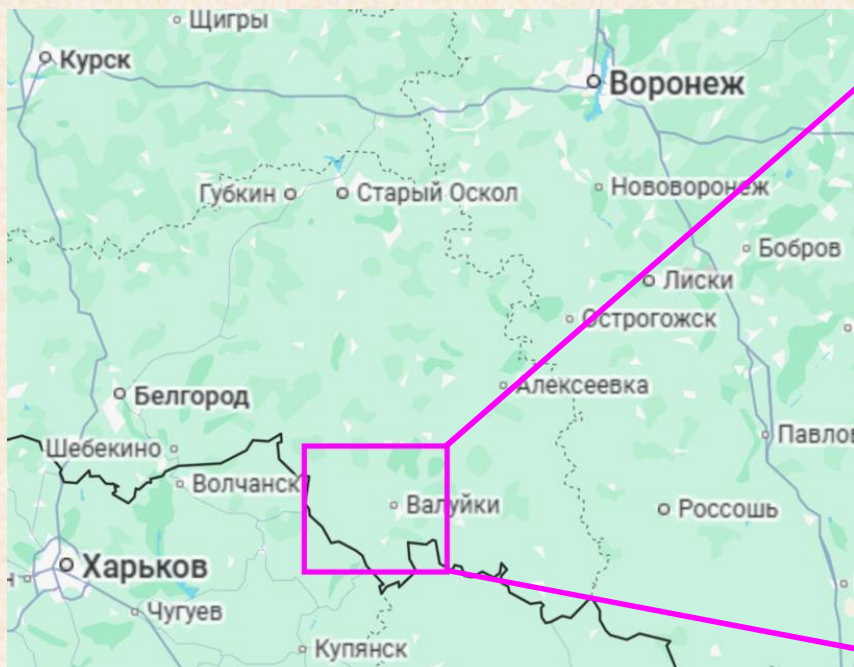


**2025**



# Характеристики района исследования

Местоположение



План лесонасаждений



В качестве района исследований выбрана территория **Валуйского лесничества**, расположенного в окрестностях города Валуйки на юго-востоке Белгородской области. Леса данного района относятся к степной и лесостепной зонам с преобладанием широколиственных пород.

Лесистость района составляет примерно 8%.

Общая площадь объектов лесоустройства - 20.2 тыс. га (всего ~5.5 тыс. лесотаксационных выделов).

Для проведения расчетов использованы 4402 выдела, удовлетворяющие условиям:

- площадь выдела не менее 0.1 га;
- в атрибутах контуров выдела имеется информация о доминантной породе, классе возраста, бонитете и полноте.



# Спутниковые данные

Используются мультиспектральные спутниковые изображения **Sentinel-2**, полученные для обследуемой территории за период с **2017 по 2025 г.**

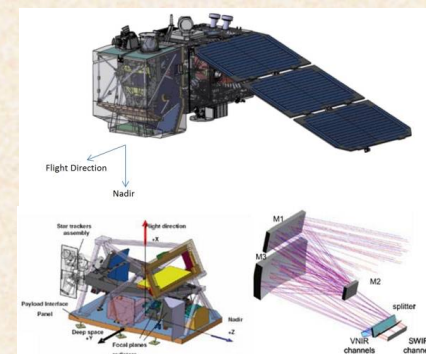
Уровень обработки - L2A (отражательная способность на нижней границе атмосферы)

Базовые линии обработки: 0500, 0509, 0510, 0511.

Сравнение различных базовых линий для выбранной тестовой даты показало, что для 95% пикселей различие отражательной способности не превышает 5%, а среднее различие составляет 1%.

Количество снимков по месяцам:

Март - 2	Июнь - 4	Сентябрь - 6
Апрель - 3	Июль - 3	Октябрь - 10
Май - 8	Август - 3	Ноябрь - 2



## Используемые спектральные каналы

Аббревиатура канала	Номер канала / разрешение (м)	S2A		S2B	
		Центральная длина волны (нм)	Полуширина (нм)	Центральная длина волны (нм)	Полуширина (нм)
B	2 / 10	492.7	65	492.3	65
G	3 / 10	559.8	35	558.9	35
R	4 / 10	664.6	30	664.9	31
RE	5 / 20	704.1	15	703.8	16
NIR	8 / 10	832.8	105	832.9	104

## Вегетационные индексы

Наименование ВИ	Расчетная формула
NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)	$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R}$
NDRE (Normalized Difference Red Edge Index)	$NDRE = \frac{NIR - RE}{NIR + RE}$
ARI2 (Anthocyanin Reflectance Index 2)	$ARI2 = NIR \cdot \left( \frac{1}{G} - \frac{1}{RE} \right)$
CRI2 (Carotenoid Reflectance Index 2)	$CRI2 = \frac{1}{B} - \frac{1}{RE}$



# Наземные данные

Актуализация используемых данных лесоустройства проведена в 2015 году.

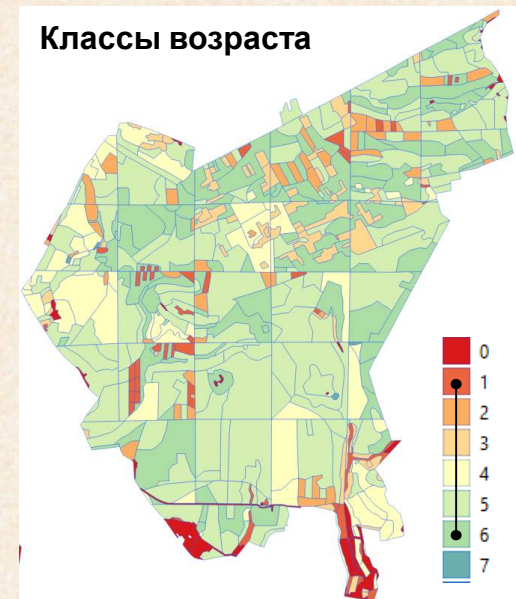
Всего насчитывается 24 доминантных вида, среди которых наибольшую площадь занимают дуб черешчатый, сосна обыкновенная, ясень обыкновенный и осина.

Род	Площадь, га	Род	Площадь, га
Дуб	15721	Береза	22.7
Сосна	1691.4	Ива	21.3
Ясень	1278.9	Яблоня	16.5
Осина	426.5	Липа	14.9
Клен	138.9	Лещина	4.1
Ольха	105.4	Вишня	2.4
Вяз	101	Ель	1.5
Тополь	54.8	Лиственница	0.6
Акация	31.1	-	-

Возрастная структура наиболее полно представлена для дубовых древостоев. Рассматривались бонитеты с 1 по 3, выбраны бонитеты 1, 1-2 и 2.

Класс возр.	Возр. интерв.	Пл. общ., га	Пл. с полн.>0.7, Га
0	непокрытые лесом	87.6	-
1	1-20	193.3	161.4
2	21-40	805.5	727.4
3	41-60	1196.1	1065.2
4	61-80	5182.3	4647.9
5	81-100	7144.3	6254.2
6	101-120	1100.5	858.4
7	121-140	8.1	6.2
8	141-160	3.3	-

При рассмотрении выделов площадью не менее 5 га, занимаемых древостоями с полнотой более 0.7, первым 6 возрастным классам соответствуют суммарные площади от 161 до 6254 га, что позволяет получить репрезентативные данные о разделимости возрастных классов по спектрально-временным признакам.





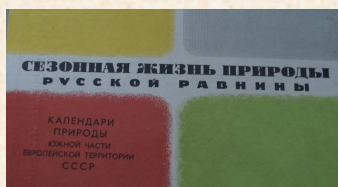
# Фенологические данные

## Значимые явления

1. начало распускания листвы
2. цветение
3. начало осенней раскраски листвы
4. полная осенняя окраска листвы
5. конец листопада

## Источники информации

АН СССР, Географическое общество СССР, Фенологический сектор:



*Сезонная жизнь природы русской равнины : Календари природы южной части Европейской территории СССР / Тауровский В.А., (ред.). - Л.: Наука 1980г. 112 с.*

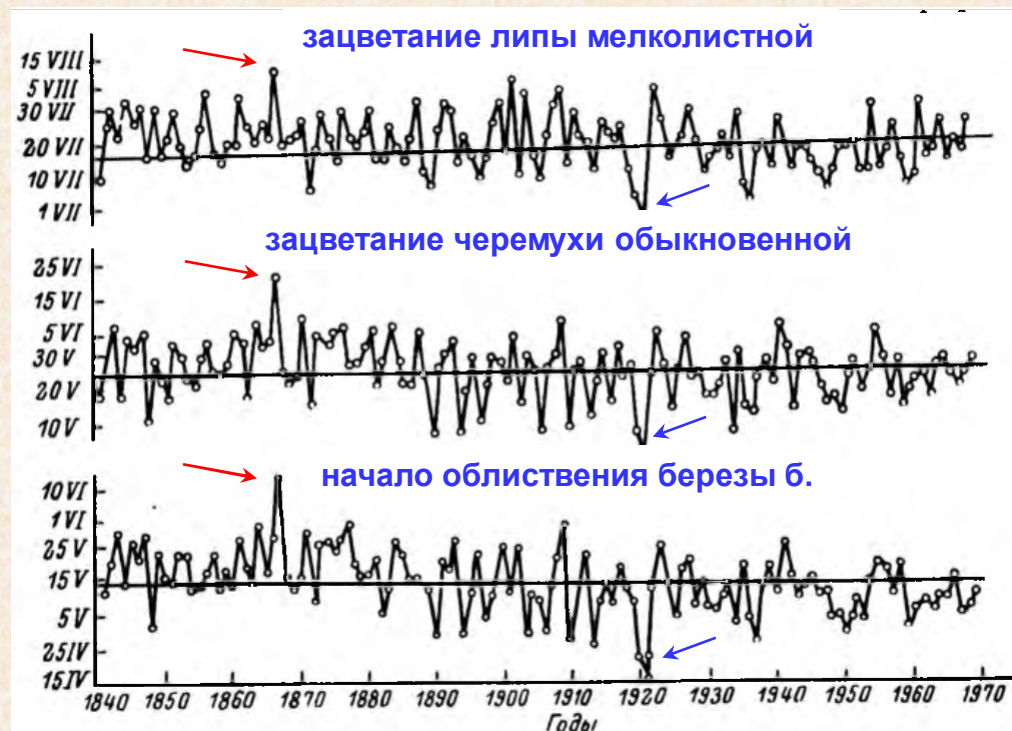
*Сезонная жизнь природы Русской равнины. Календари природы Нечерноземной зоны РСФСР за 1960-1972 гг. / Тауровский В.А. (ред.). Л.: Наука, 1979. 163 с.*

Гафферберг И.Г. Фенологический календарь основных древесных пород и некоторых, связанных с ними, животных мордовского государственного заповедника. 1945 год // Труды Мордовского государственного природного заповедника им. П. Г. Смидовича. 2020. №25. С. 50–96.

<https://fenolog.rgo.ru/page/nablyudeniya>

## Дендрофенологические ряды

Парк Лесотехнической академии, Выборгский район Санкт-Петербурга).



## Начало распускания листвы, ЛТА

Порода	1950	1951	1952	1953	1954	1955	1956	1957	1958	1959	1960	1961	1962	1963	1964	1965	1966	1967	1968	1969	1970	1971	1972	1973	1974
Береза бородавчатая	28.4	5.5	9.5	3.5	14.5	19.5	17.5	12.5	18.5	1.5	6.5	7.5	10.5	6.5	9.5	9.5	15.5	5.5	6.5	10.5	5.5	10.5	8.5	4.5	12.5
Дуб черешчатый	8.5	18.5	25.5	16.5	22.5	3.6	27.5	18.5	26.5	9.5	15.5	19.5	22.5	16.5	23.5	24.5	23.5	20.5	25.5	23.5	22.5	20.5	22.5	19.5	2.6
Осина	-	-	-	-	-	-	23.5	14.5	21.5	5.5	12.5	14.5	14.5	11.5	17.5	18.5	20.5	13.5	-	16.5	13.5	16.5	19.5	11.5	23.5

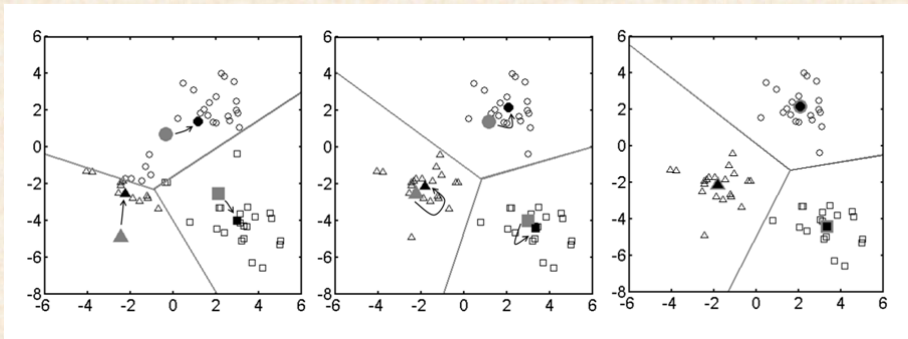


# Кластерный анализ спектральных признаков

Использовался алгоритм K-means++. Расстояния определяются как квадрат Евклидовой метрики. Целевая функция алгоритма состоит в минимизации функционала

$$\Phi(C) = \Phi(X_n, C_{X_n}, k) = \sum_{i=1}^k \sum_{x_j \in P_i} \|x_j - C_i\|^2$$

Инициализация центроидов производится таким образом, чтобы они находились далеко друг от друга и были расположены в областях с высокой плотностью данных. Производится стандартизация признаков.



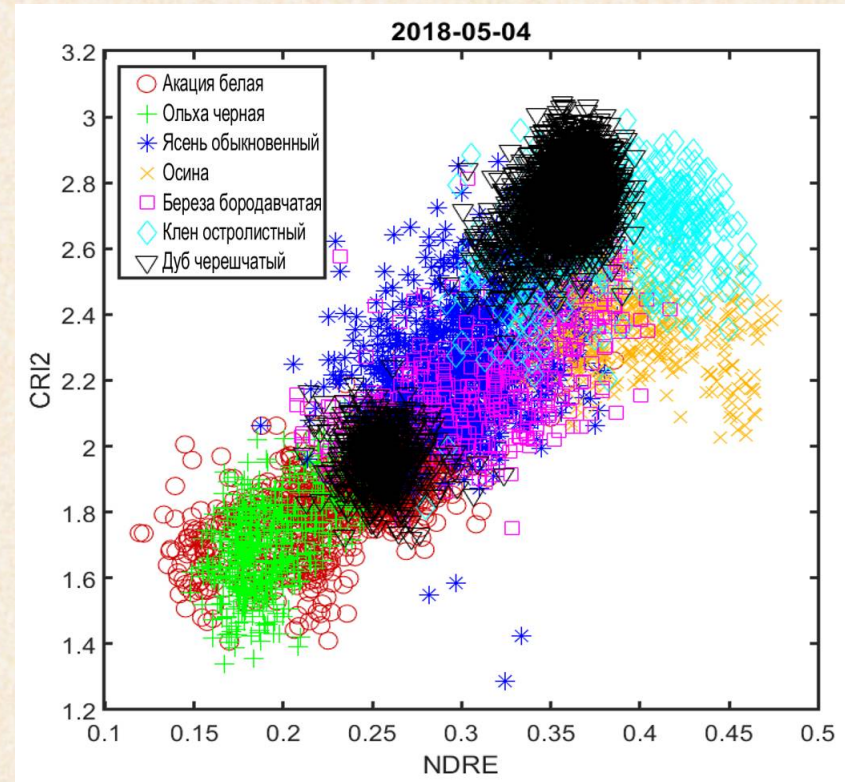
Для оптимизации числа кластеров используется максимизация Gap-статистики

$$Gap_n(k) = \ln \Phi(X_{rand}, C_{X_{rand}}, k) - \ln \Phi(X_n, C_{X_n}, k)$$

и VRC - критерий отношения дисперсий (или индекс Калиньского-Харабаша)

$$VRC_n(k) = \frac{\sum_{i=1}^k n_i \|C_{X_{n_i}} - C\|}{\Phi(X_n, C_{X_n}, k)} \cdot \frac{n-k}{k-1}$$

т.е. (межкластерная дисп./внутрикластерная дисп.) \* коэф.



**Выраженность (качество) кластеризации**

1. Средний силуэт кластера

$$s_n(i) = \frac{\min_m \{ b_m(i) \} - a(i)}{\max \{ a(i), \min(b_m(i)) \}}, \quad (m = 1, \dots, k, m \neq n),$$

2. Индекс Дэвиса-Болдина

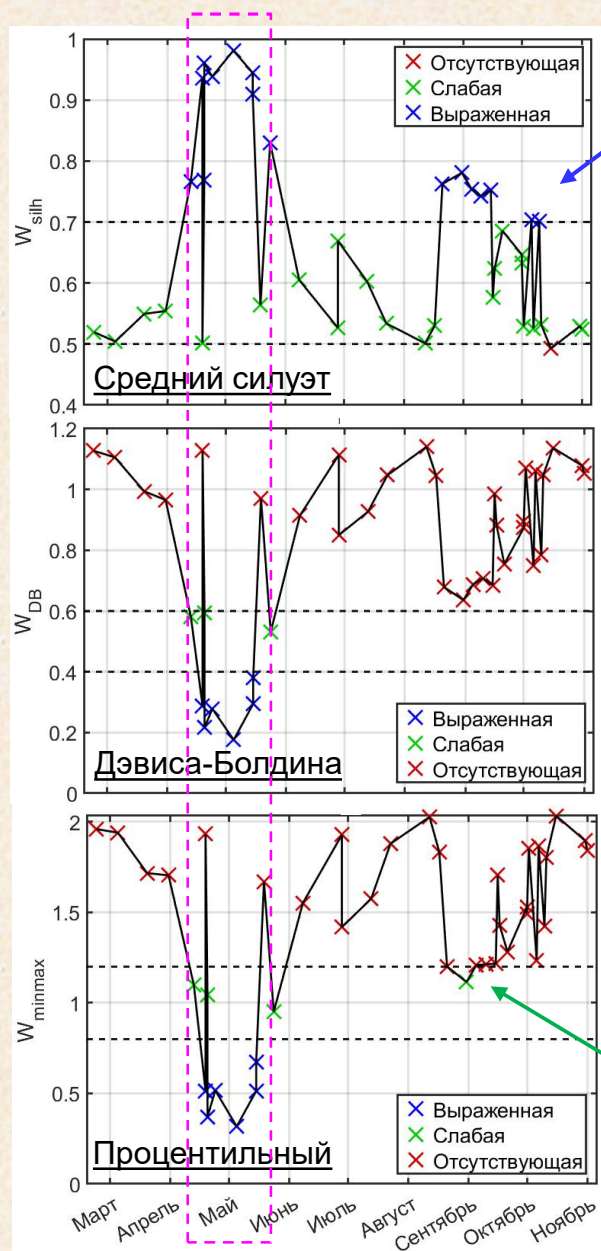
$$DB_n(k) = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \max_{j \neq i} \frac{\frac{\text{mean}_{x_k \in P_i} \|x_k - C_i\| + \text{mean}_{x_k \in P_j} \|x_k - C_j\|}{\|C_i - C_j\|}}$$

3. Процентильный минимаксный индекс  $W_{\min \max}$

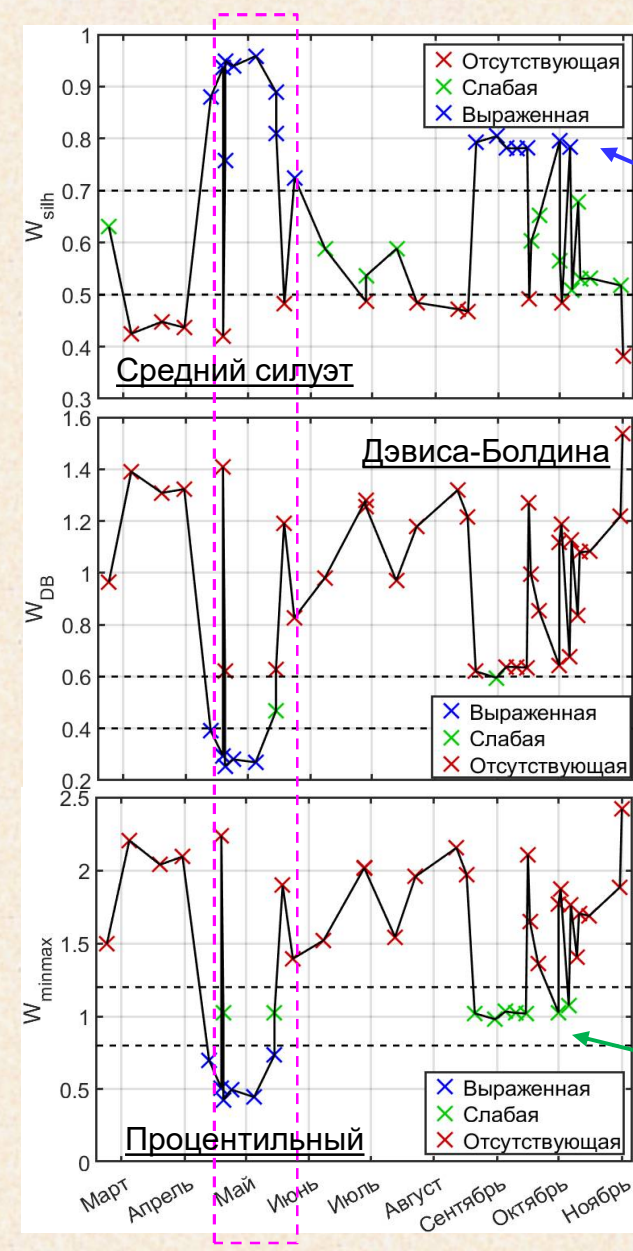


# Годовой ход индексов качества кластеризации (дуб черешчатый)

NDRE - CRI2

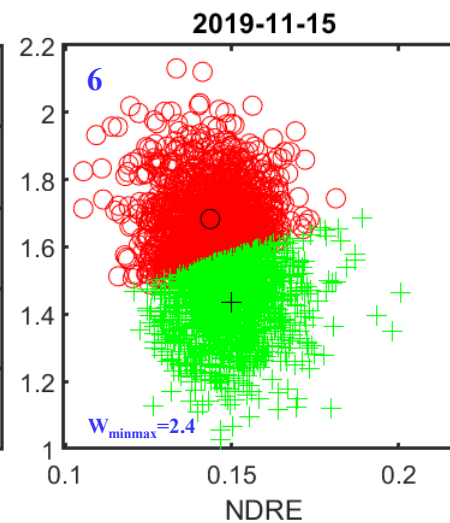
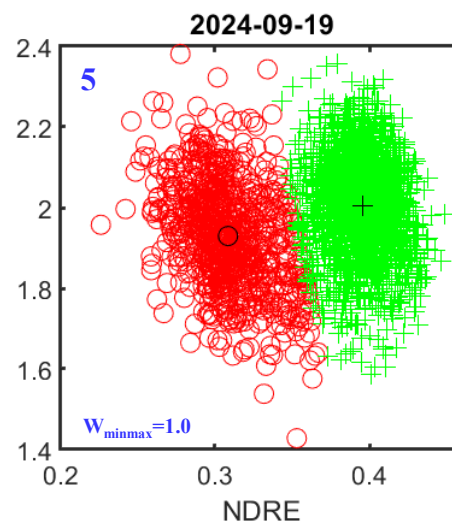
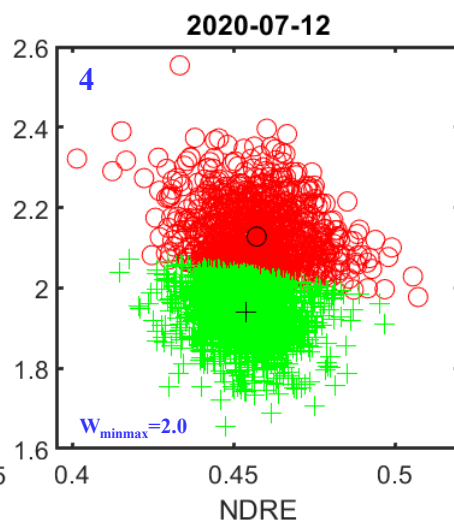
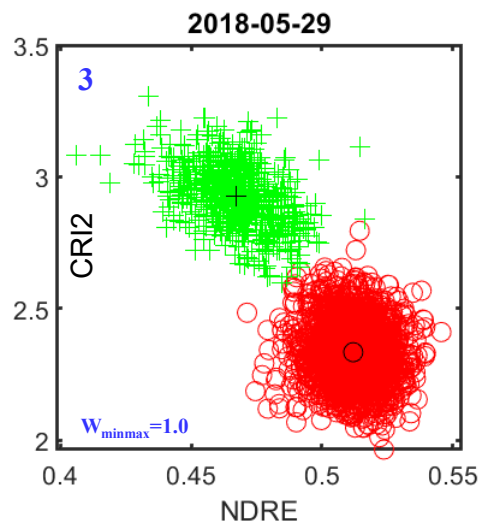
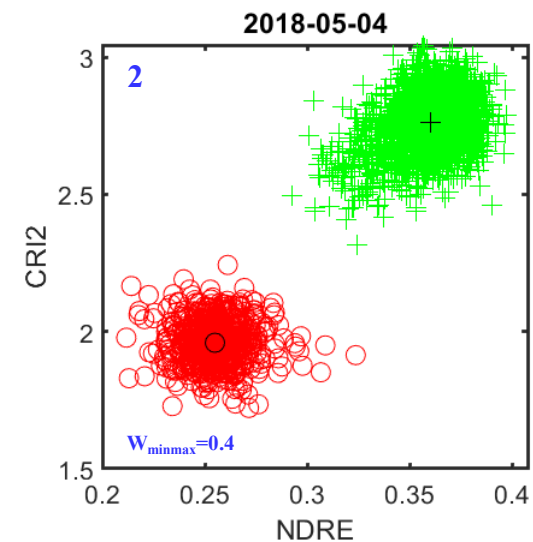
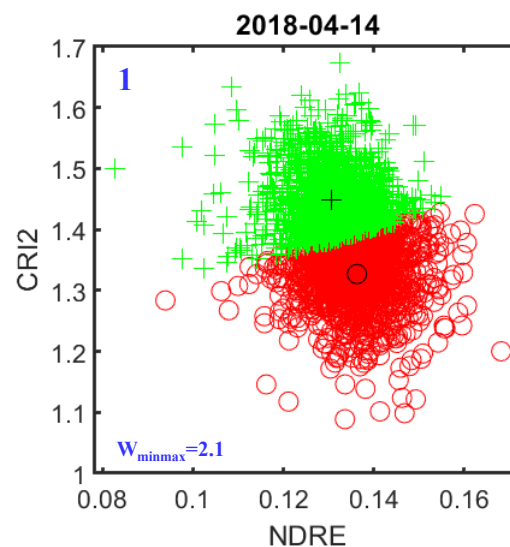
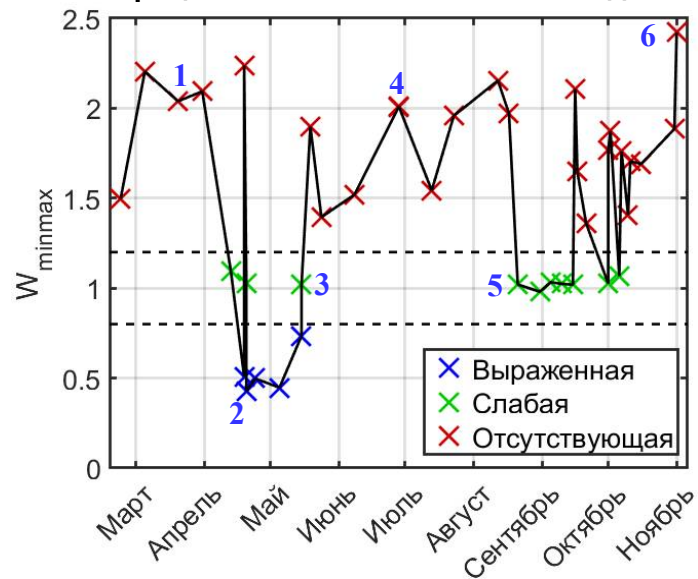


NDVI - NDRE - CRI2 - ARI2



# Характерные примеры кластеризации ВИ насаждений дуба черешчатого

Процентильный минимаксный индекс





# Фенологические формы насаждений дуба черешчатого

Ранняя форма - *Quercus robur* L. var. *praesox*  
Распространение - ландшафты речных долин

Поздняя форма - *Quercus robur* L. var. *tardiflora*  
Распространение - ландшафты ополей и полесий

## Развертывание листа

(Воронежская обл., Крюкова и др., 2022)

Год	Фено-форма	Дата начала	Продолжит.
2019	ранняя	25.04	3
	поздняя	13.05	7
2020	ранняя	28.04	10
	поздняя	18.05	7
2021	ранняя	30.04	7
	поздняя	20.05	4

Одно из первых описаний феноформ дуба ч.  
*Черняев, В. М. (1858). О лесах Украины. М.: Речь.*

Корневая система дуба ранней формы отличается мочковатой структурой, а поздней – стержневой. Деревья ранней формы используют весеннюю влагу верхних горизонтов, а поздней формы, благодаря стержневой корневой системе, потребляют влагу из более глубоких горизонтов и, соответственно, у них позже начинается вегетационный период (Рубцов, 2016)

## Литература

1. Сильченко, И. И. (2019). Ландшафтный подход при обосновании создания насаждений дуба черешчатого различных фенологических форм в Брянской области. *Лесохозяйственная информация*, (1), 6-18.
2. Крюкова, С. А., Кулаков, Е. Е., Ширнина, Л. В., & Мусиевский, А. Л. (2022). Сезонное развитие дуба черешчатого в Пригородном лесничестве Воронежской области. Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства, (2), 46-57.
3. Уткина, И. А., & Рубцов, В. В. (2016). Исследования фенологических форм дуба черешчатого. *Лесоведение*, (6), 466-475.
4. Bobinac, M., Batos, B., Miljković, D., & Radulović, S. (2012). Polycyclism and phenological variability in the common oak (*Quercus robur* L.). *Archives of biological sciences*, 64(1), 97-105.

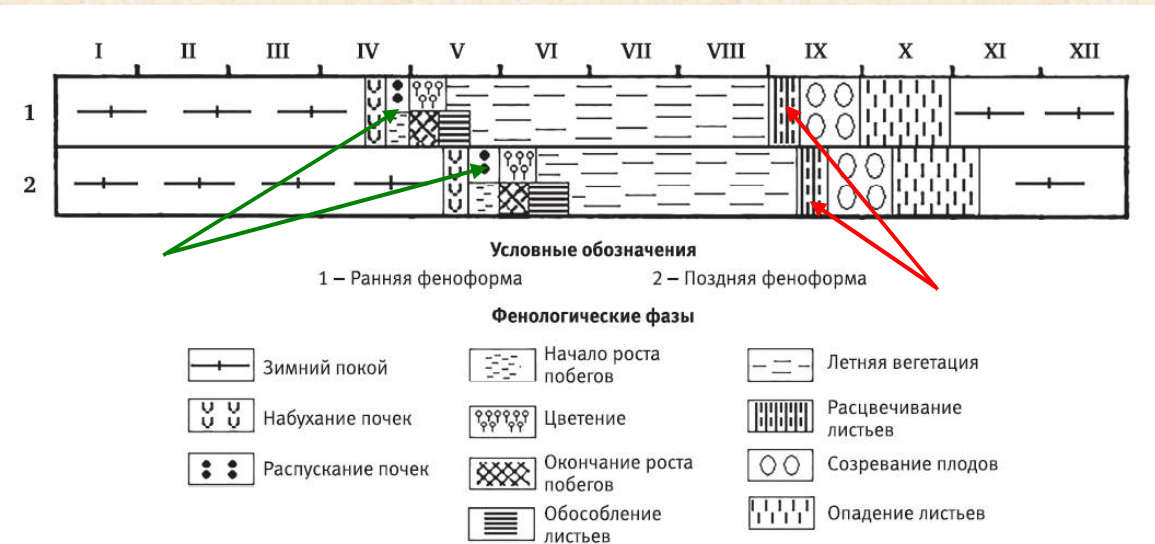


Рис. 1. ФЕНОЛОГИЧЕСКИЙ СПЕКТР ФОРМ ДУБА ЧЕРЕШЧАТОГО НА ТЕРРИТОРИИ БРЯНСКОЙ ОБЛ. В 2009–2013 ГГ. (по месяцам I–XII)

И.И. Сильченко, Лесохоз. информ., 2019

(Брянская обл.)

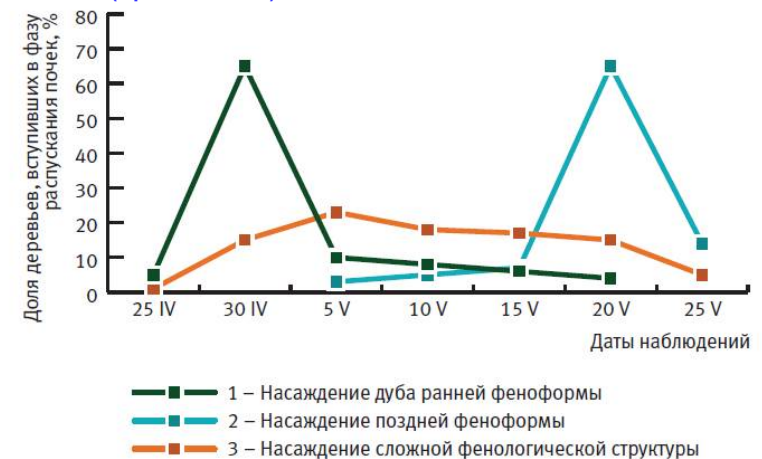
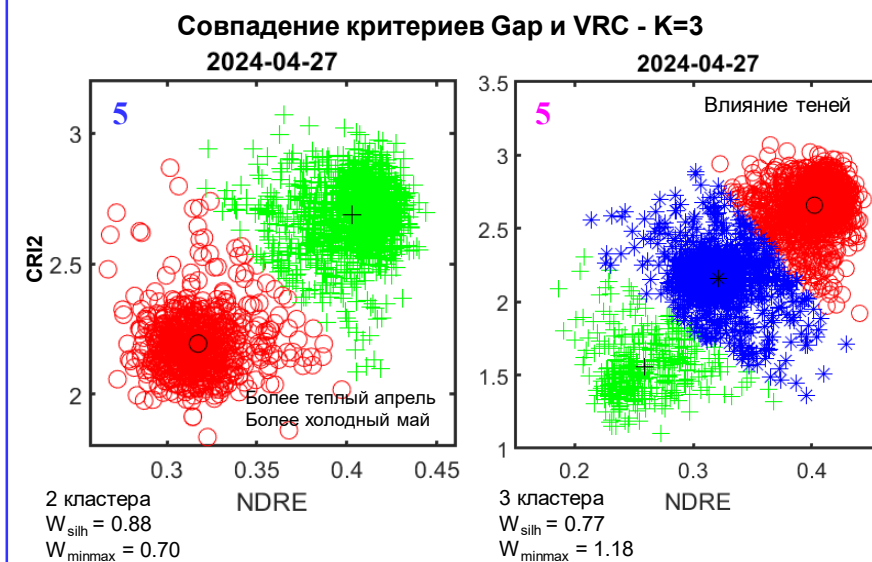
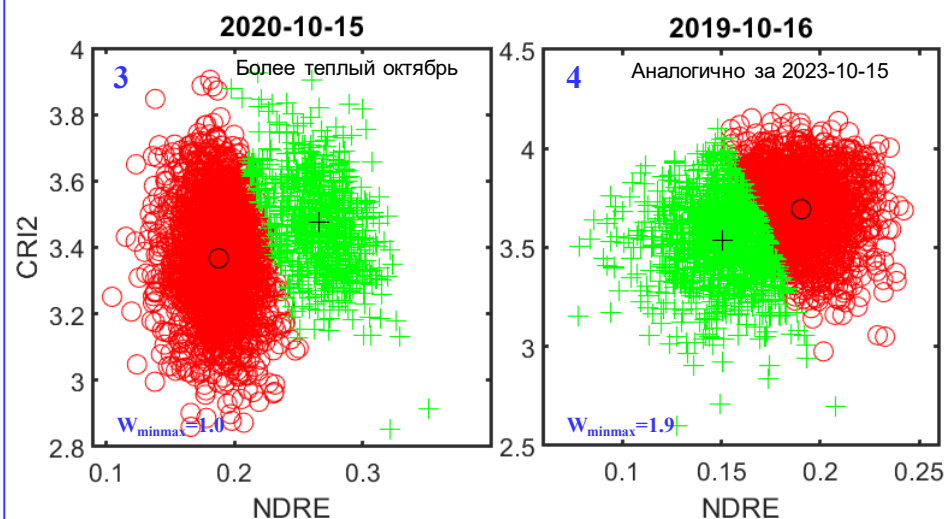
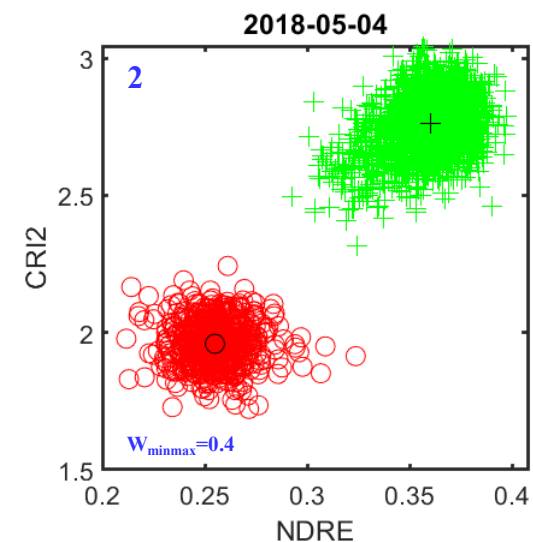
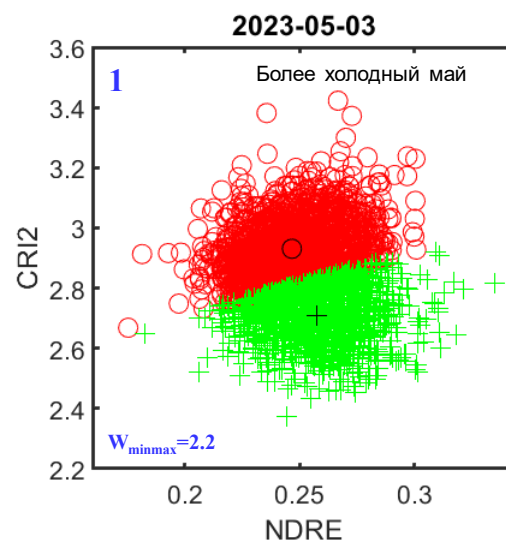
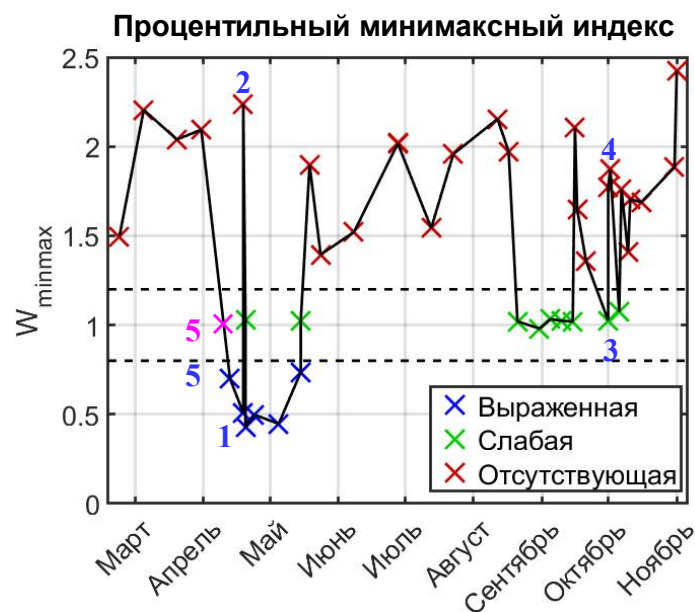


Рис. 2. ФЕНОЛОГИЧЕСКИЙ РИТ НАСАЖДЕНИЙ ДУБА ЧЕРЕШЧАТОГО, СФОРМИРОВАННЫХ РАННЕЙ (1), ПОЗДНЕЙ (2) ФОРМ И ИХ СОЧЕТАНИЕМ (3) (СЛОЖНОЙ ФЕНОЛОГИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ)



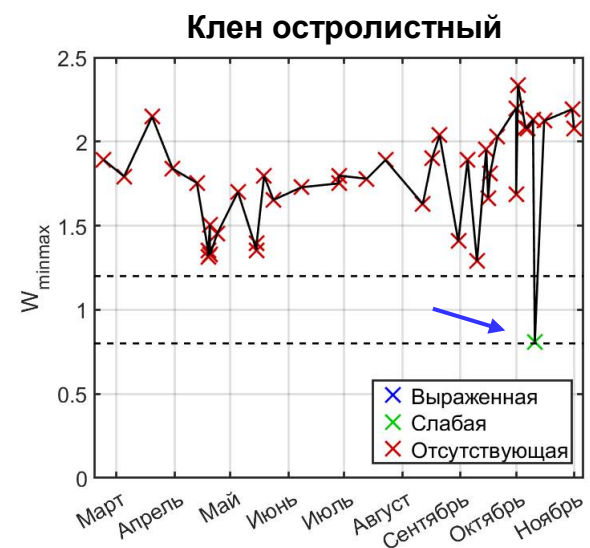
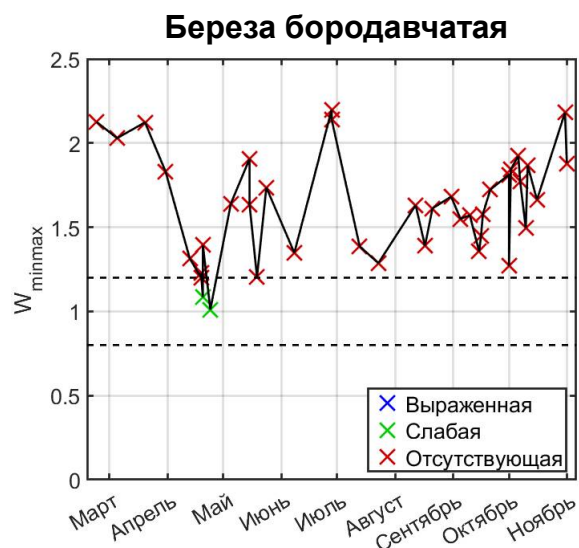
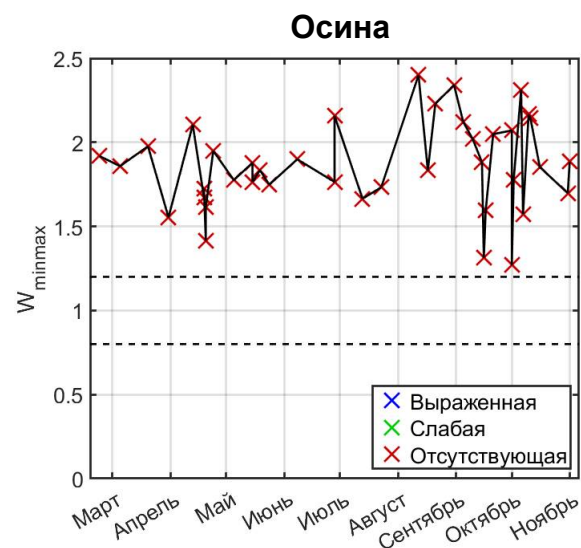
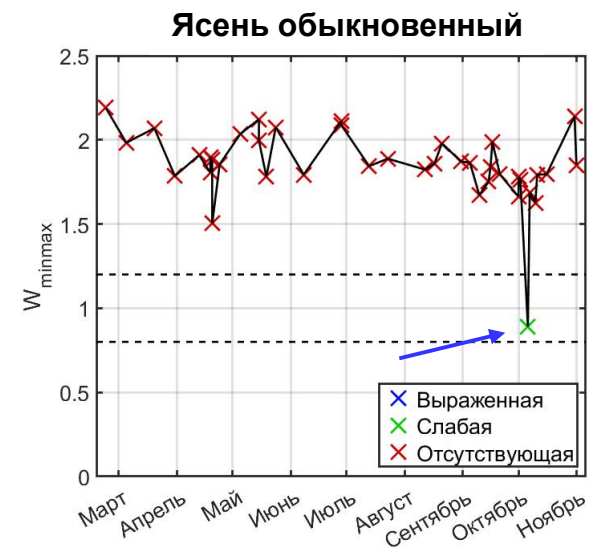
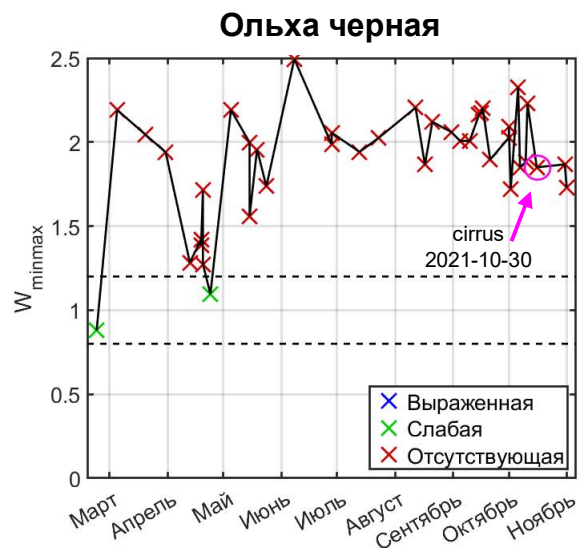
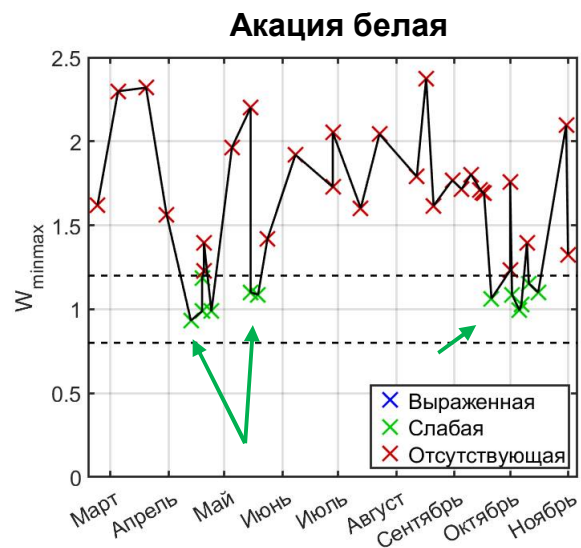
# Особенности кластеризации ВИ насаждений дуба черешчатого





# Годовой ход процентильного минимаксного индекса (другие лиственные виды деревьев)

NDVI - NDRE - CRI2 - ARI2



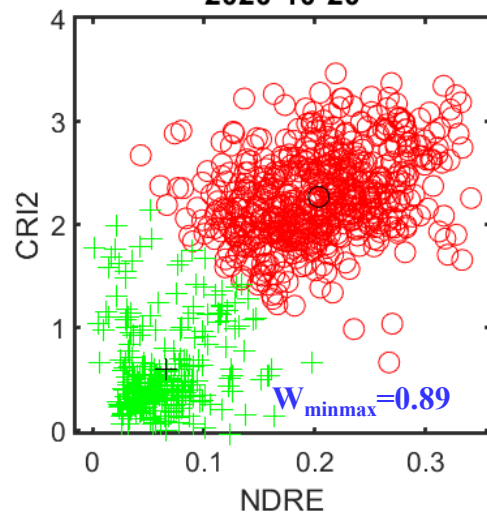


# Особенности кластеризации ВИ

(другие лиственные виды деревьев)

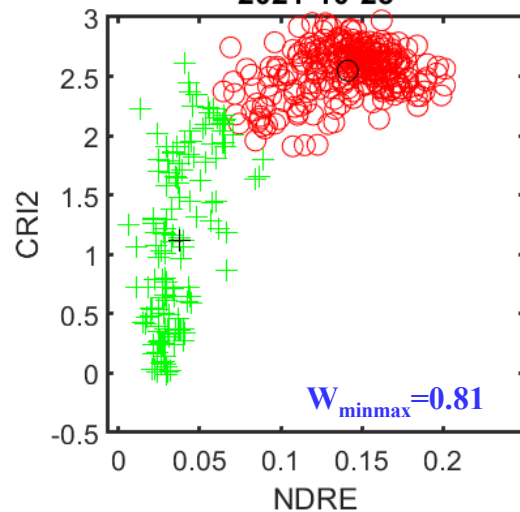
Ясень обыкновенный

2020-10-20



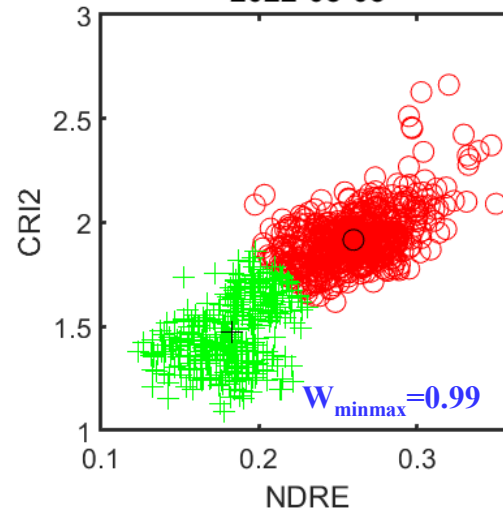
Клен остролистный

2021-10-25

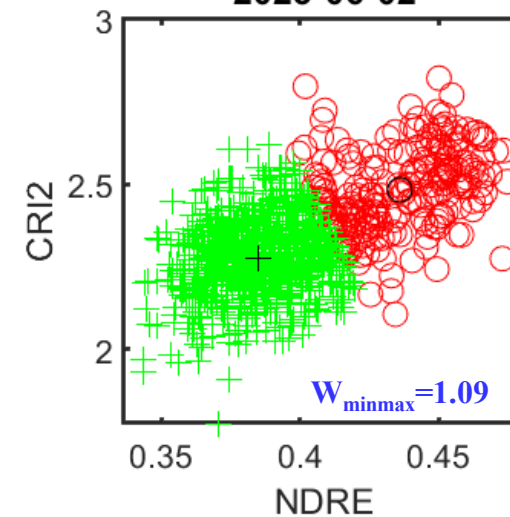


Акация белая

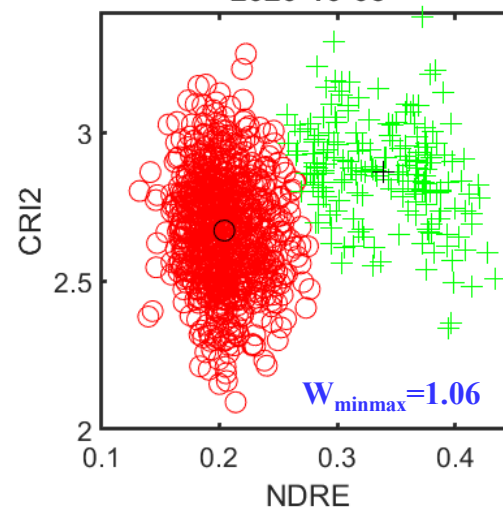
2022-05-03



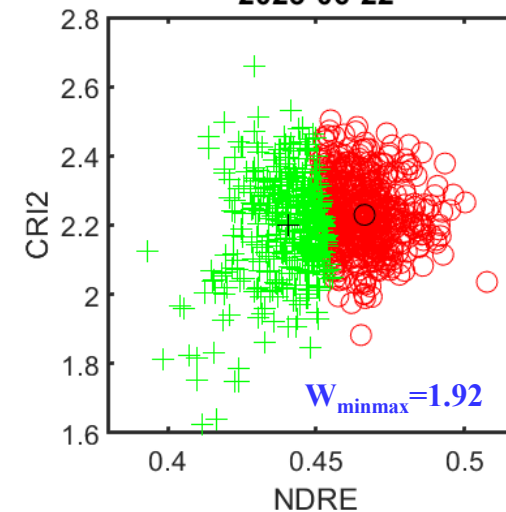
2023-06-02



2020-10-05



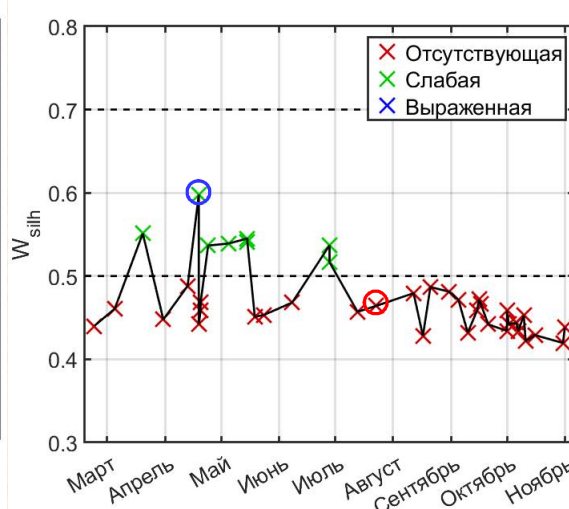
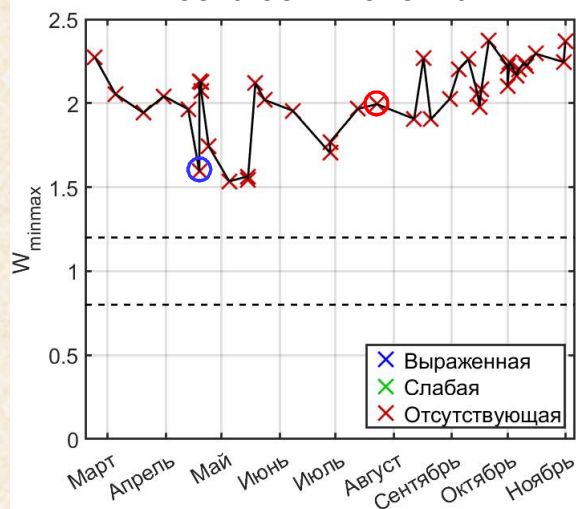
2023-06-22



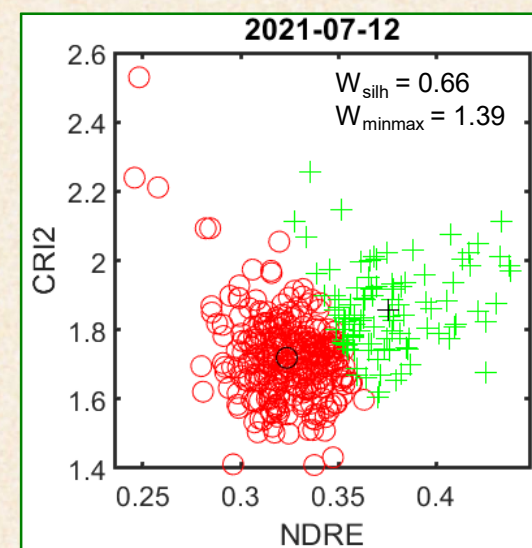
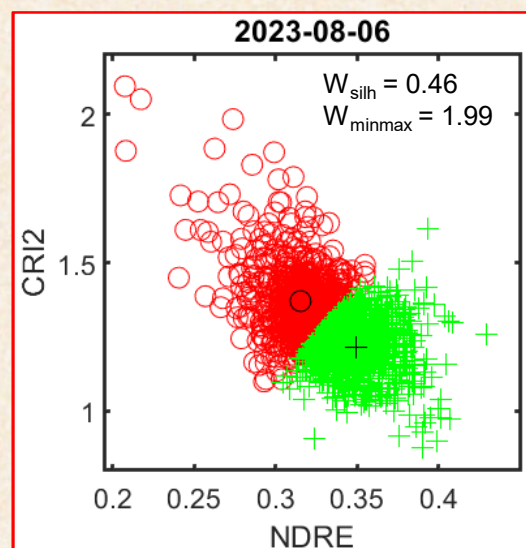
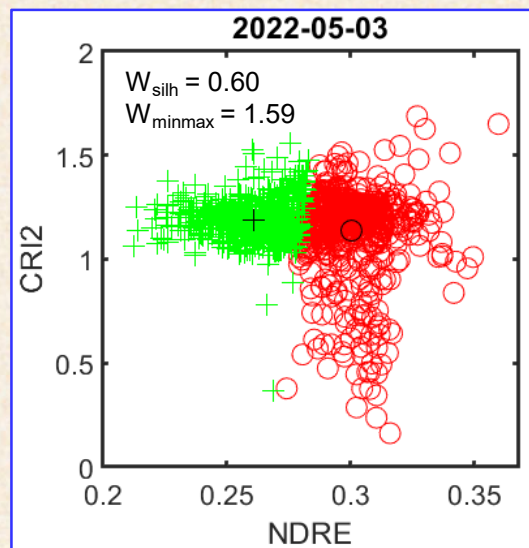
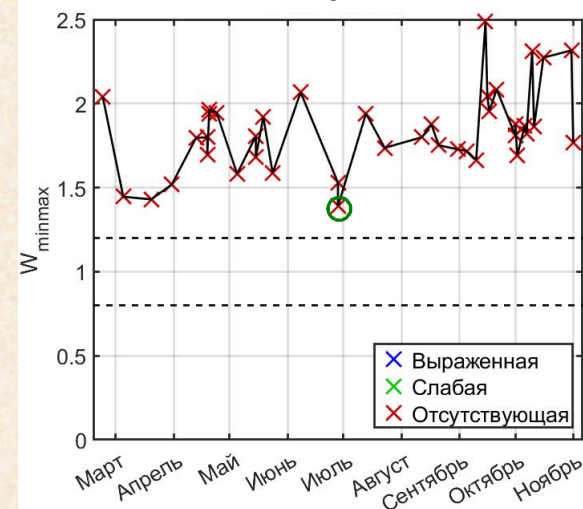


# Кластеризация ВИ хвойных пород

**Сосна обыкновенная**



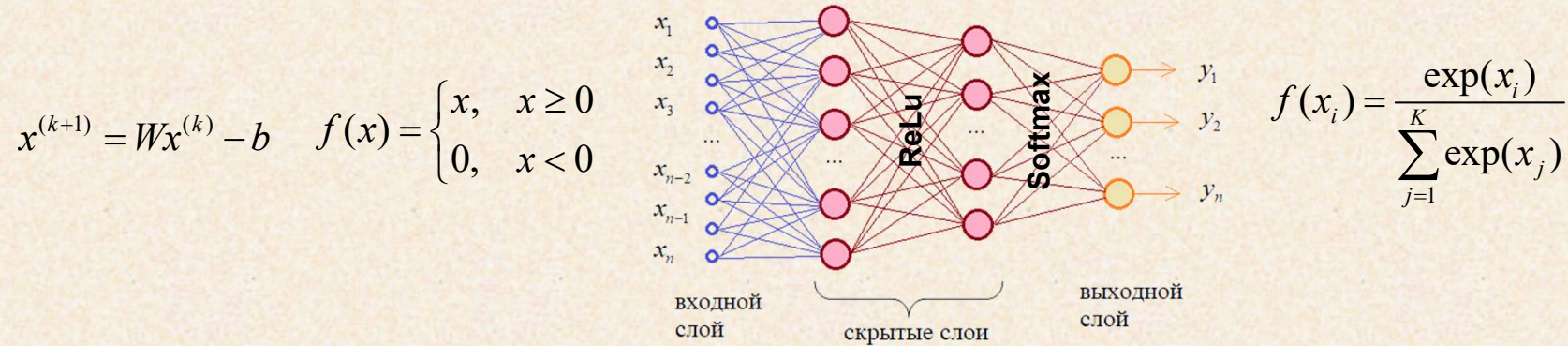
**Сосна крымская**





# Используемые алгоритмы классификации

## 1. Полносвязная нейронная сеть (FCNN)



## 2. Метод К ближайших соседей (KNN)

$$a(u) = \arg \max_{y \in Y} \sum_{i=1}^m [y(i) = y] w(i, u)$$

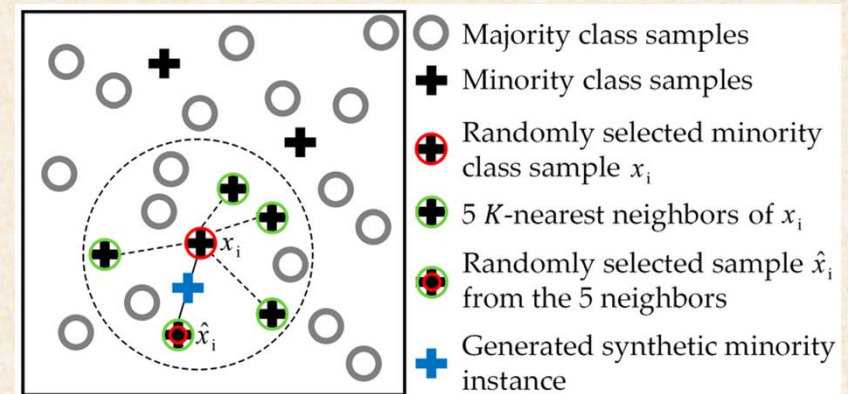
## 3. Квадратичный дискриминантный анализ (QDA)

$$a(x) = \arg \max_i \left( \ln(P(x \sim D_i)) - \frac{1}{2} (x - m_i)^T C_i^{-1} (x - m_i) - \frac{1}{2} \ln(\det(C_i)) \right)$$

## Выравнивание баланса классов

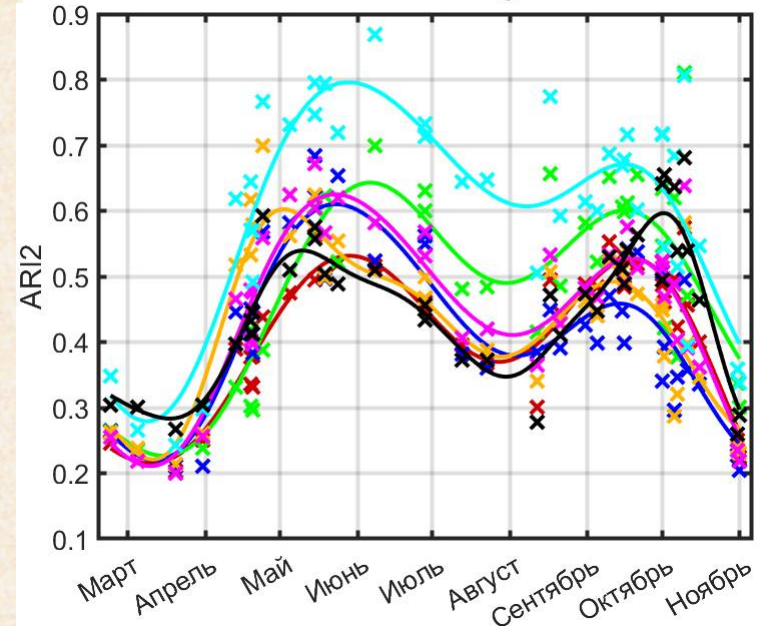
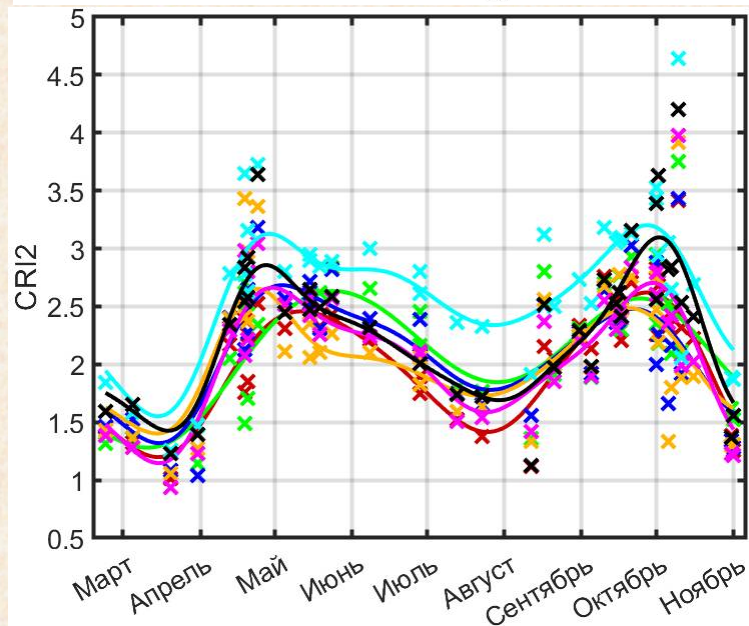
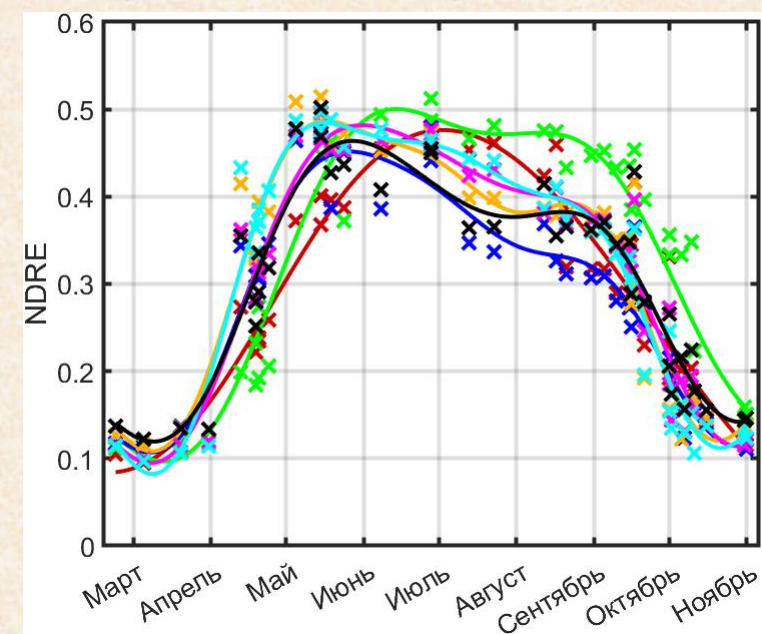
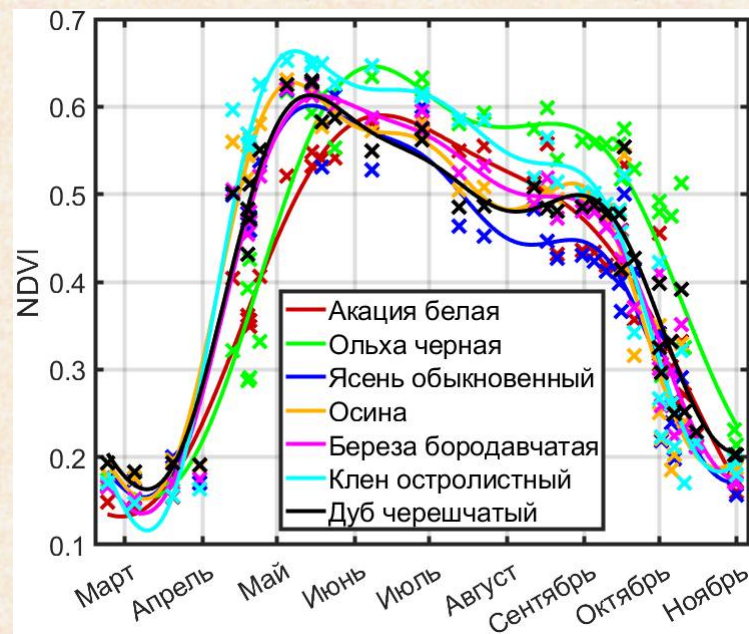
### Метод SMOTE (Synthetic Minority Oversampling Technique)

Для случайного признака миноритарного класса вычисляются к его ближайших соседей из такого же класса. Случайным образом выбирается один из k ближайших соседей. Между исходным признаком и выбранным соседом на отрезке генерируется новая, синтетическая точка с помощью линейной интерполяции..



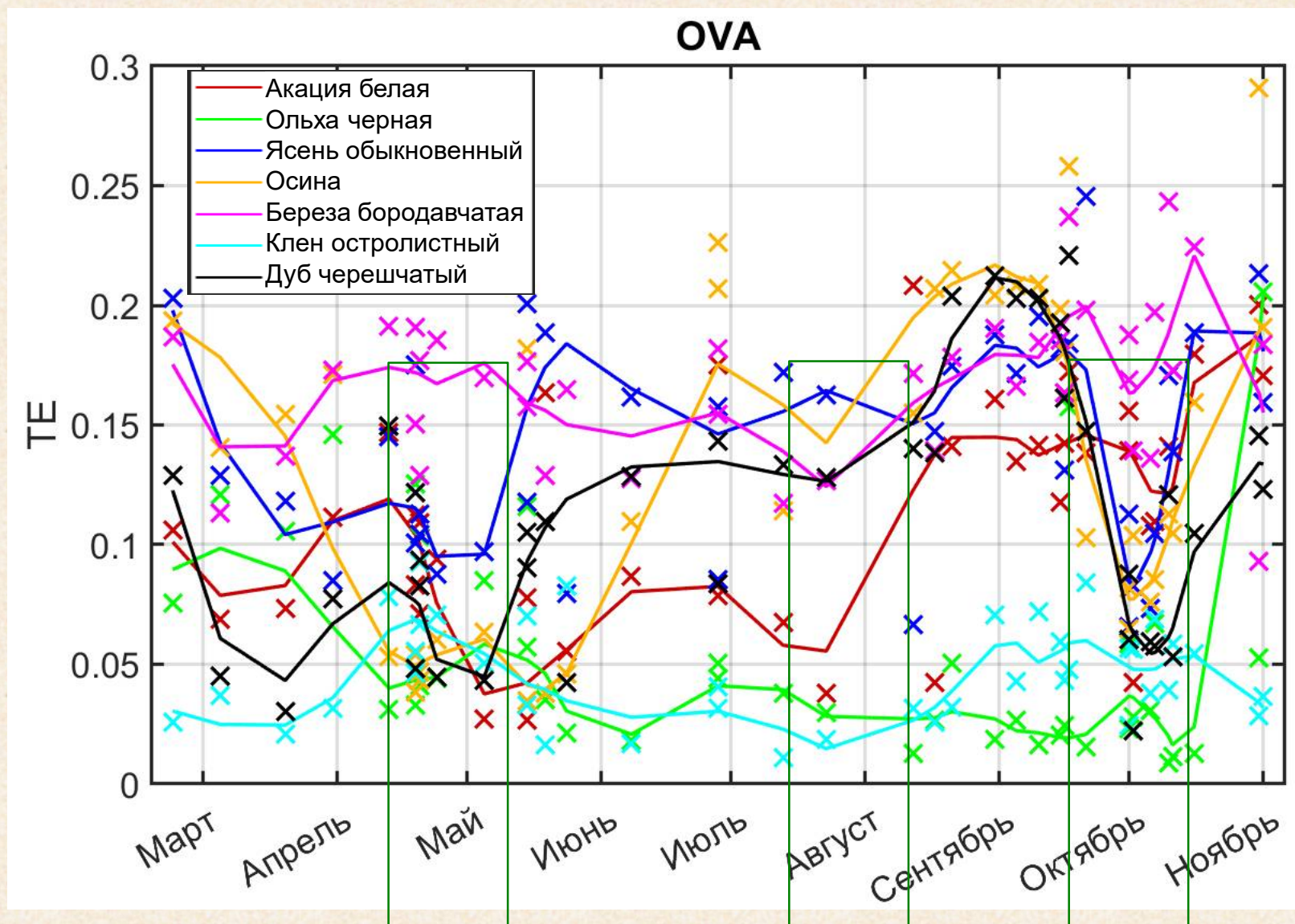


# Годовой ход средних значений ВИ лиственных пород



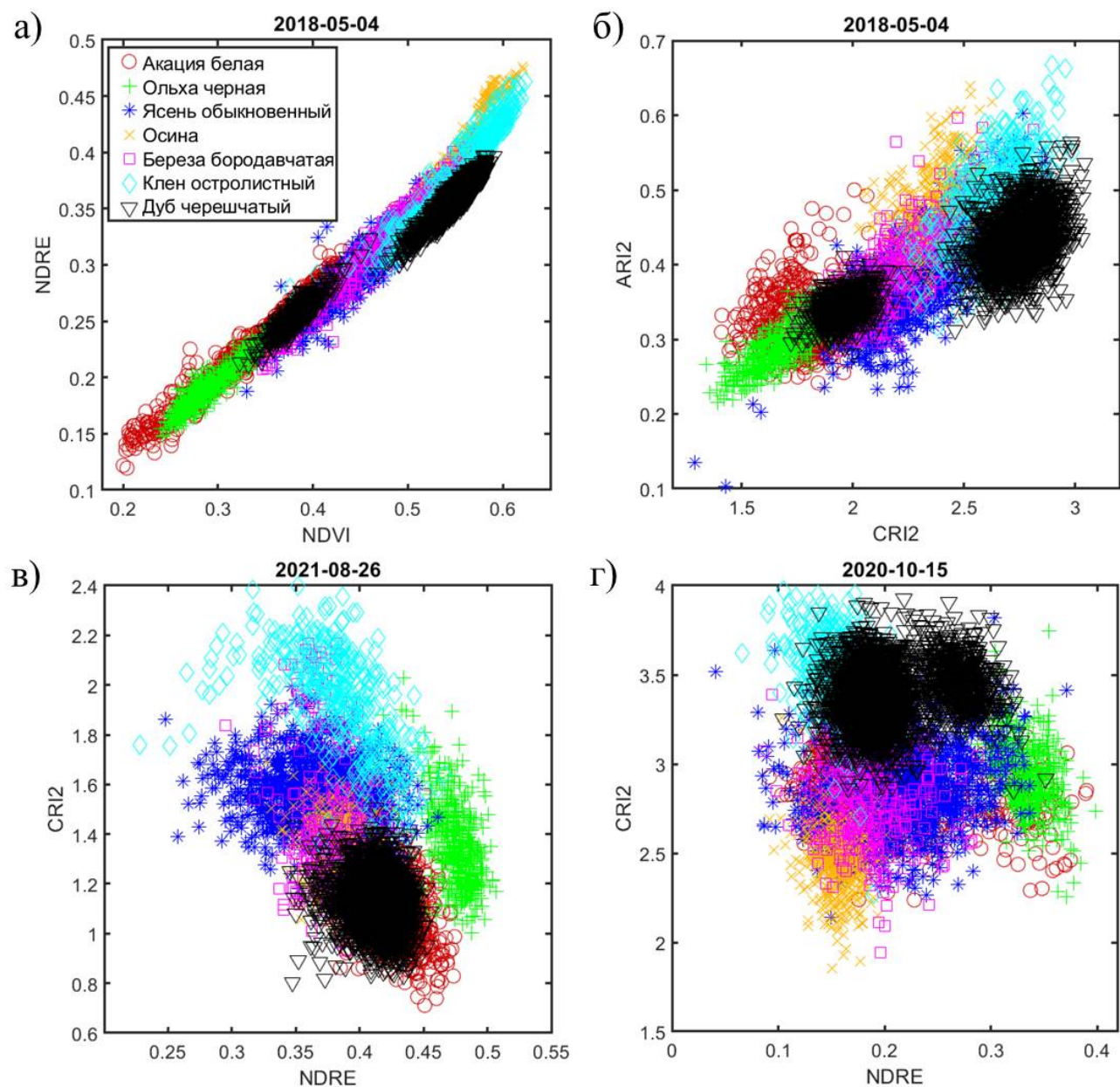


# Оценка разделимости лиственных пород по спектральным признакам в различные периоды



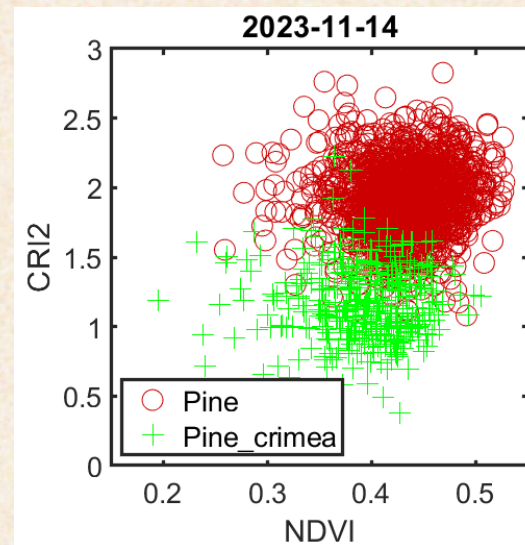
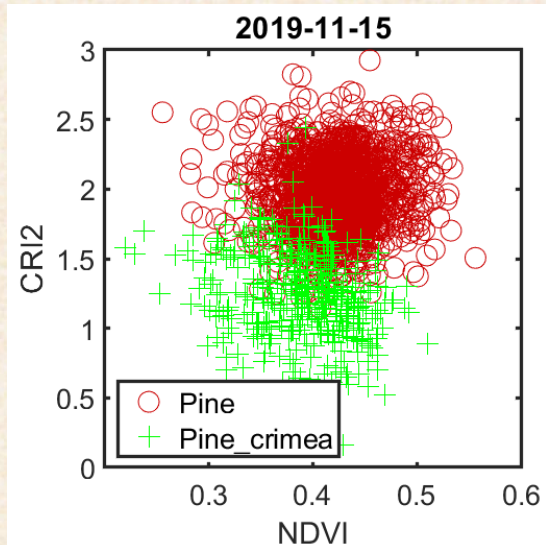
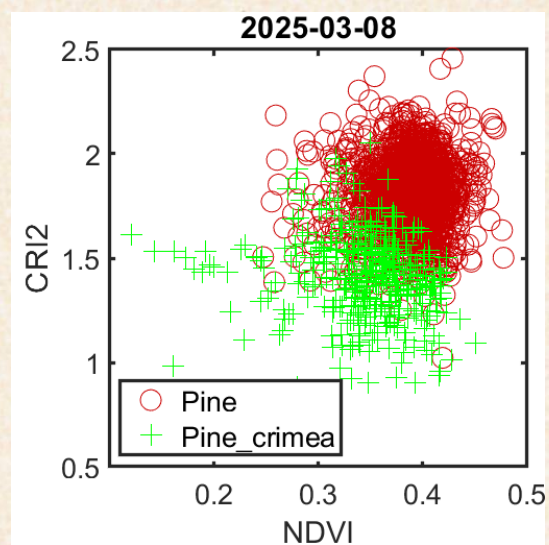
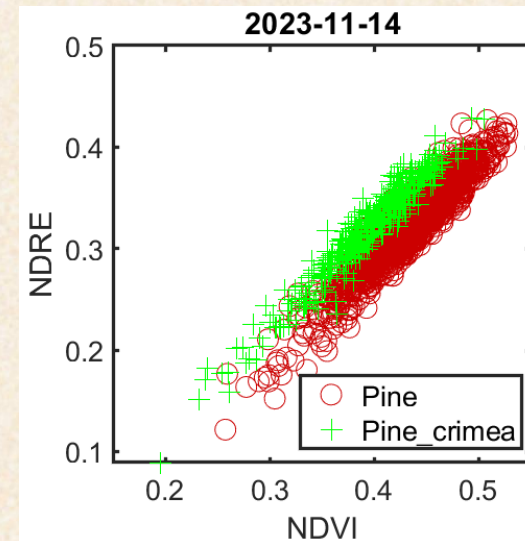
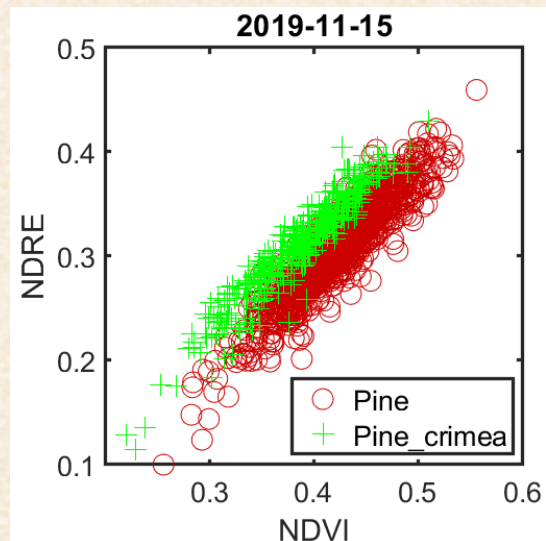
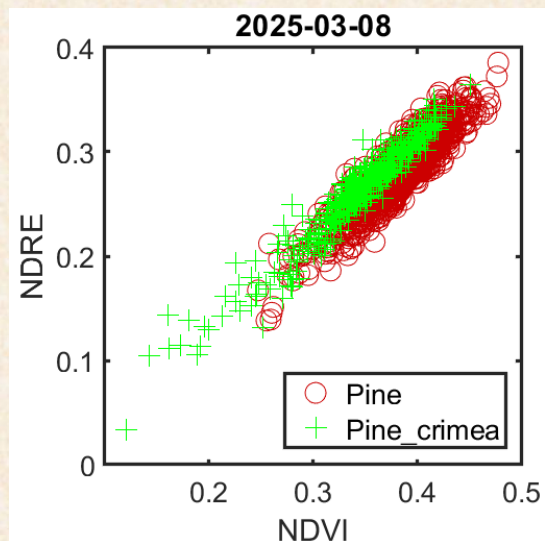


# Распределение значений ВИ лиственных пород в наиболее информативные периоды съемки





# Распределение значений ВИ хвойных пород





# Оценки точности классификации хвойных и лиственных пород

## Лиственные

QDA - 7%. Методы KNN - 5.5% , и FCNN - 5.0%. Метод QDA показал наибольшую скорость обработки.

	Акация белая	Ольха черная	Ясень обычн.	Осина	Береза бородав.	Клен острог.	Дуб череш.
QDA	0.049	0.016	0.160	0.026	0.190	0.017	0.011
KNN	0.035	0.008	0.130	0.028	0.170	0.017	0.008
FCNN	0.029	0.0051	0.130	0.017	0.160	0.007	0.004
KNN							
	Акация белая	Ольха черная	Ясень обычн.	Осина	Береза бородав.	Клен острог.	Дуб череш.
OE	0.037	0.004	0.120	0.024	0.180	0.016	0.005
CE	0.034	0.012	0.130	0.031	0.160	0.018	0.012

## Хвойные

Использовались индексы NDRE, рассчитанные по снимкам от 08.03.2025, 14.11.2023 и 15.11.2019.

### март

	Сосна обыкновенная	Сосна крымская
OE	0.09	0.06
CE	0.06	0.09
TE	7.6 %	

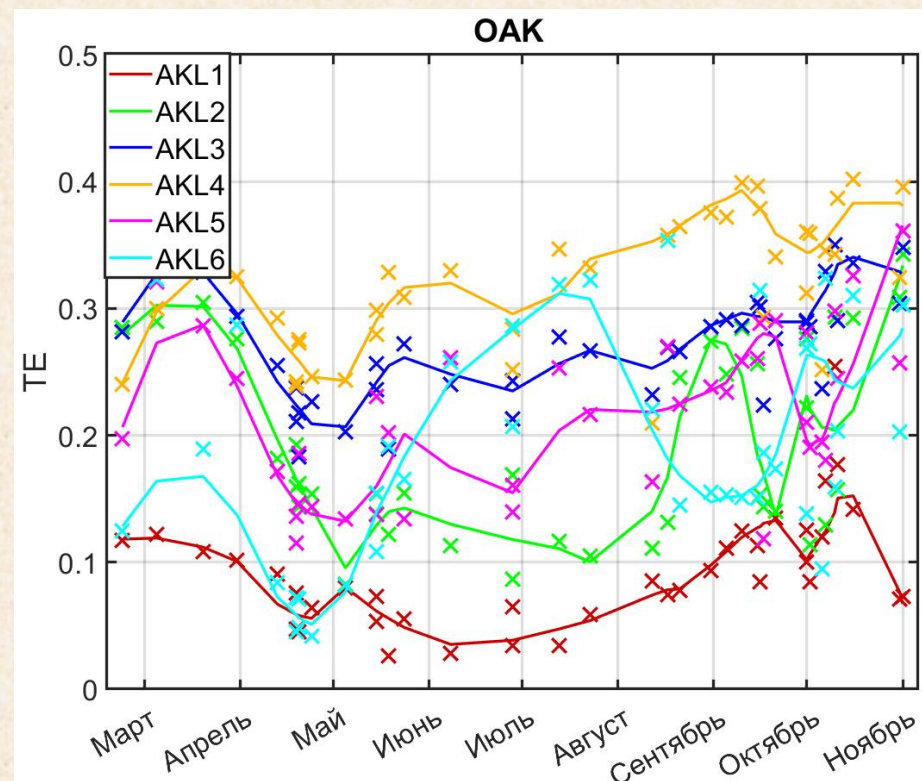
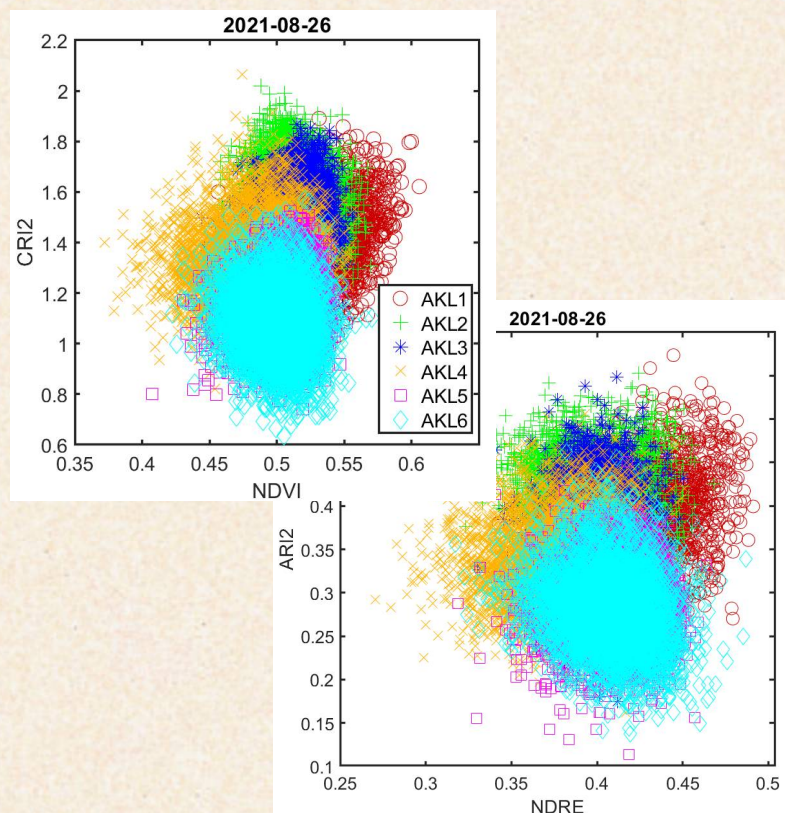
### ноябрь

	Сосна обыкновенная	Сосна крымская
OE	0.059	0.039
CE	0.040	0.057
TE	5 %	

В целом, следует отметить, что выбор метода классификации не является определяющим для повышения точности решения данной задачи, по сравнению с оптимизацией используемых признаков.



# Распознавание возрастных классов насаждений дуба черешчатого



## Оценки точности

KNN						
AKL	1	2	3	4	5	6
OE	0.075	0.15	0.25	0.36	0.19	0.036
CE	0.076	0.16	0.29	0.25	0.17	0.11
TE	17.6%					

## Расшифровка AKL

1	1-20
2	21-40
3	41-60
4	61-80
5	81-100
6	101-120



# Выводы

Исследуются особенности использования мультиспектральных спутниковых изображений Sentinel-2 для определения породного состава и возрастных классов древостоев на примере Валуйского лесничества (Белгородская область). Для решения данной задачи используются значения вегетационных индексов NDVI, NDRE, CRI2 и ARI2, отражающих динамику основных типов пигментов листвы/хвои (хлорофилл, каротиноиды, антоцианы) в течение периода вегетации.

Анализ изображений Sentinel-2 за период с 2017 по 2025 год показал, что наибольшую информативность имеют данные съемки охватывающие основные фенологические измерения лесной растительности.

Проведено сравнение алгоритмов классификации различной сложности. По полученным оценкам, полная вероятности ошибки классификации доминантных пород составила 5.5%, при этом средняя ошибка распознавания отдельных пород не превышает 19%.

Общая ошибка классификации возрастных классов составила около 20%. Наибольшая ошибка возникает при распознавании возрастных классов средневозрастных древостоев (ошибка до 30%), тогда как молодые и старые насаждения разделяются практически точно.