

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

*11-15 ноября 2024, Москва, Россия*

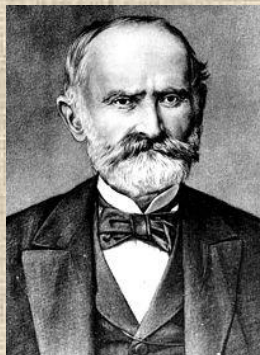
*Институт космических исследований РАН*

**Дистанционная оценка деградации популяции  
сербской ели в районе горного массива  
Великий Столац**

*Дмитриев Е.В. (ИВМ РАН, МФТИ), Говедар З. (Faculty of Forestry UNIBL),  
Кондранин Т.В. (МФТИ), Мельник П.Г. (МГТУ им. Н. Э. Баумана),*



# Ель Панчича (*Picea omorika*)



*Pančić J. Omorika nova fela četinarara u Srbiji. Težak, Beograd. 1887. XVIII(1). P. 1–8.*

□ Ель Панчича (*Picea omorika*, сербская ель) – один из древнейших видов деревьев европейских лесов, была обнаружена во второй половине 19 века в районе деревни Заовине (Сербия).

□ Ель Панчича является реликтовым видом. Исследования ископаемых остатков указывают, что ранее насаждения данного вида были достаточно распространены и занимали значительные площади на территории Европы. В дальнейшем произошло существенное сокращение, как площади распространения, так и площади обитания данного вида, и в настоящее время ель сербская рассматривается как эндемичный вид Балканского полуострова.

□ Ель Панчича занесена в Красную книгу Международного союза охраны природы (МСОП) как вид, находящийся под угрозой исчезновения.

Взрослое дерево имеет высоту около 30 м и обладает характерной узкопирамидальной кроной, отдельные деревья достигают высоты до 50 м. Ветви первого ряда короткие (~2 м), в верхней части кроны направлены вверх. Ветви средней части дерева направлены горизонтально, в нижней части несколько поникают, однако вершины ветвей также направлены вверх. Кора тонкая, распадается на чешуйки, коричневого цвета. Почки без смолы, с остроконечно удлиненными нижними чешуями.



Щетинки 8-20 мм длиной, до 2 мм шириной, заостренные до округлых, в сечении плоские; блестящие, сверху темно-зеленые, без устьиц, снизу с двумя беловатыми полосками устьичных щелей. Цветение с конца апреля по июнь, в зависимости от места обитания. Мужские кистевидные цветки светло-красные, женские (молодые шишки) фиолетовые. Созревшие шишки свисающие, длиной 5 см, блестящие, красно-коричневые.

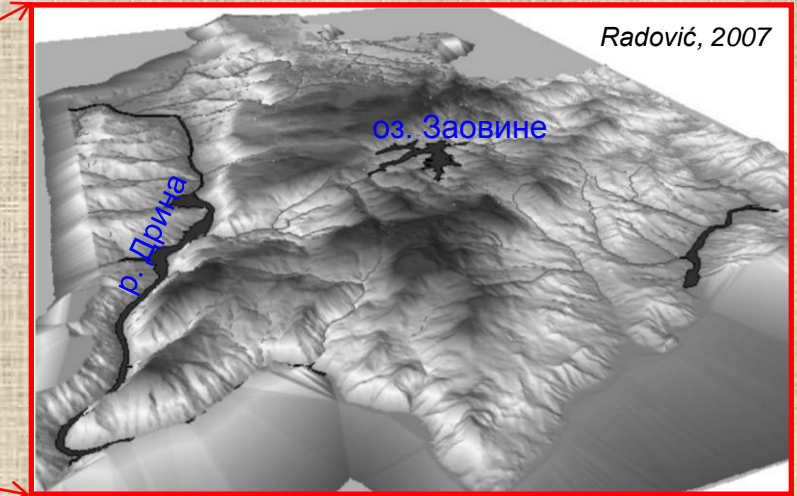
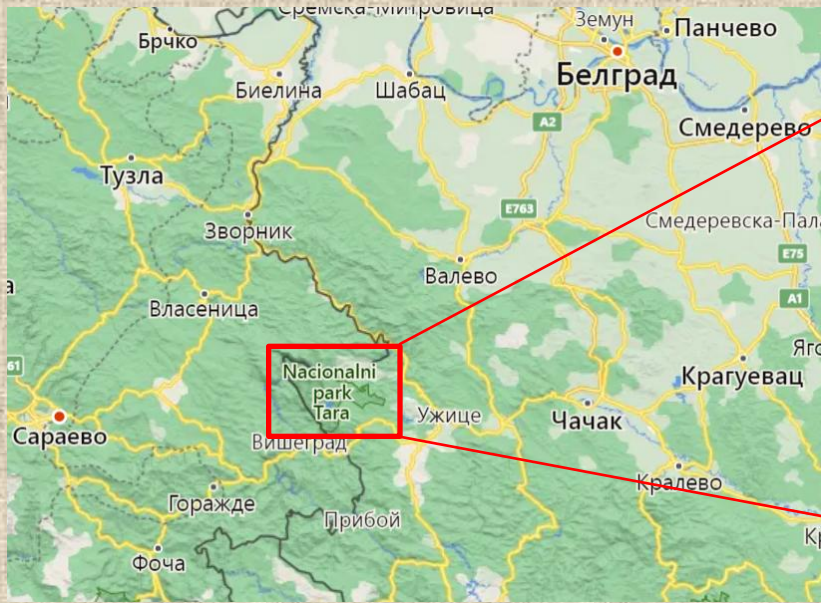
## Габитус *Picea omorika*





# Естественное местообитание *Picea omorika*

## Национальный парк Тара



Основной ареал *Picea omorika* в Сербии - г. Тара и ее ответвления, Звезда, Видача, Црни, Милешевское ущелье. Обитает на высоте от 400 до 1700 м над уровнем моря, преимущественно на крутых известняковых склонах, ориентированных на север. Данный вид произрастает на обрывах, скальных глыбах и в узких выемках, как правило образует чистые насаждения, однако также входит в состав смешанных лиственно-хвойных лесов с многочисленными породами: ель, пихта, белая и черная сосна, бук, клен, береза, осина, черный граб, вяз и др.



# Деградация насаждений сербской ели

Пожар в заповеднике Великий Столац



Поврежденные лесосеменные насаждения в Годовике



Ель Панчича чувствительна к различным негативным воздействиям биотической и абиотической природы, в связи с чем в последнее время происходит постоянное сокращение площади насаждения.

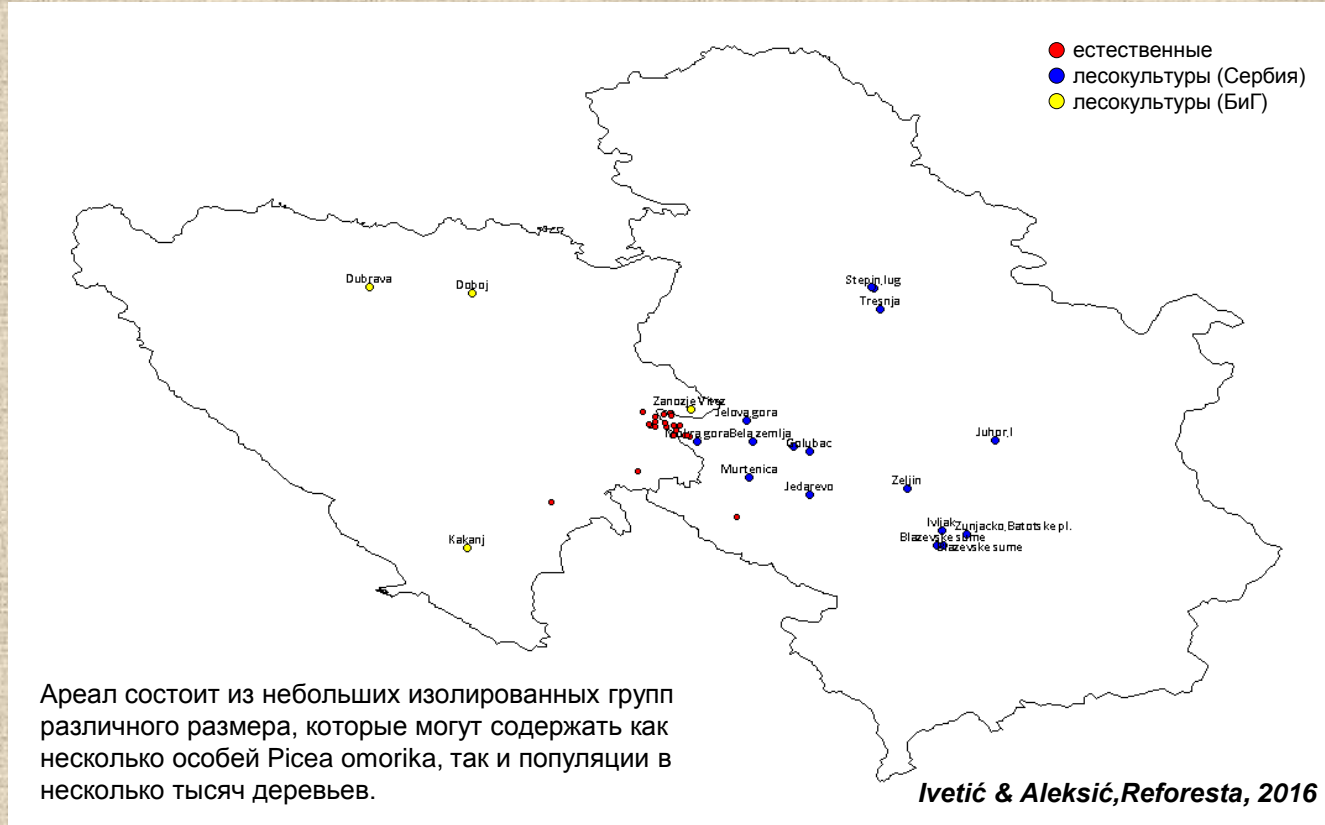
Основными причинами деградации данного вида являются:

- 1) изменение климата;
- 2) поражение стволовыми вредителями;
- 3) воздействие пожаров.

В пустошах, образовавшихся после пожара или в результате ветровала, происходит заселение чистых насаждений ели Панчича другими конкурирующими видами деревьев, такими как ель и бук, что приводит к образованию смешанных древостоев и постепенному замещению исходного вида.

Исследования прироста ели Панчича в естественных местообитаниях показали более низкую продуктивность, чем у ели европейской.

# Современные популяции *Picea omorika*



## Босния и Герцеговина

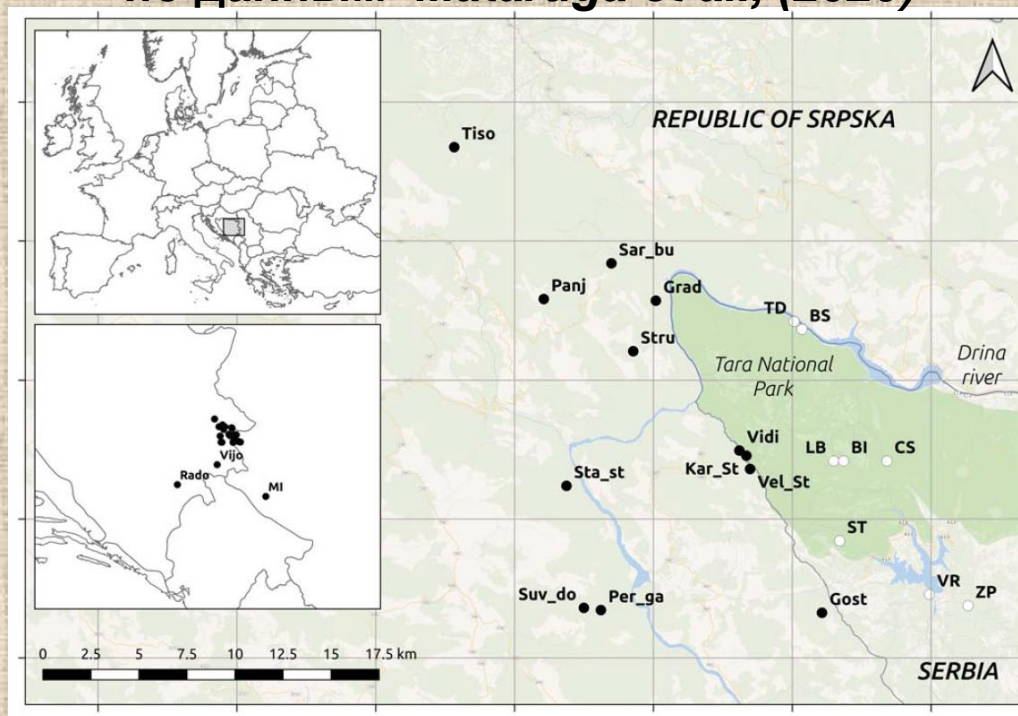
N	Местоположение	Площадь, га	Высота, м	Кол-во
1	Tovarnica	2	980	
2	Karaula Štula	2	950	100
3	Božurevac	10	900-1,000	
4	Veliki Stolac	10	1100-1500	3000
5	Gostilja	50	1100-1300	1000
6	Panjak	30	1250-1350	20
7	Novo Brdo	20	900-1100	200
8	Plišćina	20	1250-1450	
9	Strugovi	30	800-1100	100
10	Viogor	40	1320	150
11	Radomišlje - Sokolina	30	1350	

## Сербия

N	Местоположение	Площадь, га	Высота, м	Кол-во
1	Bilo	15.00	1050-1300	4192
2	Ljuti Breg	12.17	1100-1300	1319
3	Crvene Stene	43.45	1000-1200	3000
4	Studenac	2.74	1255-1350	763
5	Pod Gorušicom	12.00	1258	
6	Zvezda	2584.28	220-1440	50000
7	Vranjak	3.98	850	442
8	Karaula Štula	9	950	374
9	Ravnište – K. Mileševke	143.71	800-900	300
10	Crveni Potok	15.43	1085	3
11	Zmajevački Potok	3.91	830-850	797



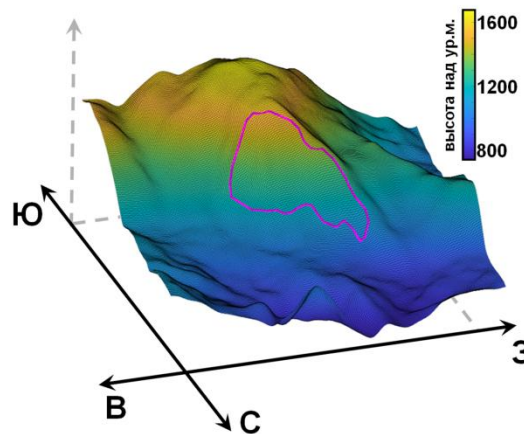
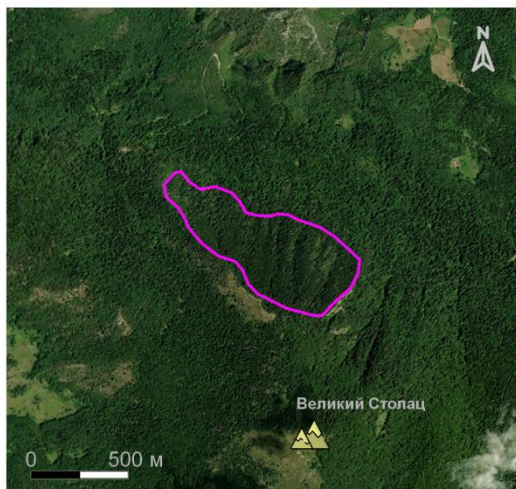
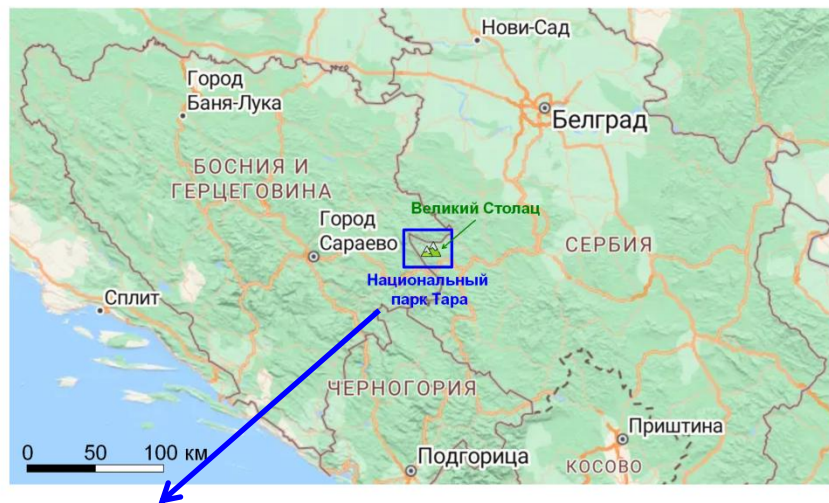
# Популяции *Picea omorika* по данным *Mataruga et al., (2020)*



Mataruga, M., Piotti, A., Daničić, V., Cvjetković, B., Fussi, B., Konner, M., Vendramin G.G., Aleksić, J. M. (2020). Towards the dynamic conservation of Serbian spruce (*Picea omorika*) western populations. *Annals of Forest Science*, 77, 1-20.

Муниципал.	Наименование популяции	Аббрев.	Lat. (N)	Long. (E)	Высота (м)	Площадь (га)	Чисто обоей
1 Cajnice	Vijogor	Vijo	43°38'58.3"	19°07'42.1"	1190	8.6	3000
2 Foca	Radomislja	Rado	43°27'46.9"	18°36'58.6"	1100	31.0	5000
3 Milici	Tisovljak (BIH00094)	Tiso	44°04'23.0"	19°05'42.0"	1030	6.5	500
4 Rogatica	Panjak	Panj	44°00'08.6"	19°09'10.6"	1310	0.5	50
	Perisin gaj	Per_ga	43°51'27.7"	19°11'23.7"	1050	30.0	3000
	Starogorska stijena	Sta_st -	43°54'56.3"	19°10'03.6"	1200	9.4	1000
	Suvi do	Suv do	43°51'31.4"	19°10'44.0"	970	40.0	5000
5 Srebrenica	Grad	Grad	44°00'05.9"	19°13'31.8"	1240	3.1	300
	Strugovi" (BIH00001)	Stru	43°58'41.2"	19°12'39.1"	100	5.9	100
	Sarena bukva	Sar_bu	44°01'08.4"	19°11'48.2"	1100	1.7	400
6 Visegrad	Gostilj" (BIH00069)	Gost	43°51'23.2"	19°19'58.7"	1130	7.1	2000
	Karaula Stula	Kar_st	43°55'46.9"	19°17'02.6"	980	5.2	700
	Veliki Stolac (BIH00093)	Vel_St	43°55'24.5"	19°17'11.1"	1220	60.8	10000
	Vidikovac	Vidi	43°55'55.5"	19°16'46.2"	920	0.4	200

# Район исследования (г. Великий Столац)



Район исследования находится на высоте около 1100-1500 м, занимает площадь 40.8 га и относится к Столацкому реликтовому сектору Иллирийской провинции. Район исследования содержит одну из самых представительных популяций сербской ели в которой в значительном количестве сохранились наиболее красивые экземпляры. Возраст древостоев в среднем составляет 104 года и для отдельных деревьев достигает 109 лет.


Согласно **Čolić 1953** по данным инвентаризации в конце 1930х годов на Великом Столаце насчитывалось около **38 000** взрослых экземпляров сербских елей. По современным оценкам (**Mataruga and Milanovic, 2020**) популяция сократилась до **10 000** особей.

В период с 27 июля по 6 сентября 2021 года большая часть территории Великий Столац была подвержена воздействию лесных пожаров.



# Используемые спутниковые данные

Для проведения дистанционных обследований района Великий Столац использовались многовременные данные Sentinel2 с пространственным разрешением 10 и 20 м.

Спутник Sentinel 2	Спектральные каналы 10 м, нм	Спектральные каналы 20 м, нм	Ширина полосы съемки, км
	490 (B) 560 (G) 665 (R) 842 (NIR)	704 (RE) 1614 (SWIR) 2202 (SWIR)	290

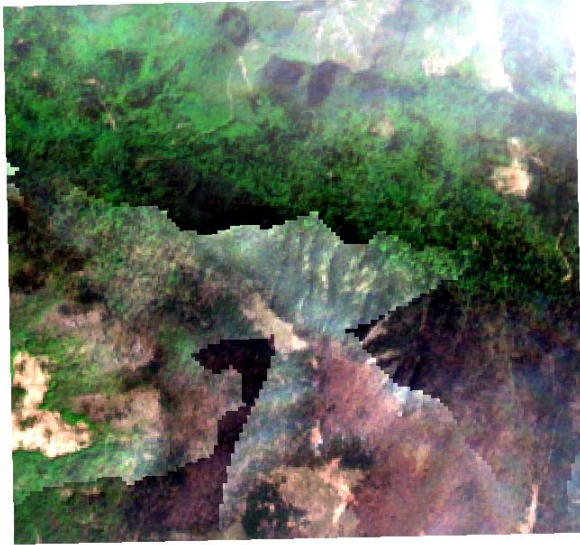
За период с 2015 по 2024 г. было выделено 68 мультиспектральных изображений тестовой территории с низким уровнем облачности. Изображения приведены к уровню обработки L2A - отражательная способность на нижней границе атмосферы, с использованием стандартного программного пакета Sen2Cor. Данный уровень обработки включает в себя коррекцию влияния атмосферы, рельефа и перистых облаков. Помимо данных спектральных каналов выходная продукция содержит данные вероятности снега и облачности, а также стандартную классификацию сцены:

- 0 - No data
- 1 - Saturated / Defective
- 2 - Dark Area Pixels
- 3 - Cloud Shadows
- 4 - Vegetation
- 5 - Bare Soils
- 6 - Water
- 7 - Clouds low probability / Unclassified
- 8 - Clouds medium probability
- 9 - Clouds high probability
- 10 - Cirrus
- 11 - Snow / Ice

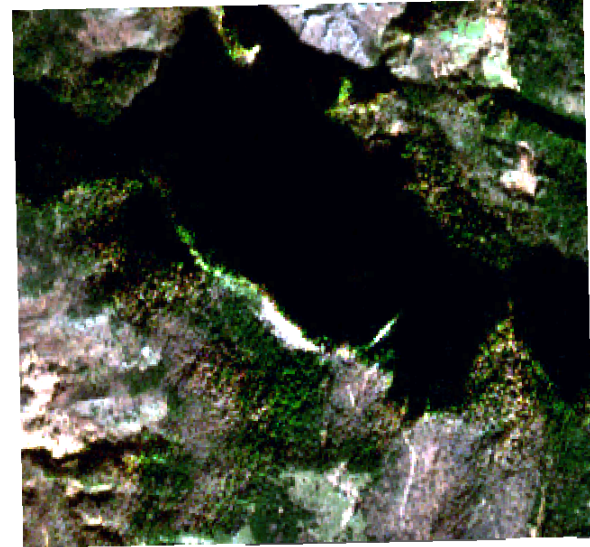


# Проблемные изображения

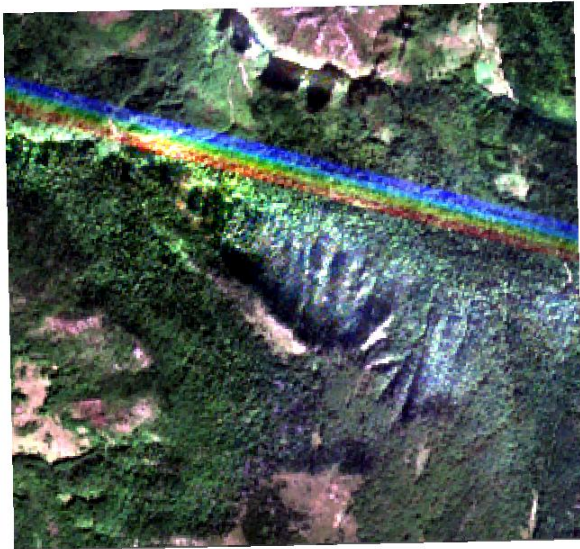
09.05.2020 влияние перистых облаков



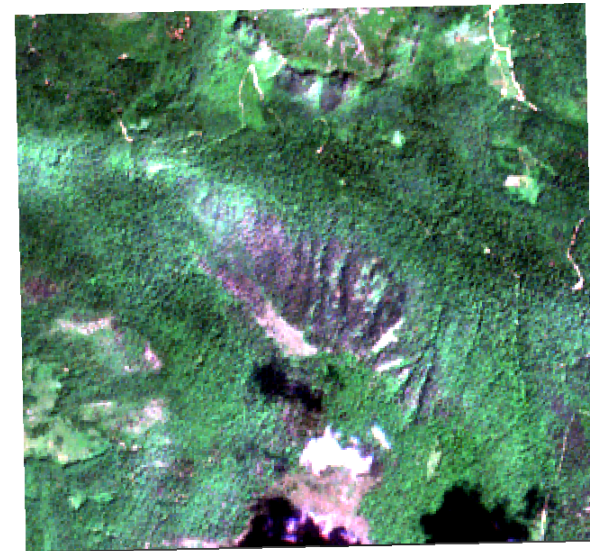
20.11.2021 орографические тени



27.09.2018 влияние аэрозолей



27.09.2018 тени от облаков



# Используемые вегетационные индексы

Нормализованный разностный вегетационный индекс (NDVI)

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

Относительный индекс хлорофилла (ClGreen)

$$ClGreen = \frac{NIR}{GREEN} - 1$$

Нормализованный разностный индекс красного края (NDRE)

$$NDRE = \frac{NIR - RE_{705}}{NIR + RE_{705}}$$

Нормализованный разностный индекс определения гарей (NBR)

$$NBR = \frac{NIR - SWIR_{2200}}{NIR + SWIR_{2200}}$$

$$\Delta NBR = PrefireNBR - PostfireNBR$$

Нормализованный разностный индекс влажности (NDMI)

$$NDMI = \frac{NIR - SWIR_{1600}}{NIR + SWIR_{1600}}$$

Уровень повреждений	Диапазон $\Delta NBR$
Отсутствует	$\leq 0.10$
Низкий	(0.10;0.27]
Средне-низкий	(0.27;0.44]
Средне-высокий	(0.44;0.66]
Высокий	$> 0.66$



# Методика тематической обработки



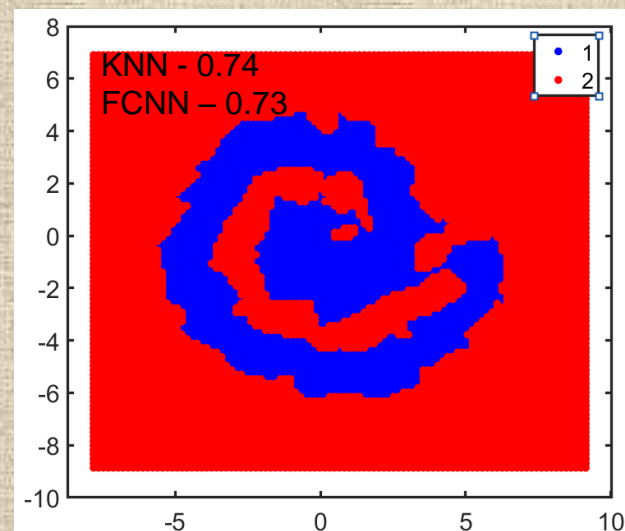
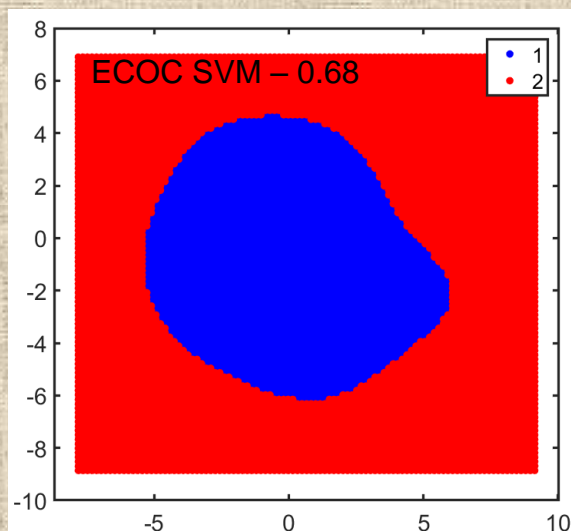
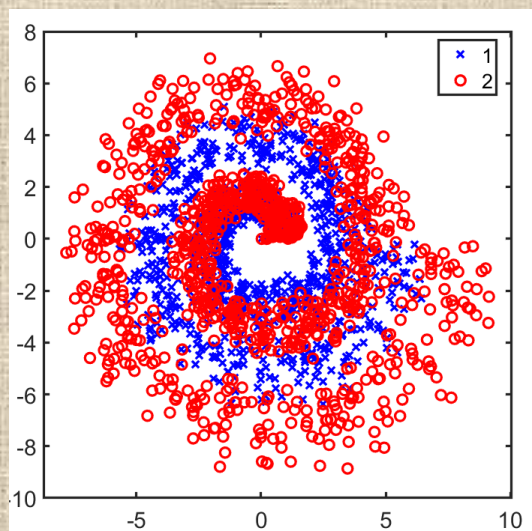
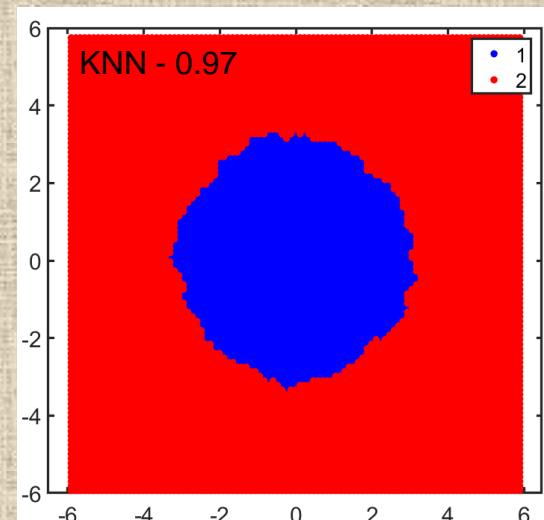
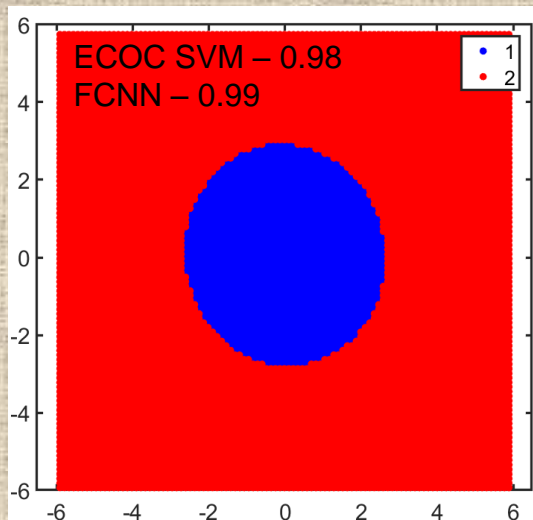
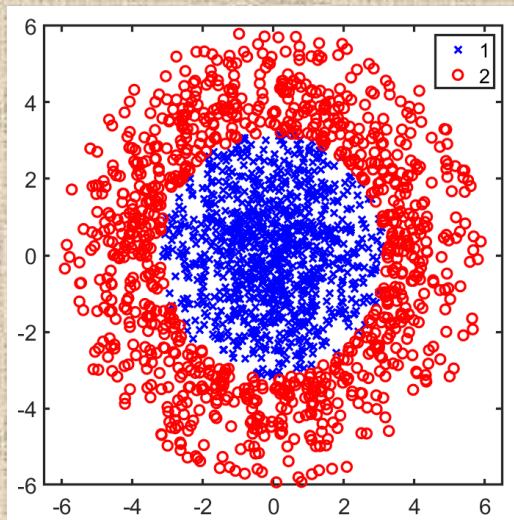
## Используемые алгоритмы классификации:

1. Полносвязная нейронная сеть (FCNN)
2. Метод К ближайших соседей (KNN)
3. Метод самокорректирующихся кодов (ECOC SVM)

## Оценка классов повреждений:

1. Усыхающие:  $NBR \& NDMI \& NDVI < THR_{min}$
2. Поврежденные:  $NDVI \& CIGreen \& NDRE < THR_{1-5\%}$
3. Ослабленные:  $NDVI | CIGreen | NDRE < THR_{1-5\%}$
4. Здоровые: остальные

# Оценка точности классификаторов на искусственных данных

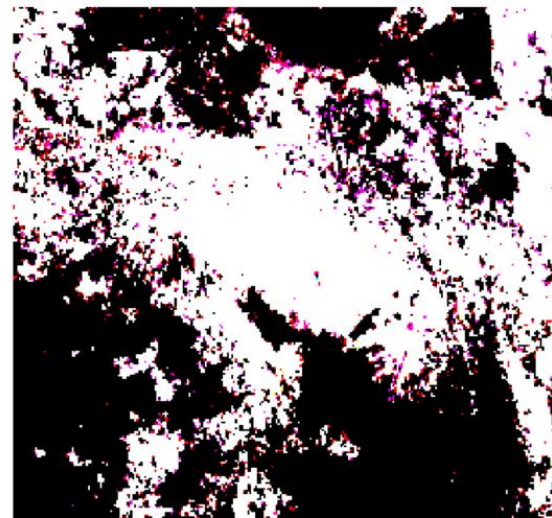
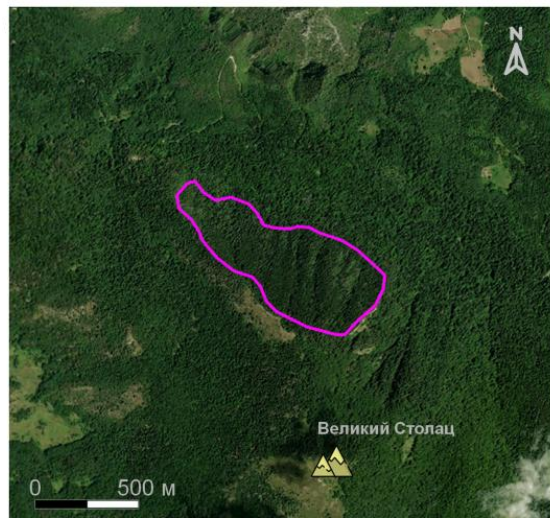




# Маски распознаваемых объектов на этапах обработки многовременных изображений Sentinel-2

RGB

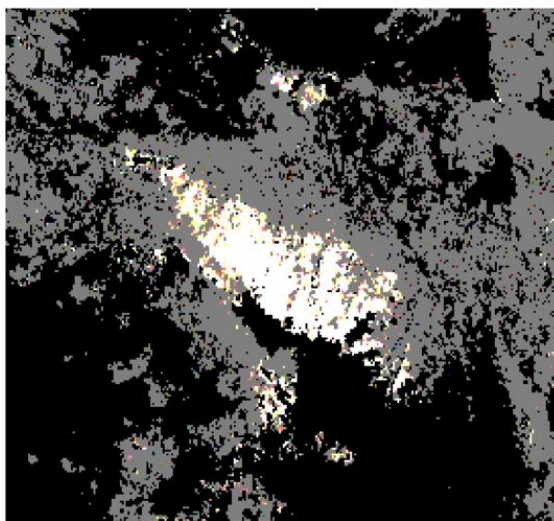
фиолетовым  
контуром выделен  
основной ареал  
обитания ели  
сербской в данном  
районе



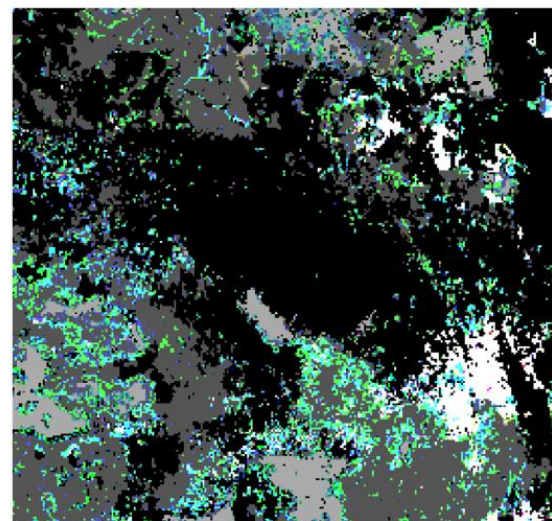
вечнозеленые  
(белый)

различие между  
методами –  
4% пикселей,  
кроссвалидация –  
точность 100%

хвойные  
(белый – ель сербская,  
серый – ель  
обыкновенная)



FCNN 0.5-1.6%  
KNN 0.6-1.2%  
ECOC SVM 0.6-1.2%  
различие между  
методами –  
2% пикселей



прочие (темно серый  
– лиственные,  
светло серый – почва  
и травянистые,  
белый – смешанные  
древостой)

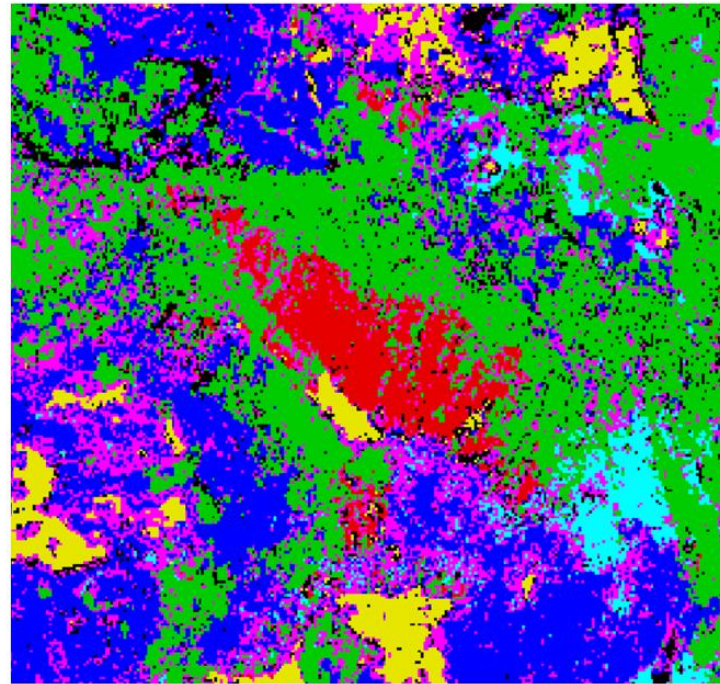
FCNN 0.2-0.9%  
KNN 0.5-1.2%  
ECOC SVM 0.2-1.2%  
различие между  
методами –  
14% пикселей

Цветные пиксели характеризуют различия результатов классификации с помощью рассматриваемых алгоритмов.



# Классификация основных типов объектов

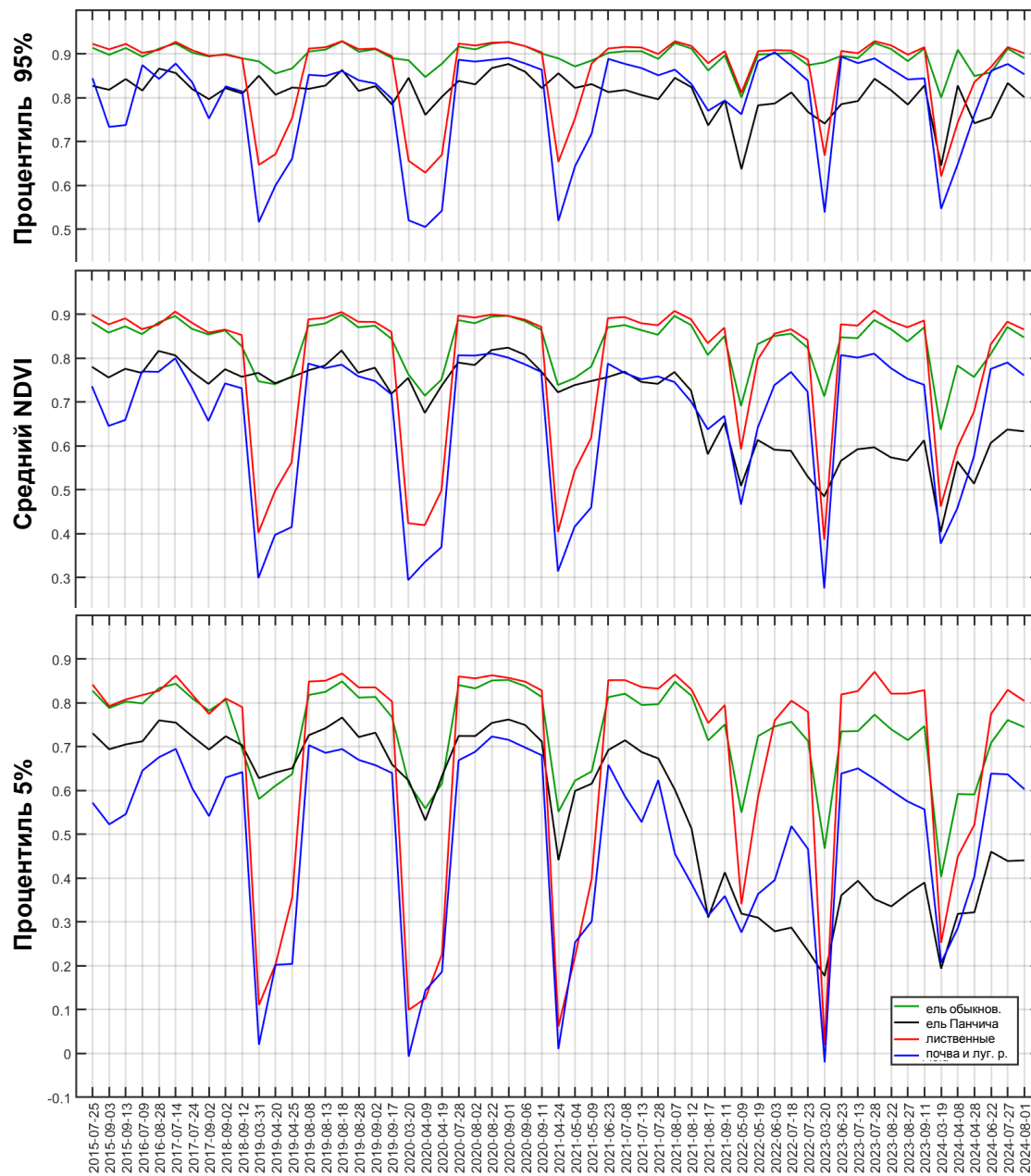
## район Великий Столац, Sentinel-2



- ель обыкновенная
- ель сербская
- лиственные
- почва и луг. раст.
- смешанные
- прочие
- неопределенные

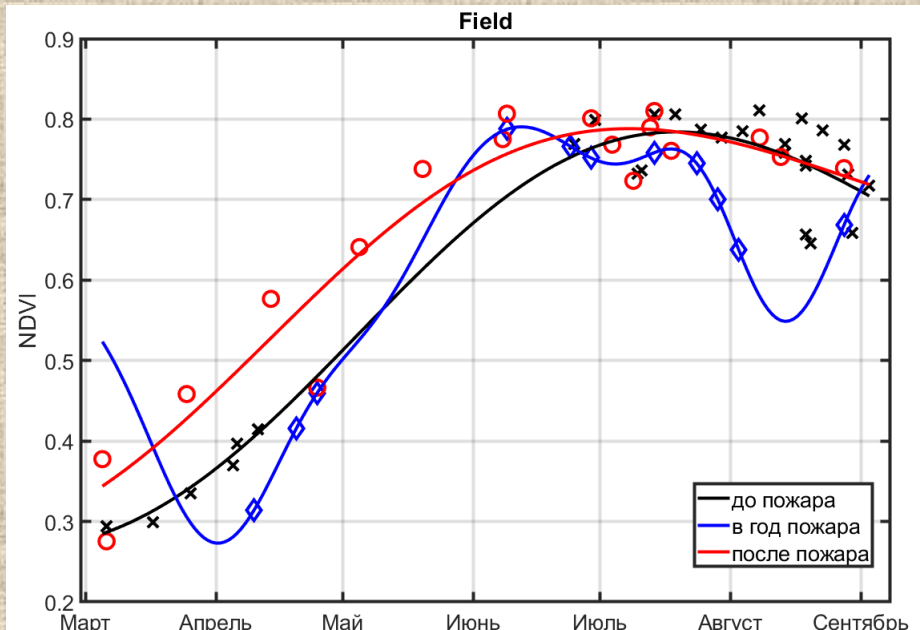
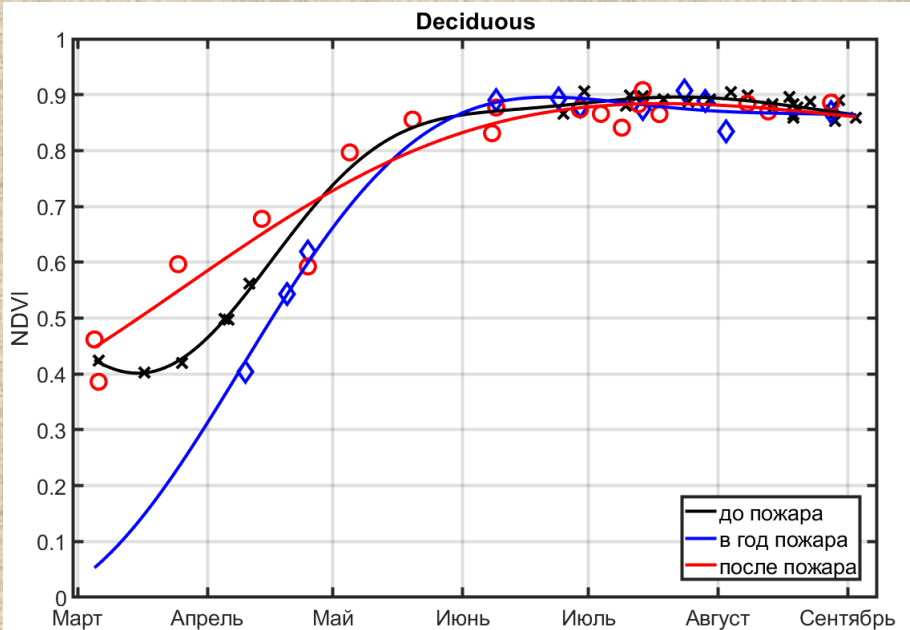
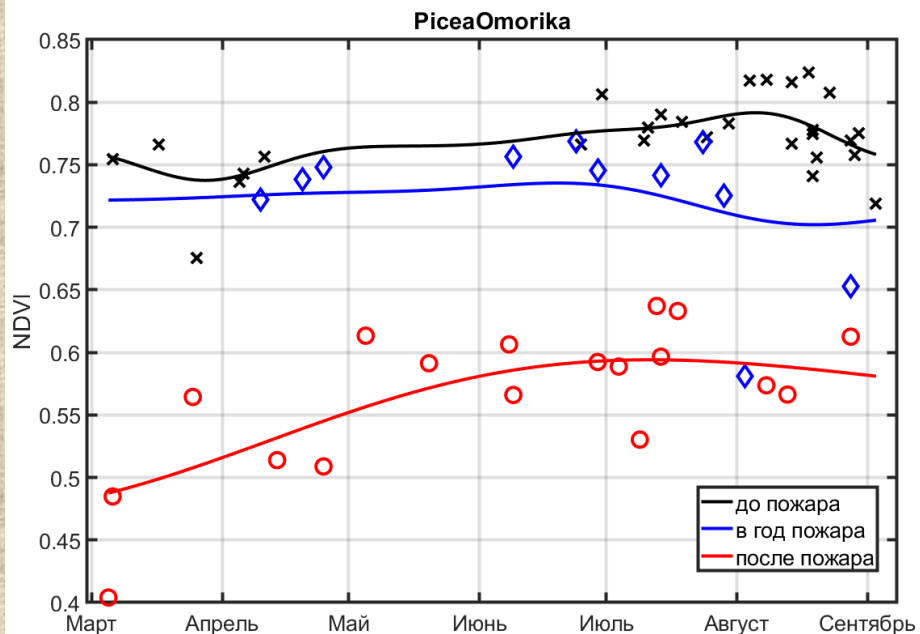
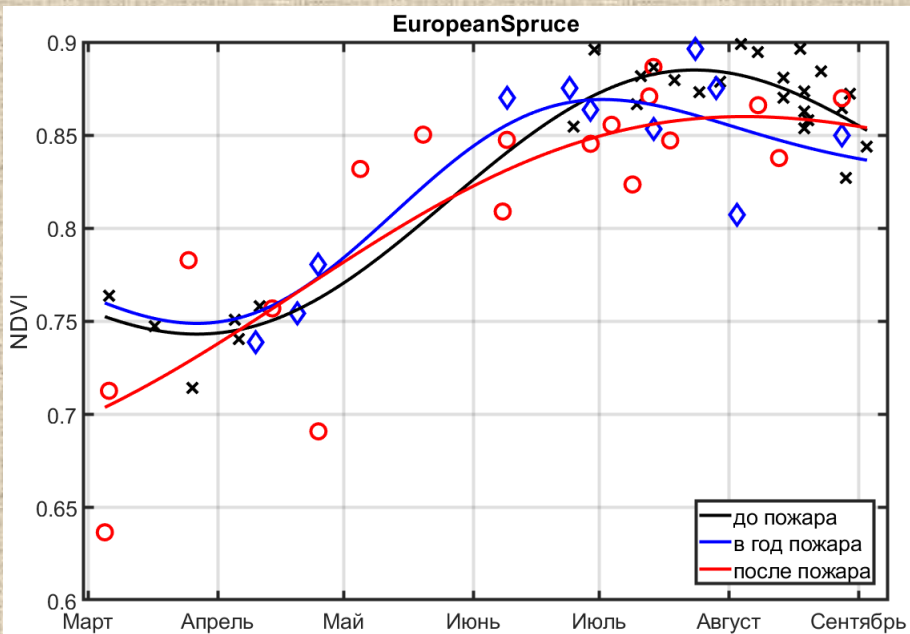


# Динамика индекса NDVI по датам съемки



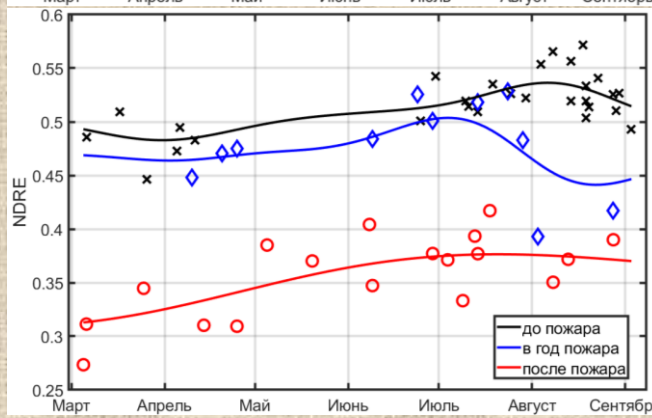
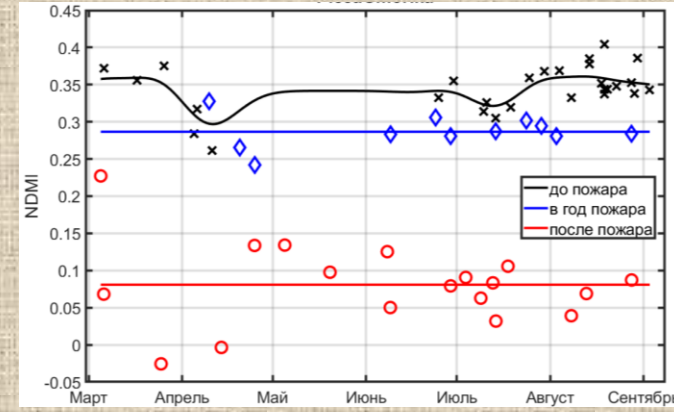
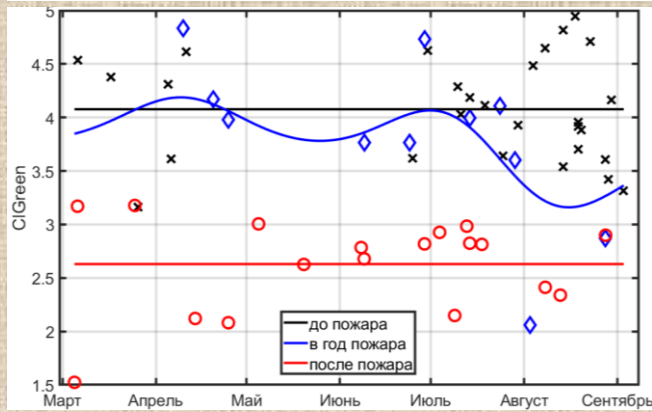
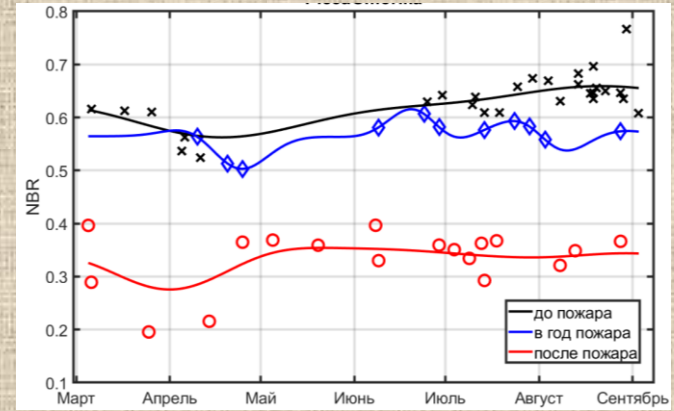
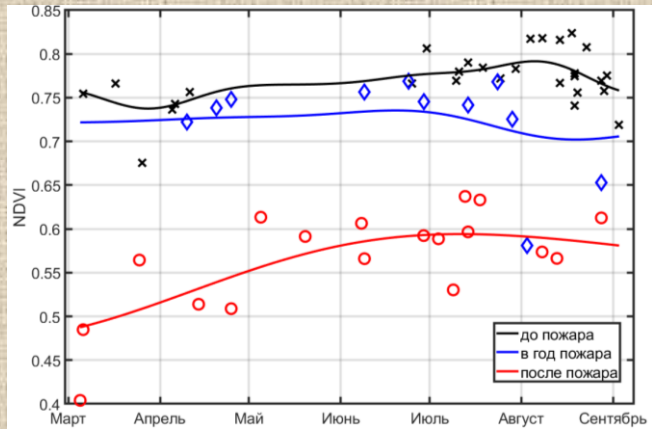
# Годовая динамика индекса NDVI

все классы, период 2015-2024





# Годовая динамика вегетационных индексов ель Панчича, период 2015-2024

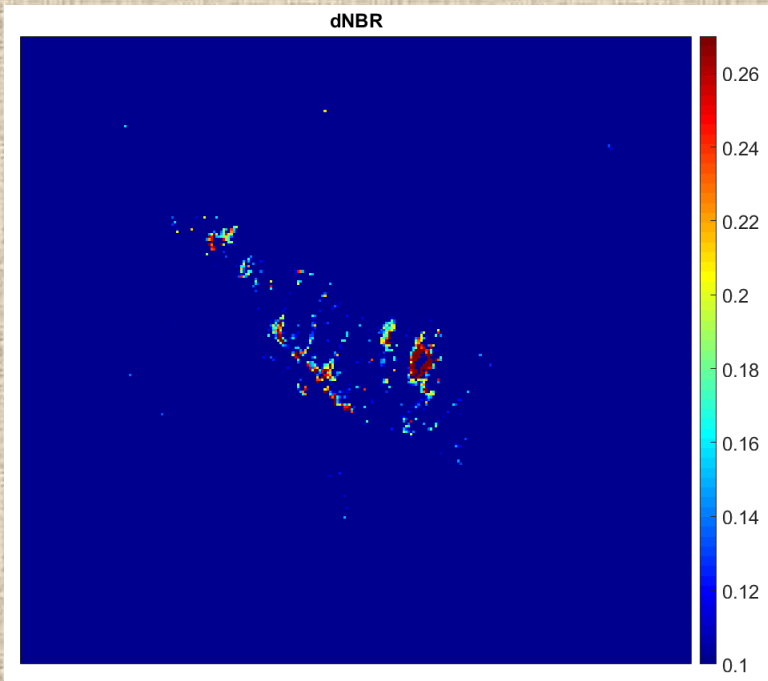


**Локальные пороговые значения вегетационных индексов для здоровых насаждений ели Панчича (период 2015-2020)**

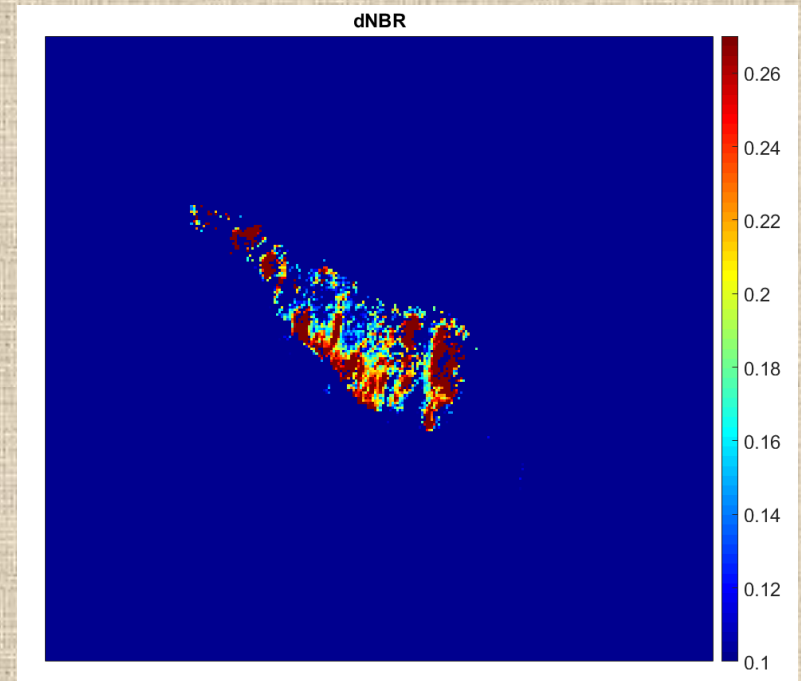
Индекс	Процентиль 5%	Процентиль 1%
NDVI	0.67	0.56
CiGreen	2.8	2.2
NDRE	0.40	0.29
NBR	0.43	0.28
NDMI	0.15	0.03

# Определение гарей на основе разности NBR

2021-07-08 --- 2021-09-11



2021-07-08 --- 2022-07-18



Нормализованный разностный индекс определения гарей (NBR)

$$NBR = \frac{NIR - SWIR_{2200}}{NIR + SWIR_{2200}}$$

$$\Delta NBR = PrefireNBR - PostfireNBR$$

## Оценка повреждений

без повреждений – 27.7 га

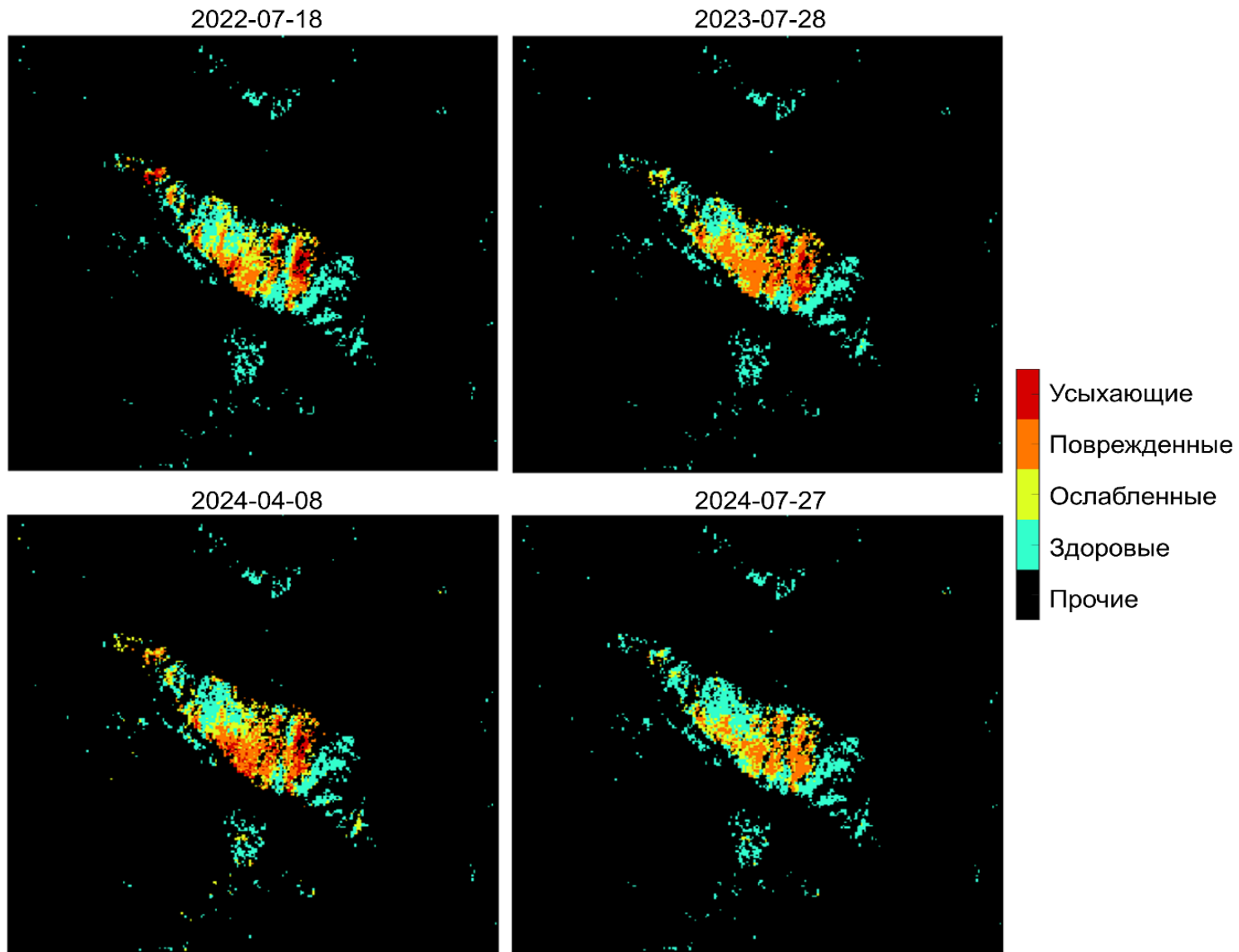
низкий – 6.5 га

средний и высокий – 1 га

Уровень повреждений	Диапазон $\Delta NBR$
Отсутствует	$\leq 0.10$
Низкий	(0.10;0.27]
Средне-низкий	(0.27;0.44]
Средне-высокий	(0.44;0.66]
Высокий	$> 0.66$



# Оценка повреждения насаждений ели Панчича



Общая площадь  
Picea Omorika: 35.2 Га

Площадь класса здоровые: 17.6 Га  
Площадь класса ослабленные: 8.4 Га

Площадь класса поврежденные: 8.0 Га  
Площадь класса усыхающие: 1.2 Га

# Выводы

Представлены результаты оценки изменений состояния насаждений ели Панчича в районе горы Великий Столац (Сербия), подвергшихся воздействию лесных пожаров в августе 2021г. По данным, полученным в год пожара, 3% от общей площади насаждений сербской ели было уничтожено верховым пожаром и 18.5% получило первичные повреждения. Анализ спутниковых данных за последующие 3 года показал, что в реальности низовой пожар затронул гораздо большую область, в результате было нарушено около 50% площади насаждений сербской ели. Зоной наибольшего поражения популяции сербской ели является центральная область северного склона горы Великий Столац. Около 26% насаждений получили сильные повреждения, которые скорее всего приведут к гибели соответствующих особей. К классу ослабленные можно отнести 24% общей площади насаждений. Для данных участков возможно естественное восстановление.

Анализ изображений за 2024 год позволяет обоснованно предположить, что в настоящее время начался процесс заселения территорий, поврежденных лесным пожаром, листовыми видами, при этом значимых тенденций к улучшению жизненного состояния популяции сербской ели не наблюдается. Таким образом, для сохранения данной популяции необходимо проведение работ по лесовосстановлению.