

# Восстановление растительного покрова в условиях различной степени пожарного воздействия по материалам спутникового мониторинга

А.Н. Забродин<sup>1,2</sup>, Н.Д. Якимов<sup>1,2</sup>, Е.И. Пономарев<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> Сибирский Федеральный Университет, Красноярск

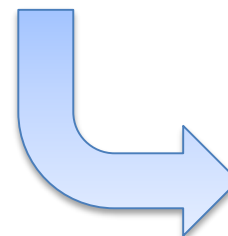
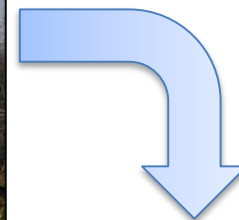
<sup>2</sup> ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск

<sup>3</sup> Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, Красноярск

Нарушение почвенно-растительного покрова является причиной изменения тепловых режимов локальных участков. Такие изменения в совокупности способны оказывать существенное воздействие на состояние и динамику экосистем, почвы, мерзлотных слоев [Knorre et. al. 2019, Ропотарев et. al. 2020]. Использование данных с тепловых каналов увеличивают период наблюдений срока восстановления поврежденных участков. Вследствие зарастания вегетационные характеристики теряются, в то время как тепловые сохраняются.



2 года

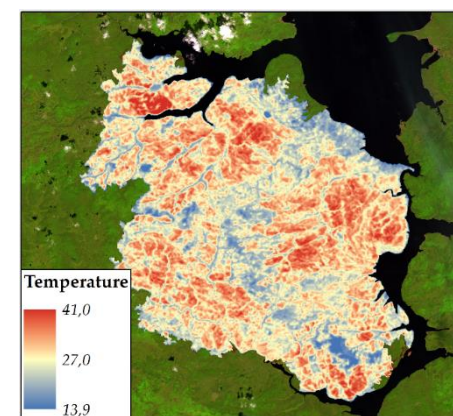
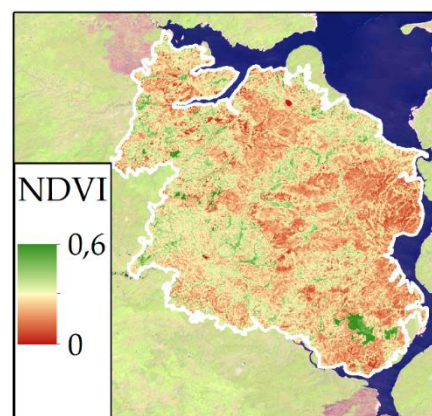
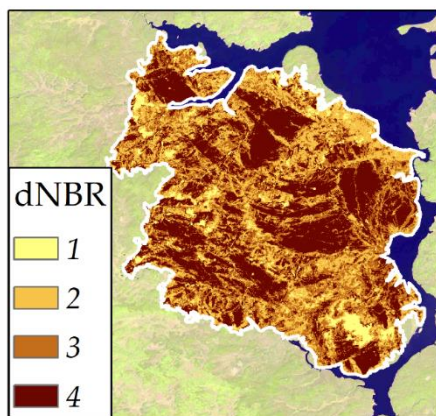
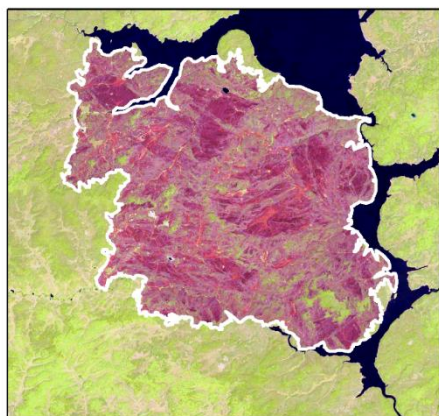


5 лет

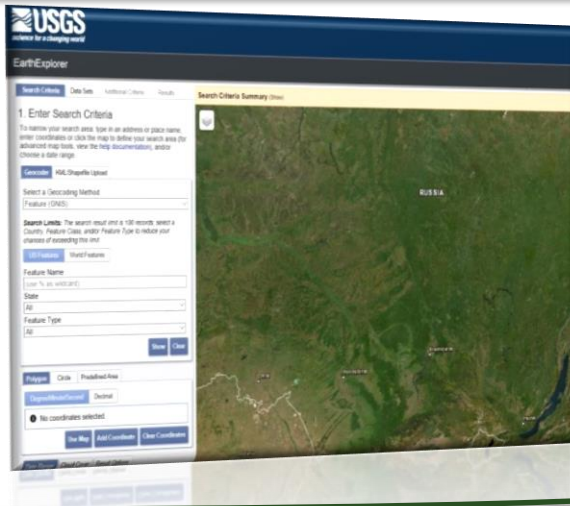
\* Фото И. Безкорвайная

Степень нарушенности теплоизмерения покровов можно долговременно контролировать с использованием самого распространенного спектрального индекса dNBR.

Основная задача – определение степени нарушенности почвенного покрова после пожаров в различных древостоях на территории Сибири, а также анализ восстановления данных участков через 3-5 лет после пожара. Исследование долговременного изменения аномалий температуры и вегетационного индекса NDVI для различных сочетаний степени нарушенности (по данным dNBR).

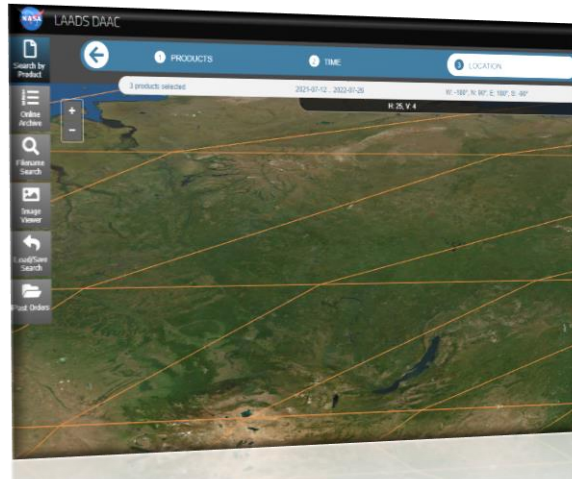
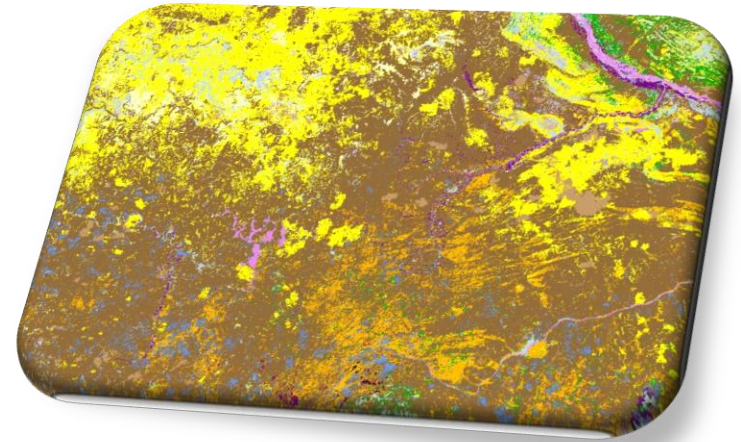


предварительная обработка



Спутниковые изображения среднего пространственного разрешения Landsat-8/OLI/TIRS (Operational Land Imager / Thermal Infrared Sensor), полученные из открытых каталогов геологической службы США (<https://earthexplorer.usgs.gov/>).

Карта древостоя Сибири по материалам спутниковой системы Vega-Pro (Лупян Е.А., ИКИ РАН, г. Москва, 2022).



Данные температуры и вегетационного индекса NDVI с открытого каталога базы данных NASA MODIS (<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov>).



Таблица 1. Выборка пожаров различных древостоев для расчёта и анализа индекса dNBR.

Тип растительности	Кол-во пожаров	Общая площадь пожаров (км <sup>2</sup> )	Сред. знач. типа древостоя (%)
Лиственница	5	3654	87
Лиственница редколесья	6	3298	75
Сосна	11	1085	68
Ель	5	499	84
Пихта	2	16	92
Кедр	5	310	65
Кедровый стланик	5	1399	79
Тундра	7	4100	78

Выявление поврежденных участков с различной степенью нарушений проходило по следующим формулам:

$$NBR = \frac{(NIR - SWIR)}{(NIR + SWIR)} \quad (1)$$

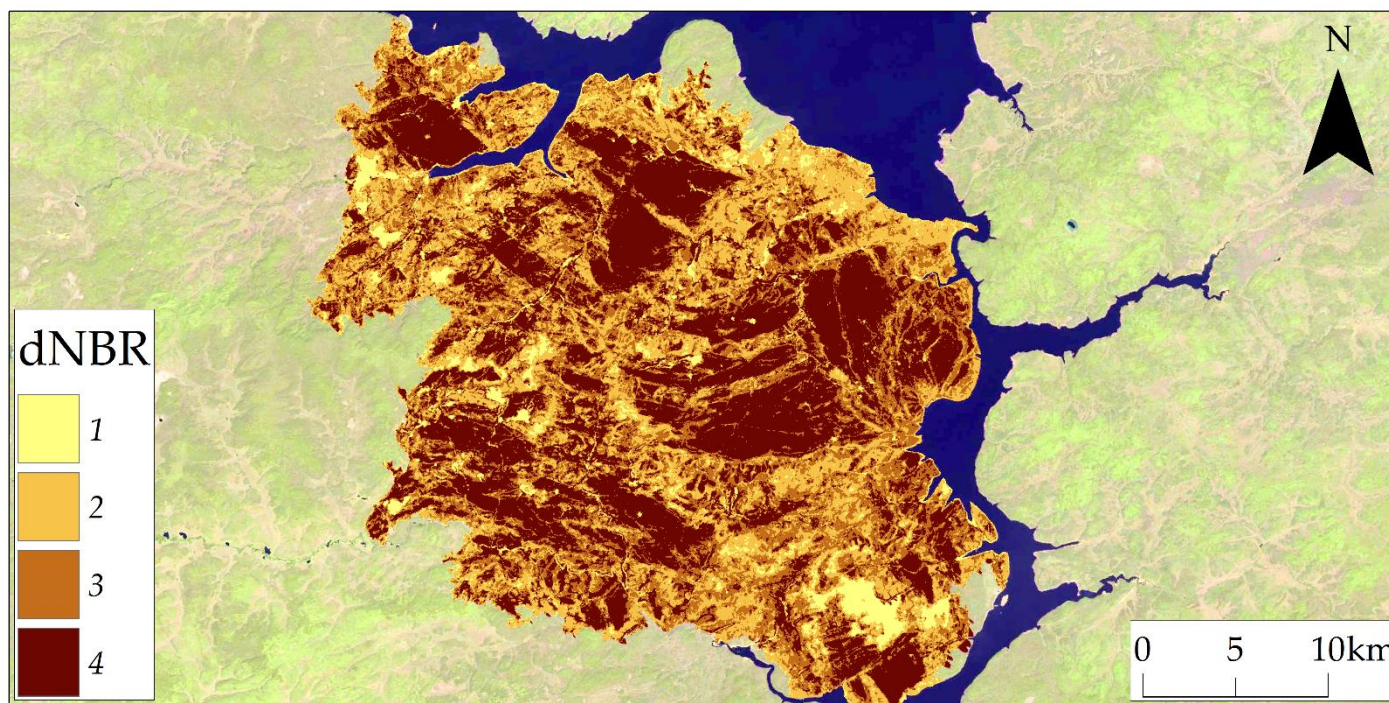
- $NIR$  – Ближний ИК ( $\lambda=0,845-0,885$  мкм)
- $SWIR$  – Коротковолновой ИК ( $\lambda= 2,100-2,300$  мкм)
- In Landsat 4-7,  $NBR = (\text{Band 4} - \text{Band 7}) / (\text{Band 4} + \text{Band 7})$ .
- In Landsat 8-9,  $NBR = (\text{Band 5} - \text{Band 7}) / (\text{Band 5} + \text{Band 7})$ .

$$dNBR = NBR_{pre-fire} - NBR_{post-fire} \quad (2)$$

- $NBR_{prefire}$  - допожарное изображение
- $NBR_{postfire}$  - послепожарное изображение

Таблица 2. Пороговые значения dNBR для классификации тяжести пожара и уровня воздействия пожара на растительный покров [dos Santos et. al. 2020, Key].

Степень воздействия огня	Класс	Диапазон dNBR	Степень уровня пожара
Low (LI)	1	< 0.099	Несгоревшая растительность
	2	0.101 . . . 0.439	Низкий уровень сгорания
Moderate (MI)	3	0.440 . . . 659	Средний уровень сгорания
High (HI)	4	> 0.660	Высокий уровень сгорания



Анализ амплитуды отклонений значений нарушенных участков от фоновых (%) для  $\Delta T/T_{bg}$  и  $\Delta NDVI/NDVI_{bg}$ , проводился за вегетационный период по следующим формулам:

$$\Delta T/T_{bg} = 100 \cdot (T_{tg} - T_{bg})/T_{bg} \quad (3)$$

- $T_{background}$  – тепловое поле для фоновой растительности
- $T_{target}$  – тепловое поле нарушенных участков

$$\Delta NDVI/NDVI_{bg} = 100 \cdot (\alpha_{tg} - \alpha_{bg})/\alpha_{tg} \quad (4)$$

- $NDVI_{background}$  – вегетационный индекс для фоновой растительности
- $NDVI_{target}$  – вегетационный индекс нарушенных участков



## Коэффициент dNBR после пожаров и через несколько лет в различных групп древостоя

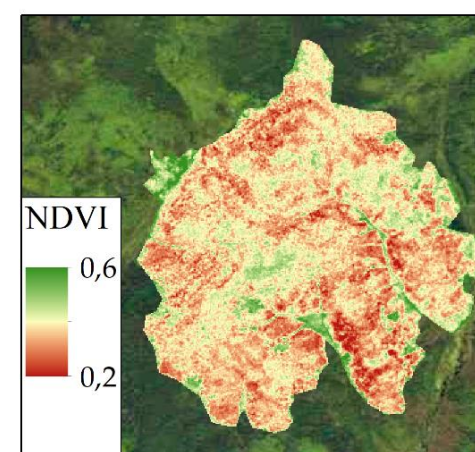
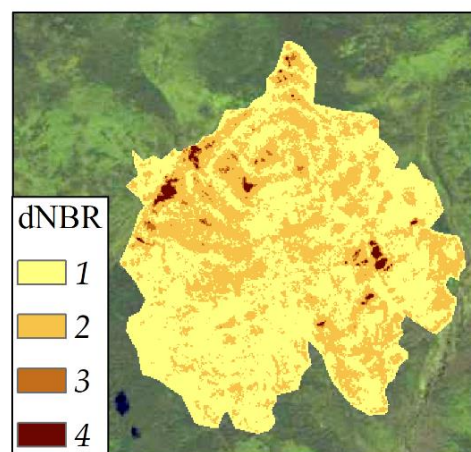
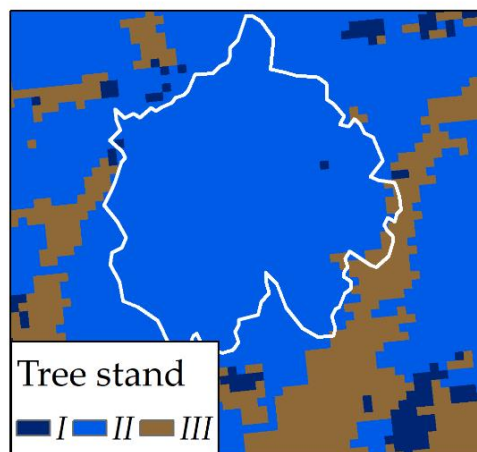
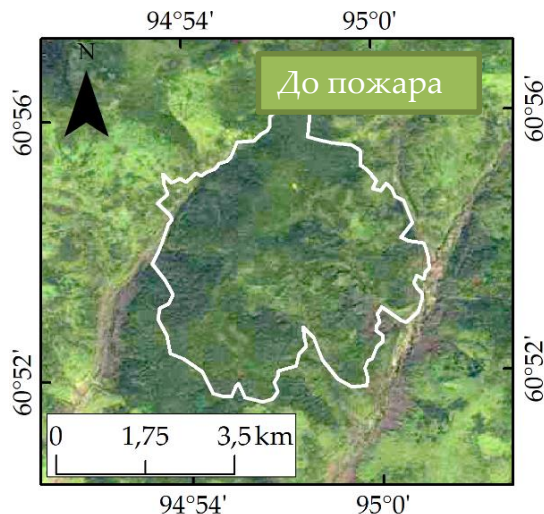
Была произведена оценка соотношения площадей с различными уровнями послепожарного воздействия с помощью dNBR (таблица 3).

Для всех групп после долгого промежутка времени стало заметно преобладание именно 1 группы dNBR (восстановившаяся растительность) от общей площади пожаров.

Таблица 3. Доля площади пожара в зависимости от серьезности/уровня воздействия пожара по диапазонам dNBR в условиях Сибирских лесов.

Группа	Древостой	Площадь пожаров (км <sup>2</sup> )	Уровень dNBR (в %)							
			1		2		3		4	
			После пожара	Через неск. лет	После пожара	Через неск. лет	После пожара	Через неск. лет	После пожара	Через неск. лет
1	Лиственница, Лиственница редколесья, Сосна	8037	12	82	41	13	27	5	21	0
2	Ель, Пихта, Кедр	825	46	77	24	19	10	4	20	0
3	Кедровый стланик, Тундра	5499	13	100	44	0	25	0	17	0

## Темнохвойный древостой (Ель)



Расчитанные показатели *dNBR* & *NDVI* сразу после пожара для темнохвойного древостоя (Ель) : (I-Другой древостой, II-Ель, III-Лиственница; 1-Несгоревшая растительность, 2-Низкий уровень, 3-Средний уровень, 4-Высокий уровень).

## Темнохвойный древостой (Ель)

	Среднее по всей территории
	Высокая степень воздействия
	Средняя степень воздействия
	Низкая степень воздействия

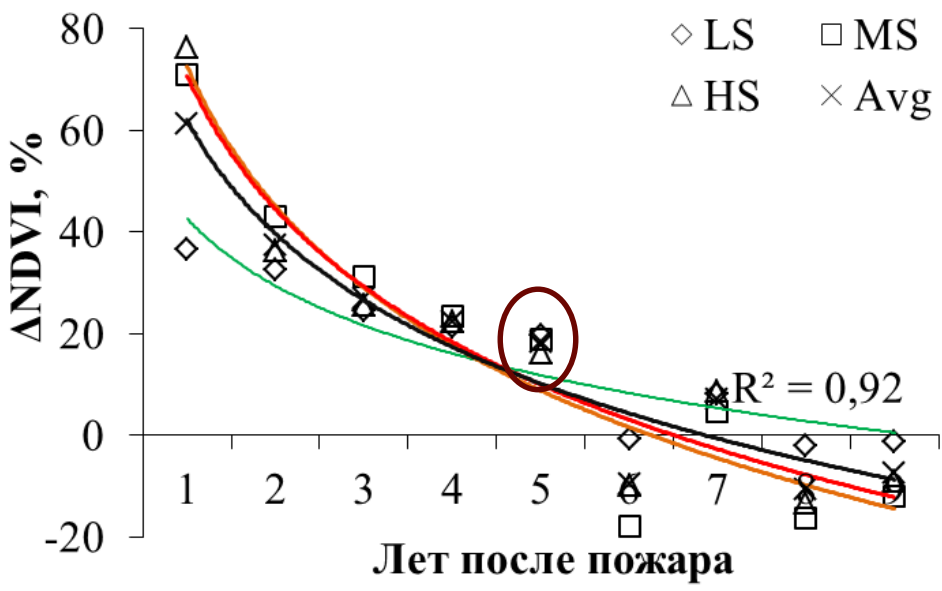
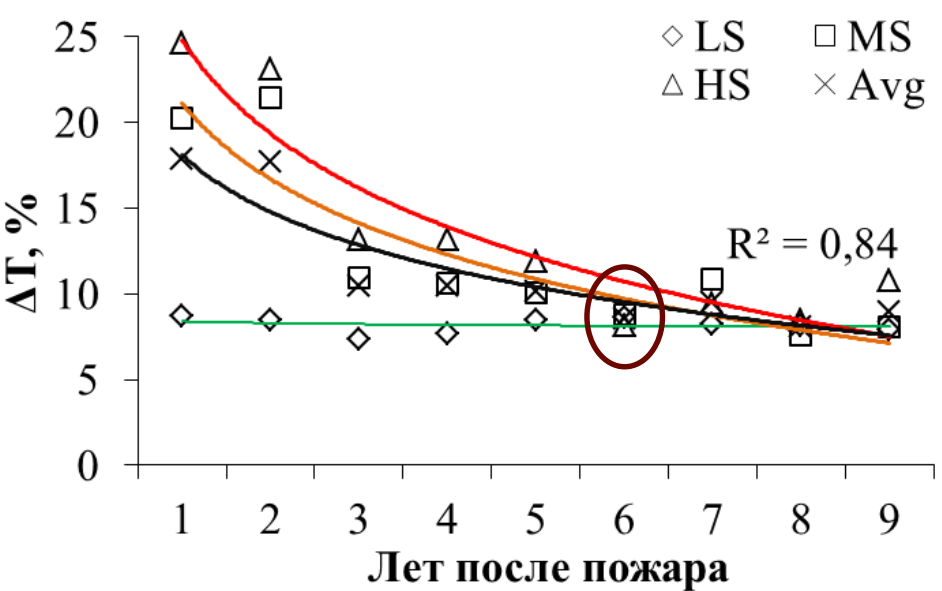
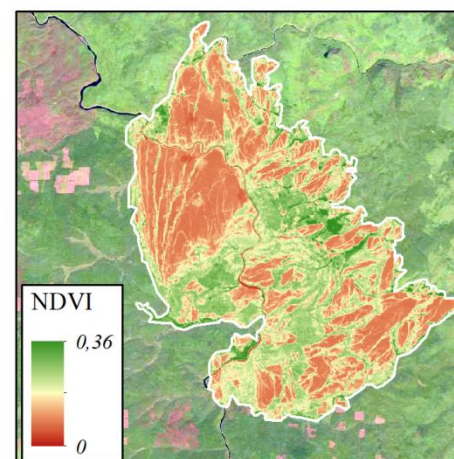
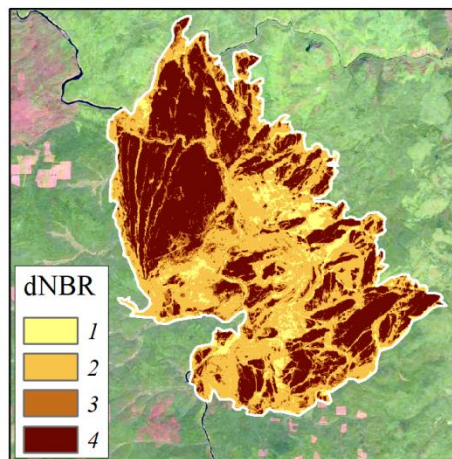
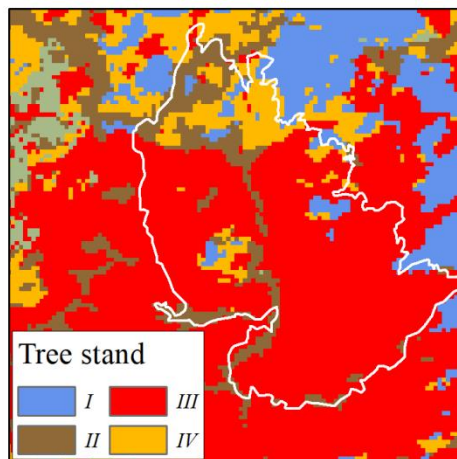
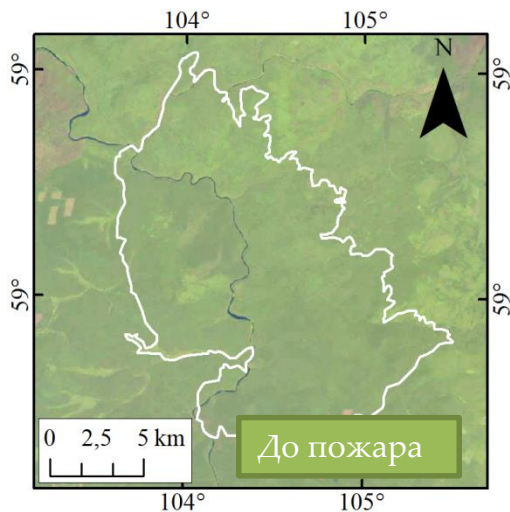


Таблица 4. Распределение спектральных значений для участков с преобладающим древостоем (Ель).

$\Delta T, \%$	Ель			
	LS	MS	HS	Avg
1	8,7	20,2	24,6	17,8
2	8,5	21,5	23,1	17,7
3	7,3	11,0	13,2	10,5
4	7,7	10,6	13,1	10,5
5	8,4	10,1	11,8	10,1
6	8,6	8,8	8,1	8,5
7	8,3	10,8	9,4	9,5
8	8,2	7,6	8,5	8,1
9	7,9	8,0	10,8	8,9
$\Delta NDVI, \%$	Ель			
	LS	MS	HS	Avg
1	36,7	70,9	76,2	61,3
2	32,6	43,0	36,4	37,3
3	24,5	31,1	25,4	27,0
4	21,1	23,5	22,3	22,3
5	19,6	19,0	16,3	18,3
6	-0,8	-18,1	-9,9	-9,6
7	8,1	4,6	8,7	7,1
8	-2,0	-16,3	-13,4	-10,6
9	-1,3	-12,0	-9,2	-7,5



## Темнохвойный древостой (Кедр)



Рассчитанные показатели *dNBR* & *NDVI* сразу после пожара для темногохвойного древостоя (Кедр): (I – Береза, II – Лиственница, III – Кедр, IV – Сосна; 1 – Несгоревшая растительность, 2 – Низкий уровень, 3 – Средний уровень, 4 – Высокий уровень).

## Темнохвойный древостой (Кедр)

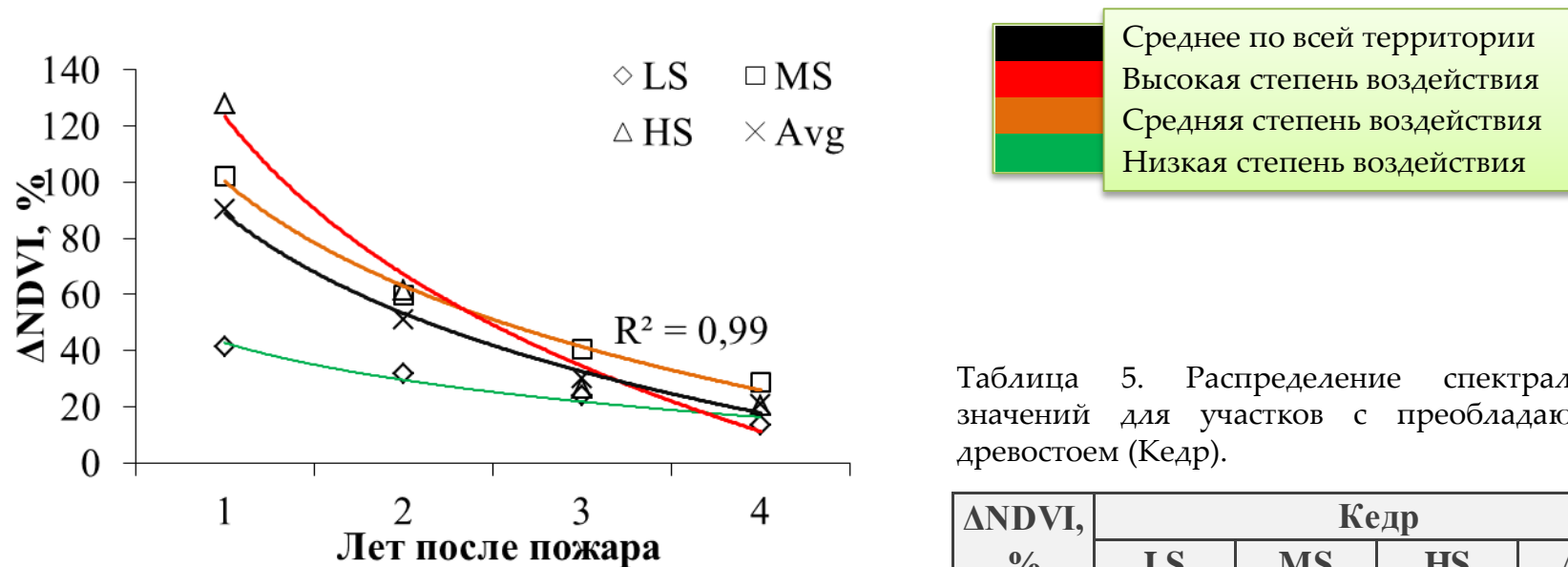
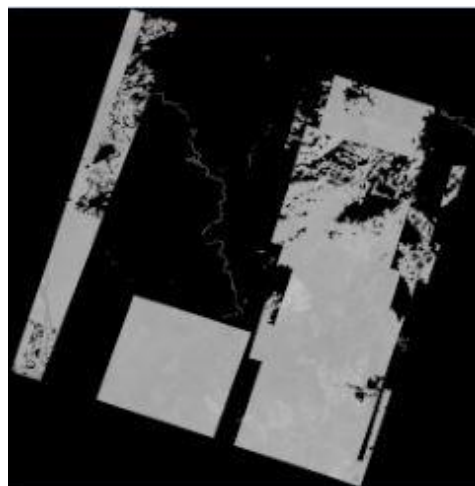


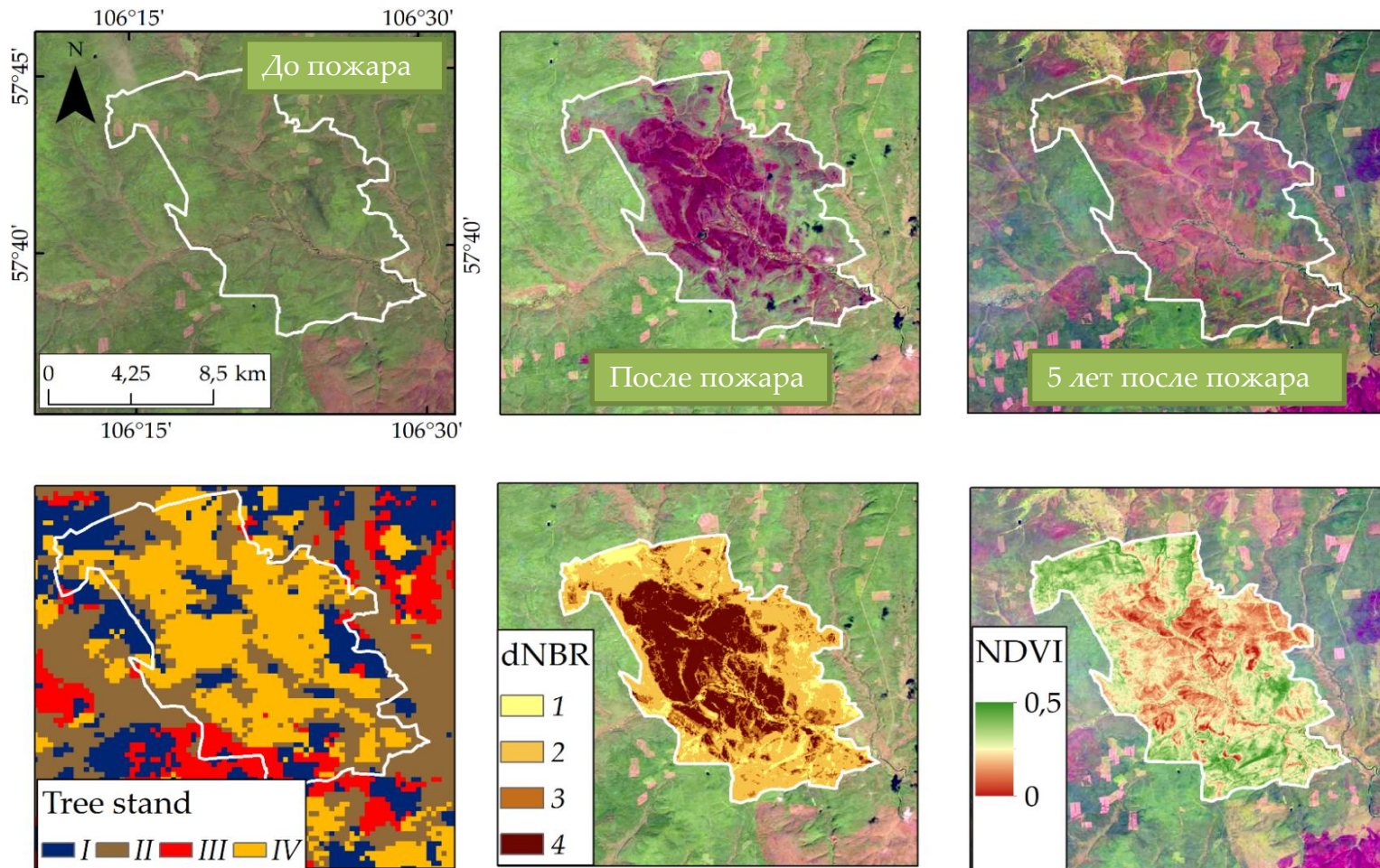
Таблица 5. Распределение спектральных значений для участков с преобладающим древостоем (Кедр).

ΔNDVI, %	Кедр			
	LS	MS	HS	Avg
1	41,1	102,1	127,9	90,4
2	31,8	59,6	61,6	51,0
3	23,7	40,3	26,6	30,2
4	13,6	28,5	20,4	20,8

Пример повреждения изображения с теплового канала Landsat-8 TIRS / B10 . Поэтому для кедра из-за отсутствия требуемых снимков рассчитан только показатель NDVI.

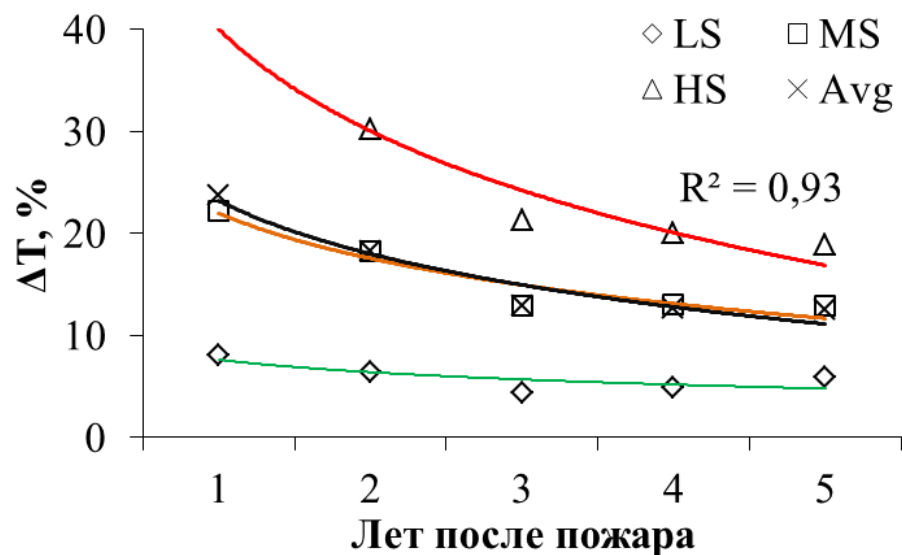
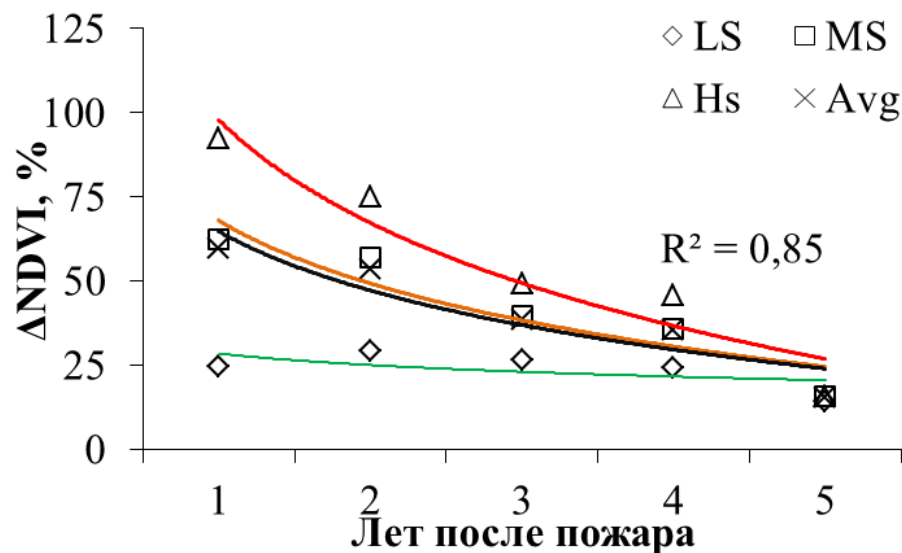


## Светлохвойный древостой (Сосна)



Расчитанные показатели *dNBR* & *NDVI* сразу после пожара для светлохвойного древостоя (Сосна): (I – Другой древостой, II – Лиственница, III – Кедр, IV – Сосна; 1 – Несгоревшая растительность, 2 – Низкий уровень, 3 – Средний уровень, 4 – Высокий уровень).

## Светлохвойный древостой (Сосна)

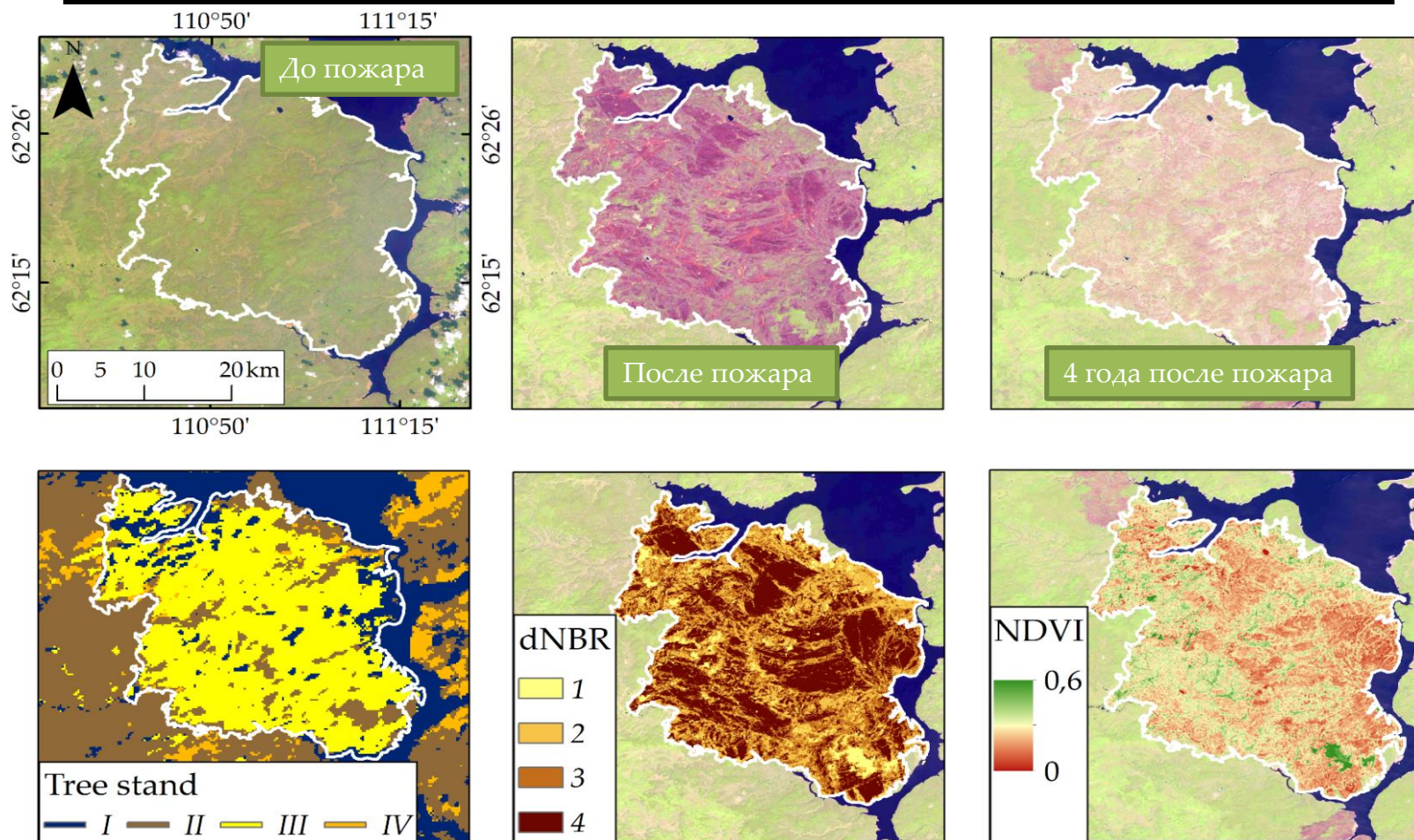


Среднее по всей территории  
 Высокая степень воздействия  
 Средняя степень воздействия  
 Низкая степень воздействия

Таблица 6. Распределение спектральных значений для участков с преобладающим древостоем (Пихта).

ΔT, %	Сосна			
	LS	MS	HS	Avg
1	8,1	22,3	40,9	23,7
2	6,4	18,3	30,2	18,3
3	4,4	12,9	21,3	12,8
4	4,9	13,0	20,0	12,6
5	5,9	12,9	18,9	12,6
ΔNDVI, %	Сосна			
	LS	MS	HS	Avg
1	24,7	62,3	92,2	59,7
2	29,0	57,0	74,9	53,6
3	26,3	39,6	49,2	38,4
4	24,2	35,8	45,8	35,3
5	14,2	15,7	15,7	15,2

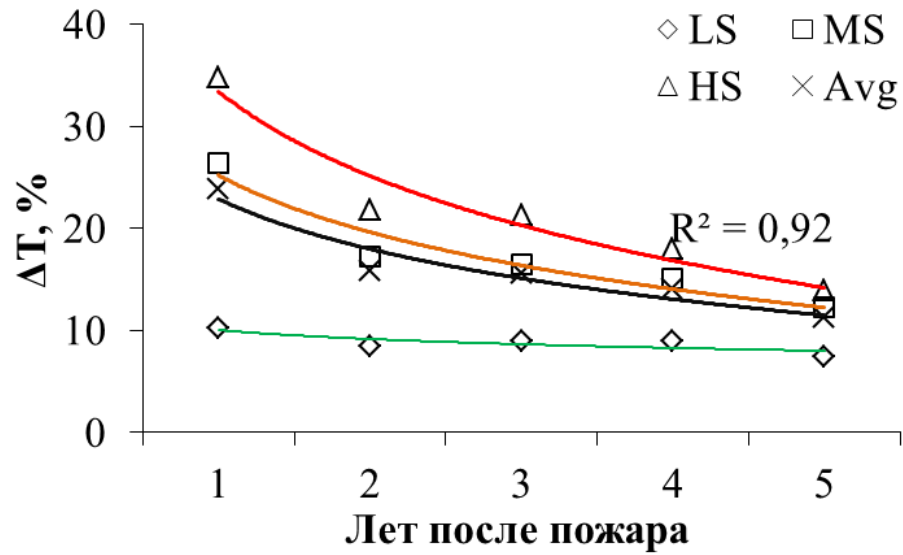
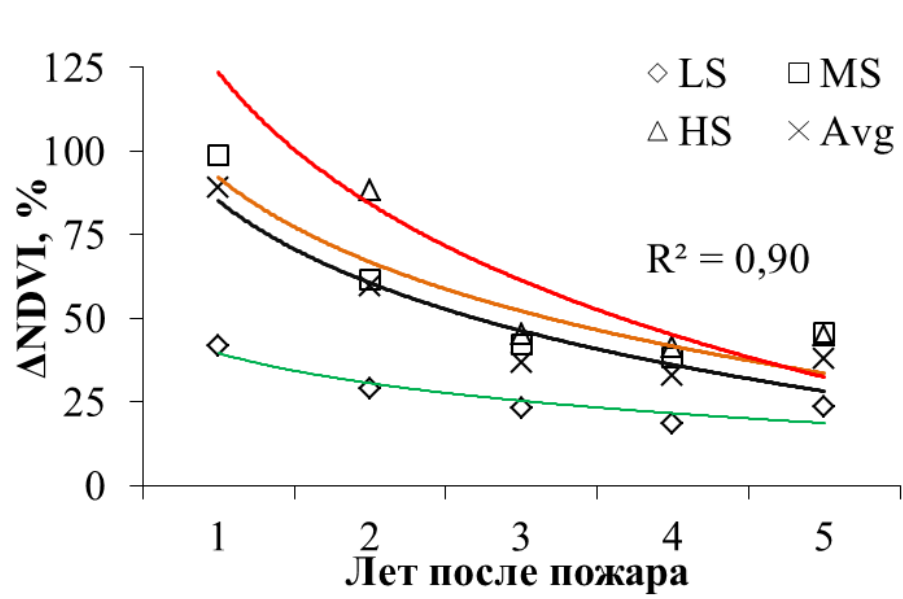
## Светлохвойный древостой (Лиственница редколесья)



Рассчитанные показатели  $dNBR$  &  $NDVI$  сразу после пожара для светлохвойного древостоя (Лиственница редколесья): (I–Другой древостой, II–Лиственница, III–Лиственница редколесья, IV–Сосна; 1–Несгоревшая растительность, 2–Низкий уровень, 3–Средний уровень, 4–Высокий уровень).



## Светлохвойный древостой (Лиственница редколесья)



Среднее по всей территории  
 Высокая степень воздействия  
 Средняя степень воздействия  
 Низкая степень воздействия

Таблица 7. Распределение спектральных значений для участков с преобладающим древостоем (Лиственница редколесья).

ΔT, %	Лиственница			
	LS	MS	HS	Avg
1	10,2	26,4	34,9	23,8
2	8,5	17,3	21,8	15,8
3	8,9	16,5	21,3	15,6
4	9,0	15,1	18,0	14,0
5	7,5	12,3	14,0	11,2
ΔNDVI, %	Лиственница			
	LS	MS	HS	Avg
1	41,6	98,7	126,7	89,0
2	29,1	61,5	88,3	59,6
3	23,0	42,2	45,2	36,8
4	18,3	38,2	41,5	32,7
5	23,7	45,6	44,7	38,0

- Количественно определены пропорции почвенного покрова после пожаров для 4 классов показателя dNBR: - 1 группы (несгоревшая растительность 12%, низкий 41%, средний 27% и высокой 21% уровень повреждения почвы); - 2 группы (46%, 24%, 10% и 20%); - 3 группы (13%, 44%, 25% и 17%).
- Получены пропорции показателя dNBR послепожарного эффекта через несколько лет: для 1 группы 82%, 13%, 5% и 0%, для 2 группы 77%, 19%, 4% и 0%, для 3 группы почвенный покров восстановился на все 100%.
- Спектральные показатели позволяют оценить как степень воздействия пожара на древостой, так и скорость восстановительных процессов в терминах  $\delta T/T_{bg}$  и  $\Delta NDVI/NDVI_{bg}$ .
- Оценен наиболее значительный уровень аномалии  $\delta T/T_{bg}$  в сосновых древостоях (~40%), в лиственничных древостоях (~35%) и в темнохвойных еловых (~25%) и пихтовых (~20%) лесах. Экспоненциальное уменьшение температурных аномалий наблюдается в течение 5 лет после воздействия пожара. Высокая скорость восстановления была зарегистрирована для аномалий  $\Delta NDVI/NDVI_{bg}$  в течение первых 3 лет после воздействия пожара, и, наконец, значения стабилизировались при занижении фона на 5-15%.
- Таким образом, для успешного дистанционного управления восстановлением необходимо учитывать как начальный уровень ущерба от пожара, так и различия, вызванные доминирующими древостоями Сибири.

1. Ponomarev E., Zabrodin A., Ponomareva T. Classification of Fire Damage to Boreal Forests of Siberia in 2021 Based on the dNBR Index // **Fire**. 2022, Vol. 5, Is. 1.
2. Knorre, A.A., Kirdeyanov A.V., Prokushkin A.S., Krusic P.J., Büntgen U. Tree ring-based reconstruction of the long-term influence of wildfires on permafrost active layer dynamics in Central Siberia // **Science of the Total Environment**. 2019, 652, 314–319.
3. Ponomarev E., Masyagina O., Litvintsev K., Ponomareva T., Shvetsov E., Finnikov K. The Effect of Post-Fire Disturbances on a Seasonally Thawed Layer in the Permafrost Larch Forests of Central Siberia // **Forests**. 2020, 11, 790.
4. dos Santos, S.M.B., Bento-Gonçalves, A., Franca-Rocha, W., Baptista, G. Assessment of Burned Forest Area Severity and Postfire Regrowth in Chapada Diamantina National Park (Bahia, Brazil) Using dNBR and RdNBR Spectral Indices // **Geosciences**. 2020, 10, 106.
5. Key, C.H., Benson, N.C. Landscape Assessment: Sampling and Analysis Methods. // In **FIREMON: Fire Effects Monitoring and Inventory System**. Available online: <https://www.fs.usda.gov/treesearch/pubs/24066> (accessed on 1 December 2021).
6. Егоров В.А., Барталев С.А., Колбудаев П.А., Плотников Д.Е., Хвостиков С.А. Карта растительного покрова России, полученная по данным спутниковой системы Proba-V. // **Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса**. 2018, Т. 15, № 2, С. 282-286.
7. Лупян, Е. А., Лозин Д. В., Балашов И. В., Барталев С. А., Стыценок Ф. В. Исследование зависимости степени повреждений лесов пожарами от интенсивности горения по данным спутникового мониторинга. **Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса**. 2022. Т. 19. № 3. С. 217–232

