

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

А.Н. Забродин^{1,2}, Н.Д. Якимов^{1,2}, Е.И. Пономарев^{1,3}

¹ Сибирский Федеральный Университет, Красноярск

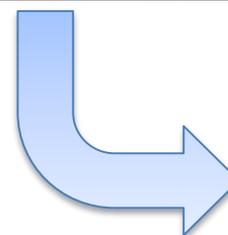
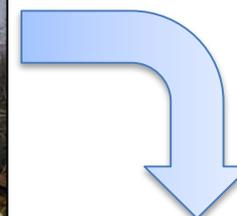
² ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск

³ 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

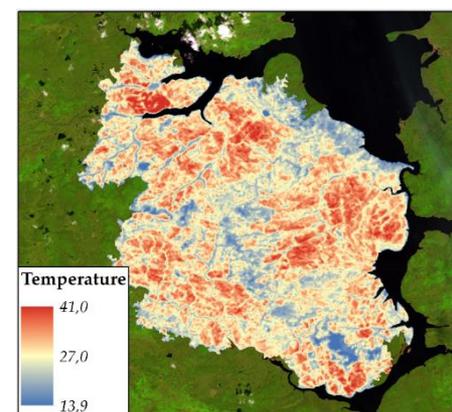
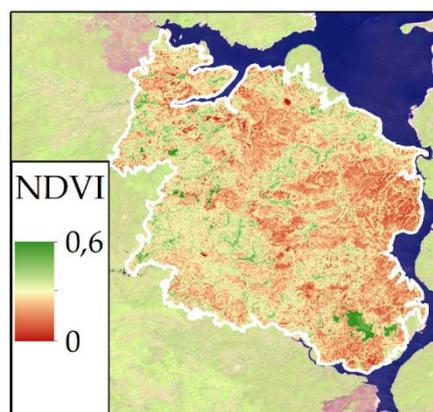
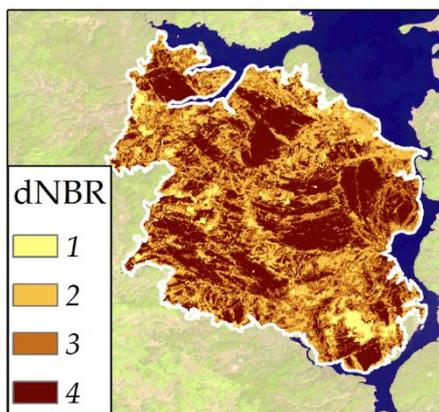


5 лет

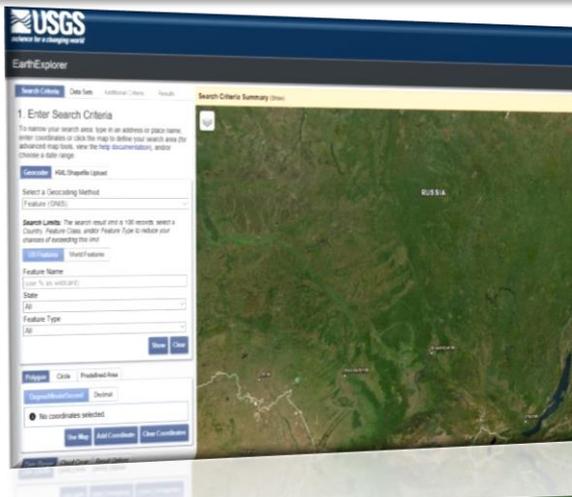
* Фото И. Безкорвайная

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).

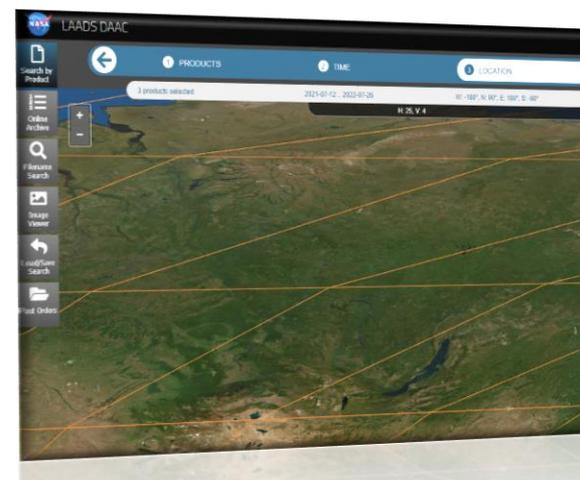


предварительная обработка



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 ²)	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:

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

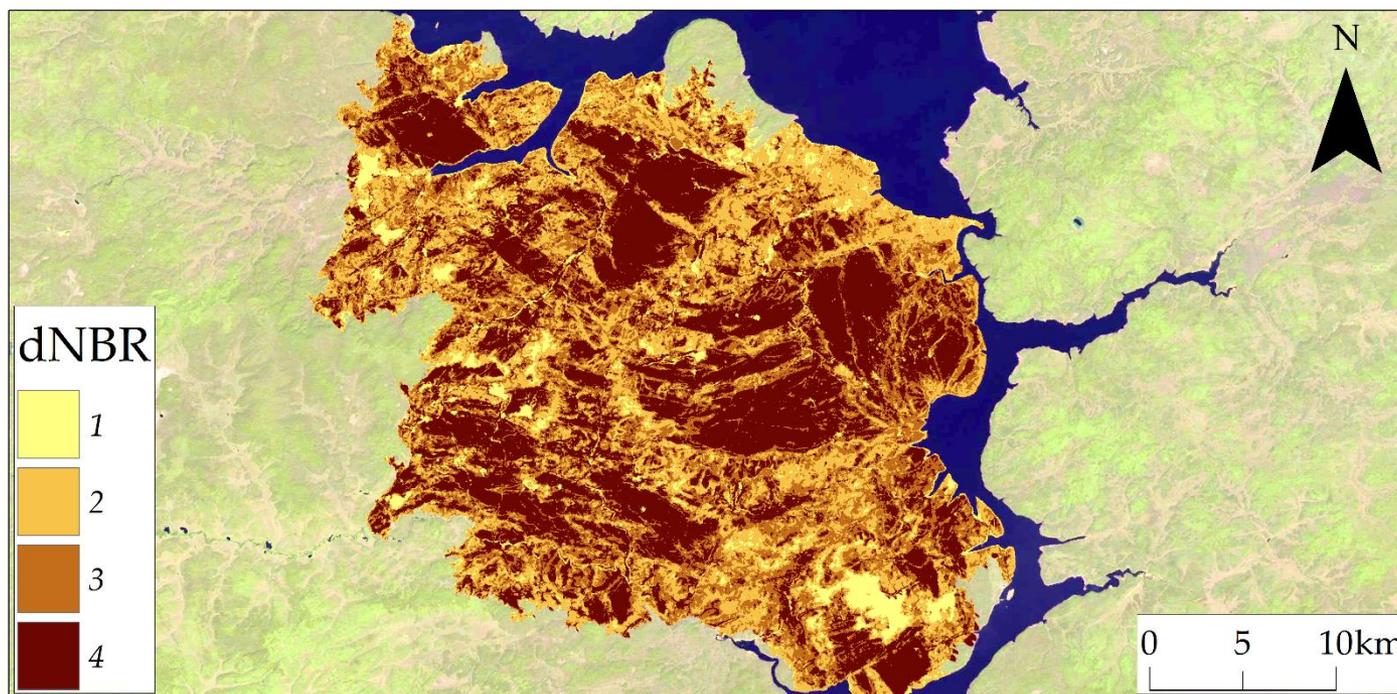
- NIR – Ближний ИК ($\lambda=0,845-0,885$ мкм)
- $SWIR$ – Коротковолновой ИК ($\lambda= 2,100-2,300$ мкм)
- In Landsat 4-7, $NBR = (\text{Band 4} - \text{Band 7}) / (\text{Band 4} + \text{Band 7})$.
- In Landsat 8-9, $NBR = (\text{Band 5} - \text{Band 7}) / (\text{Band 5} + \text{Band 7})$.

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

- $NBR_{prefire}$ - 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

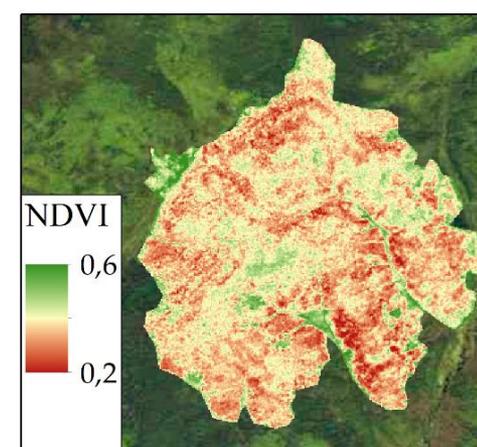
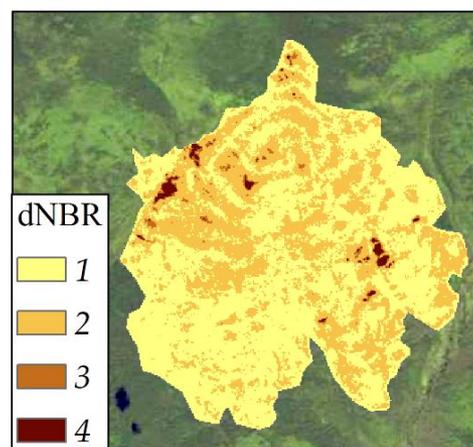
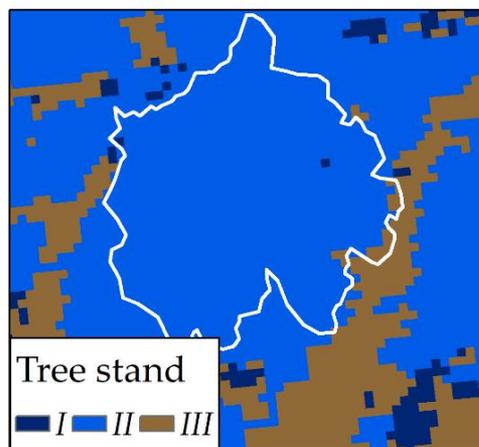
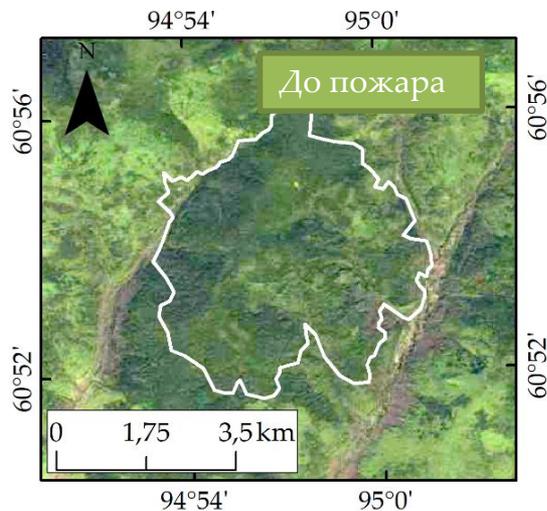
Была произведена оценка соотношения площадей с различными уровнями послепожарного воздействия с помощью dNBR (таблица 3).

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 ²)	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

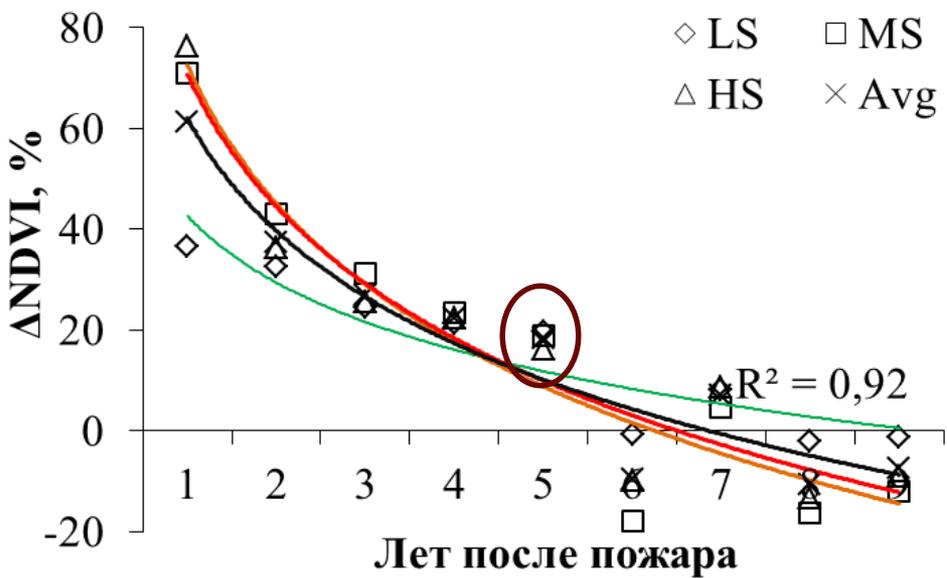
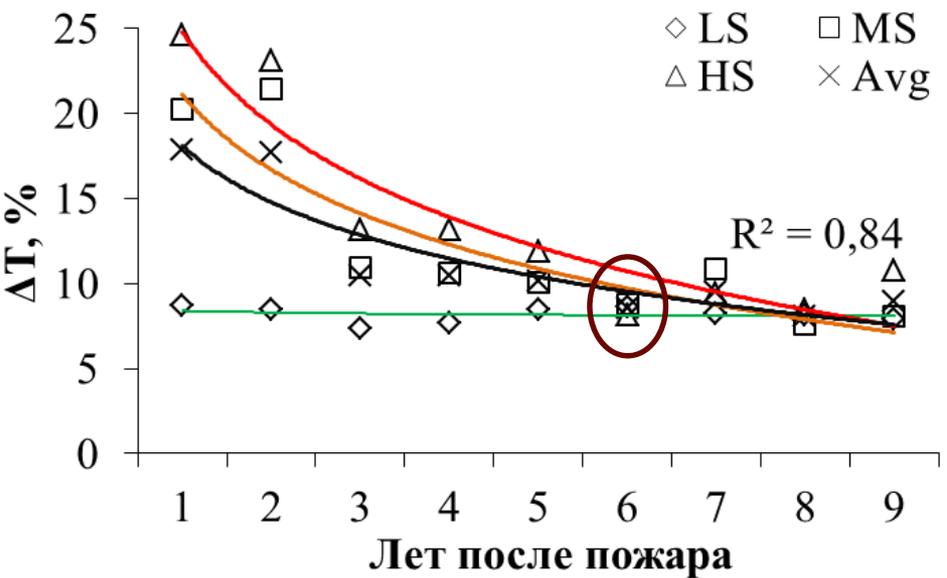
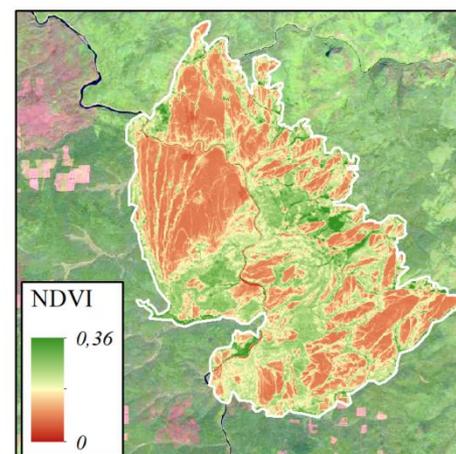
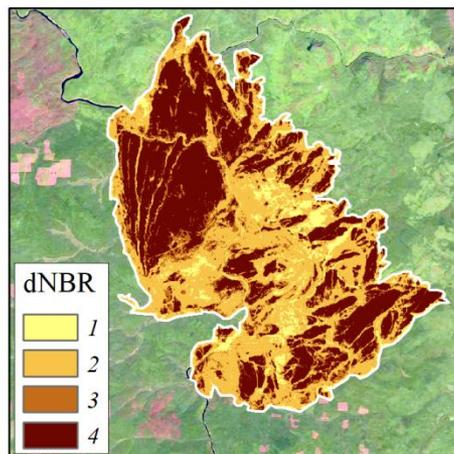
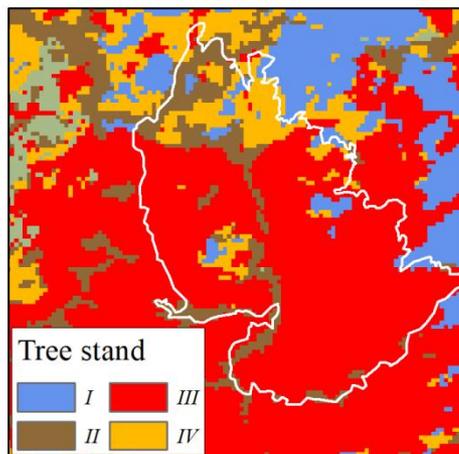
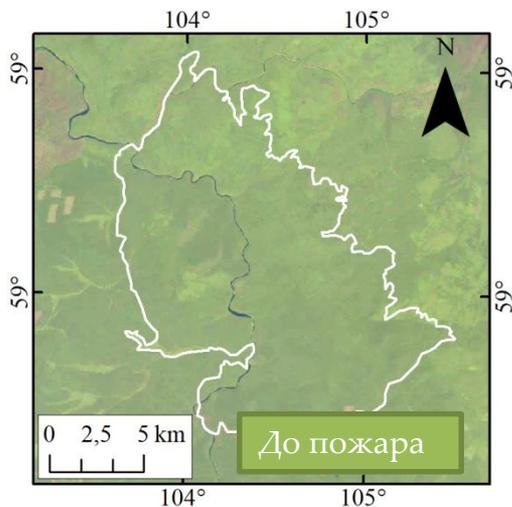


Таблица 4. Распределение спектральных значений для участков с преобладающим древостоем (Ель).

ΔT, %	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
ΔNDVI, %	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)

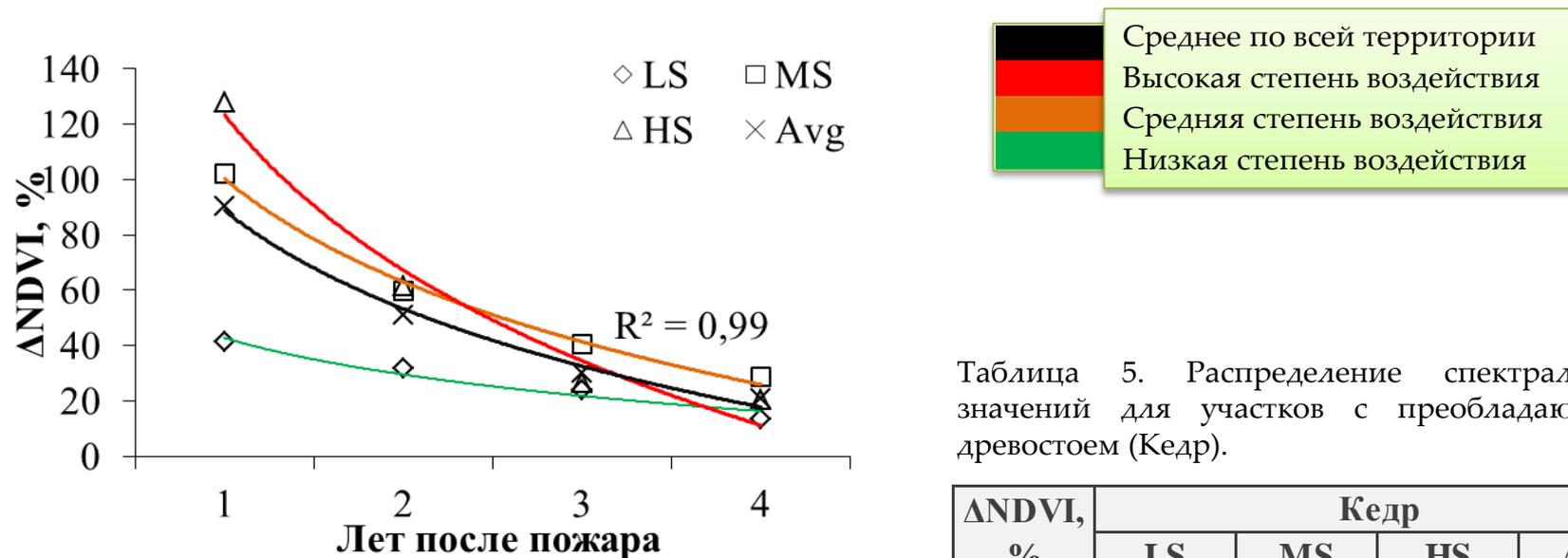
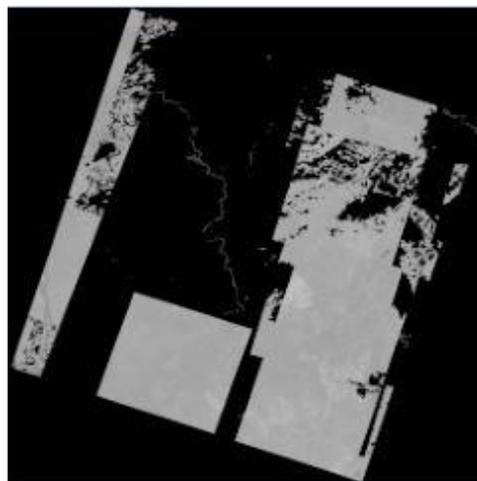


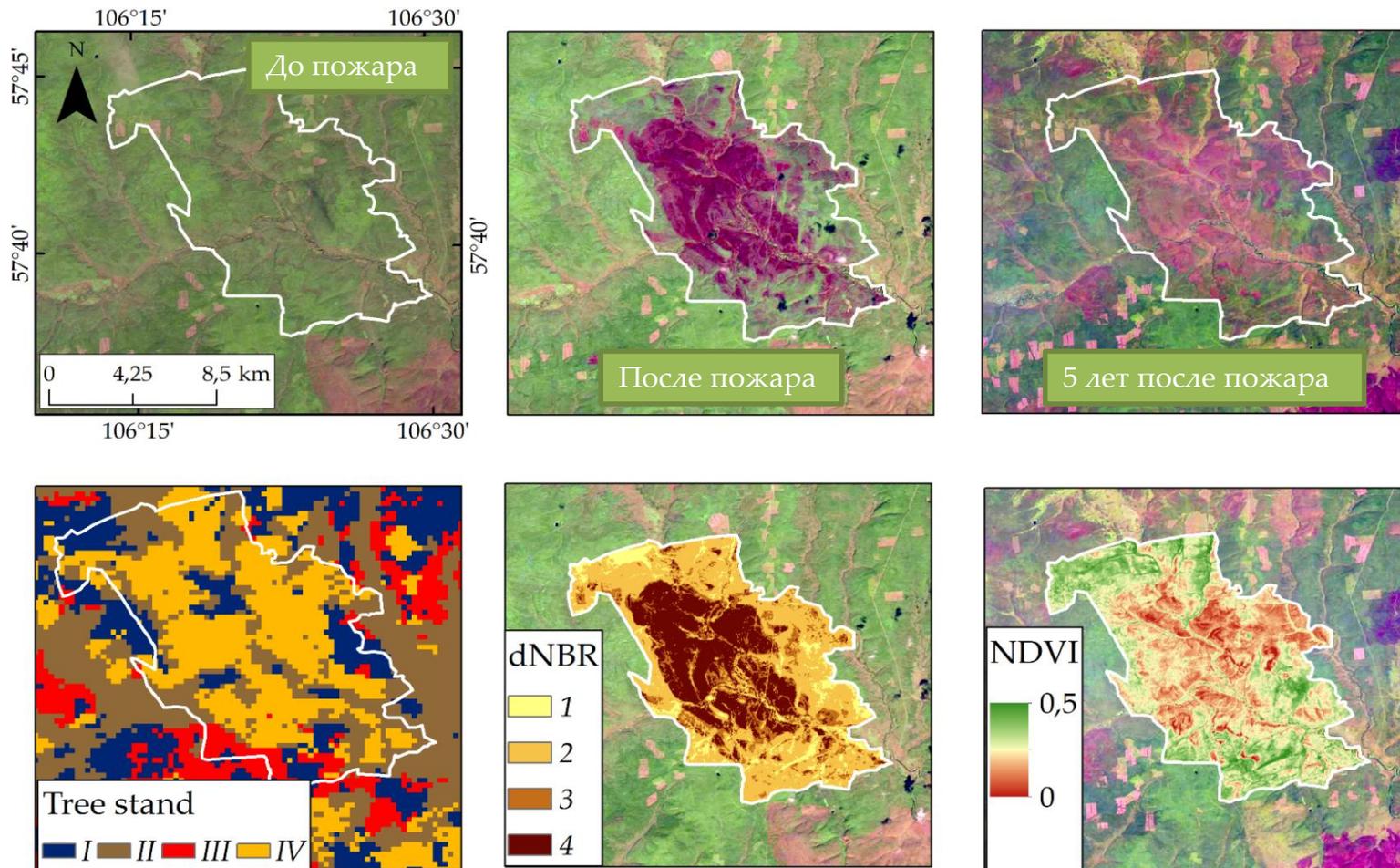
Таблица 5. Распределение спектральных значений для участков с преобладающим древостоем (Кедр).

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.

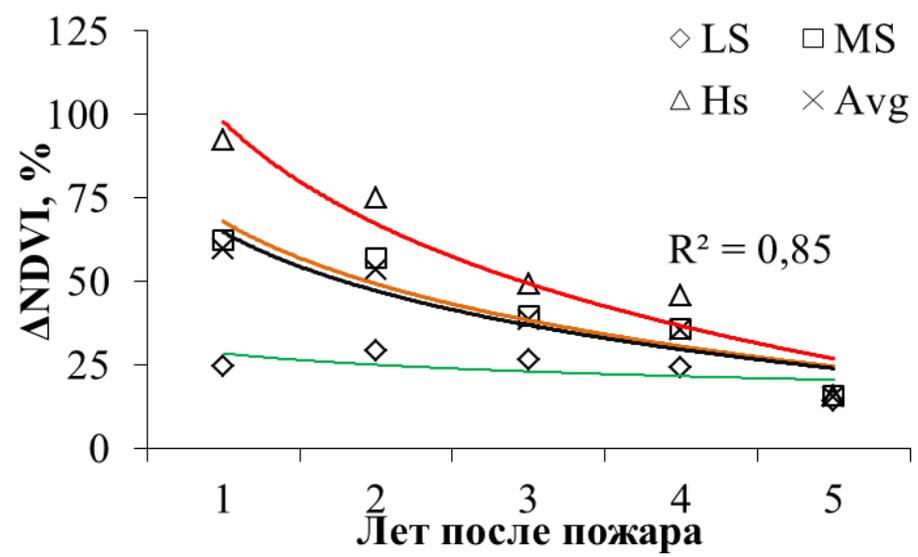


Светлохвойный древостой (Сосна)



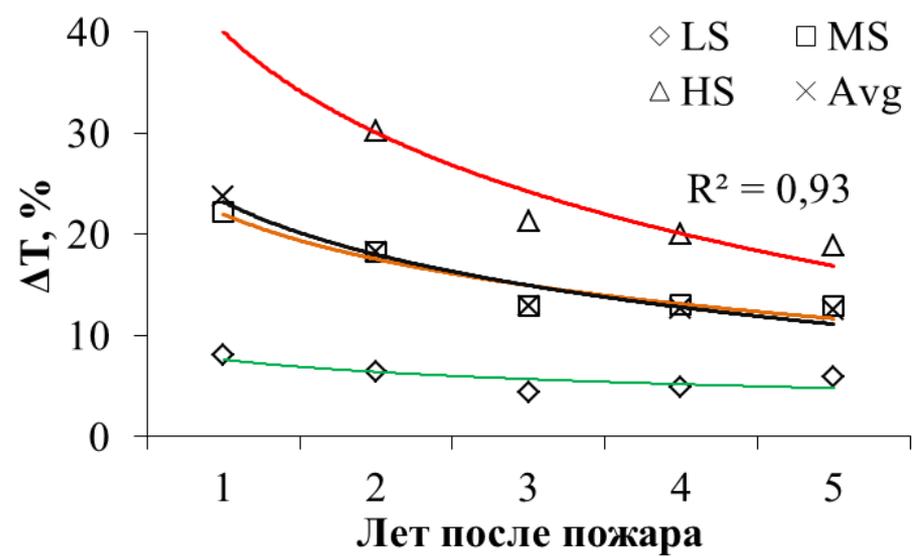
Расчитанные показатели *dNBR* & *NDVI* сразу после пожара для светлохвойного древостоя (Сосна): (I – Другой древостой, II – Лиственница, III – Кедр, IV – Сосна; 1 – Несгоревшая растительность, 2 – Низкий уровень, 3 – Средний уровень, 4 – Высокий уровень).

Светлохвойный древостой (Сосна)



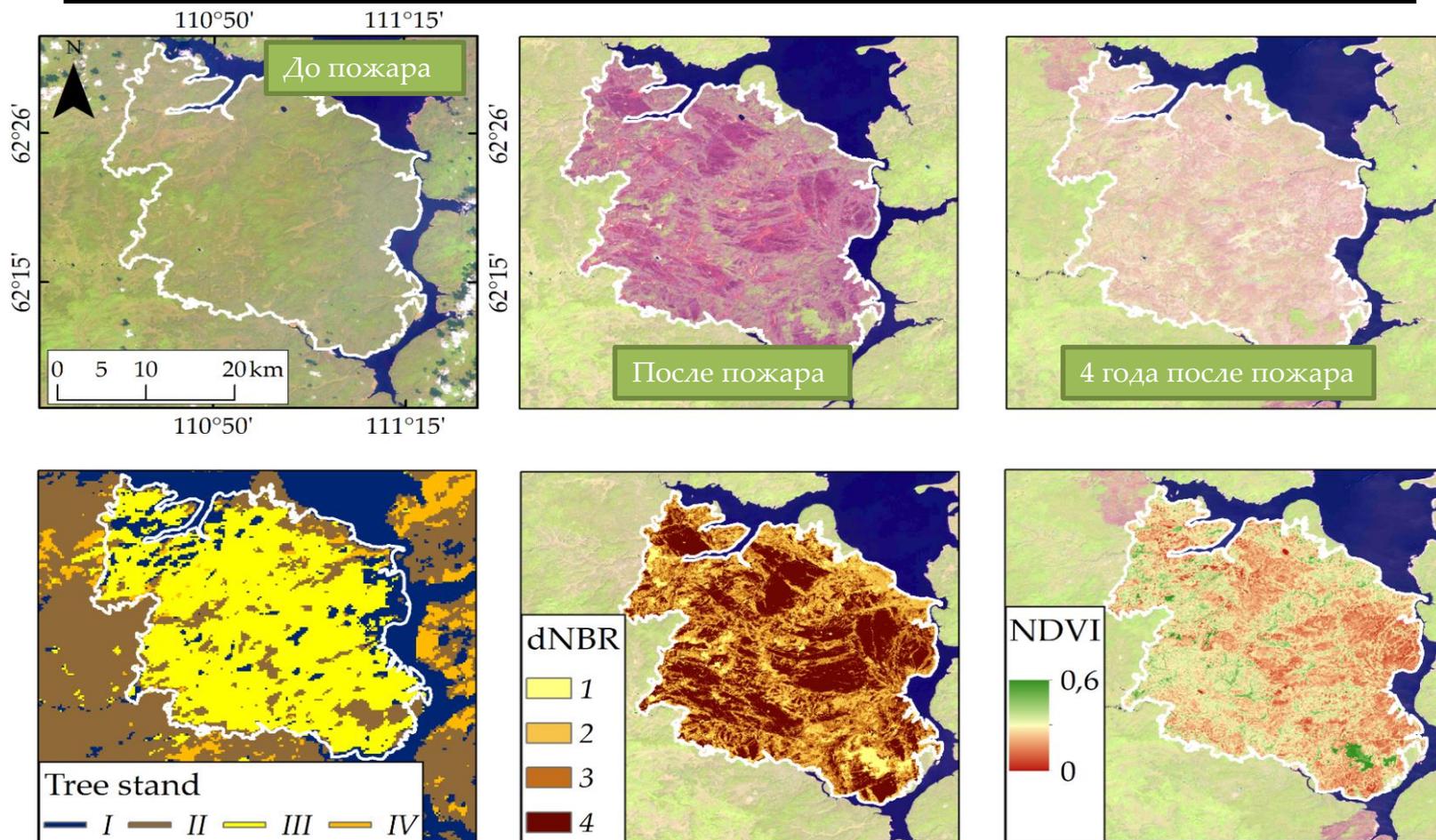
- Среднее по всей территории
- Высокая степень воздействия
- Средняя степень воздействия
- Низкая степень воздействия

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



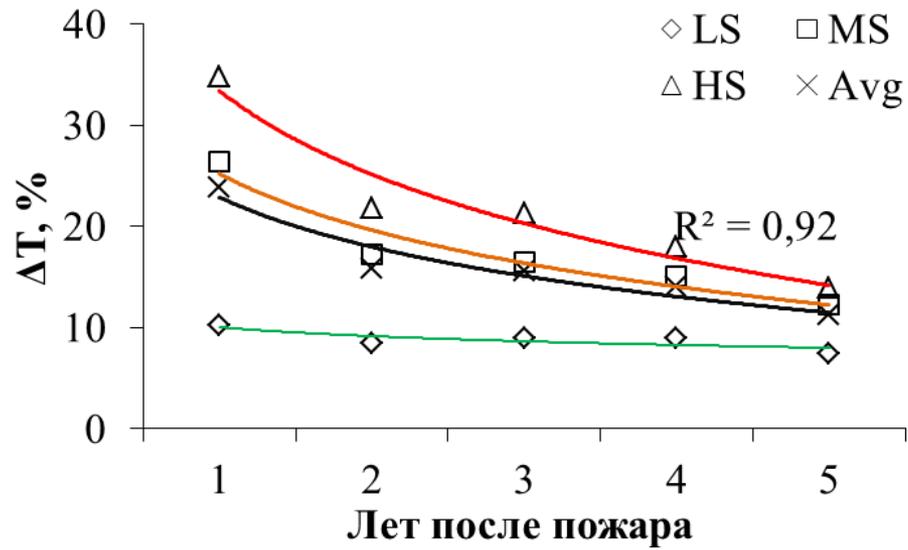
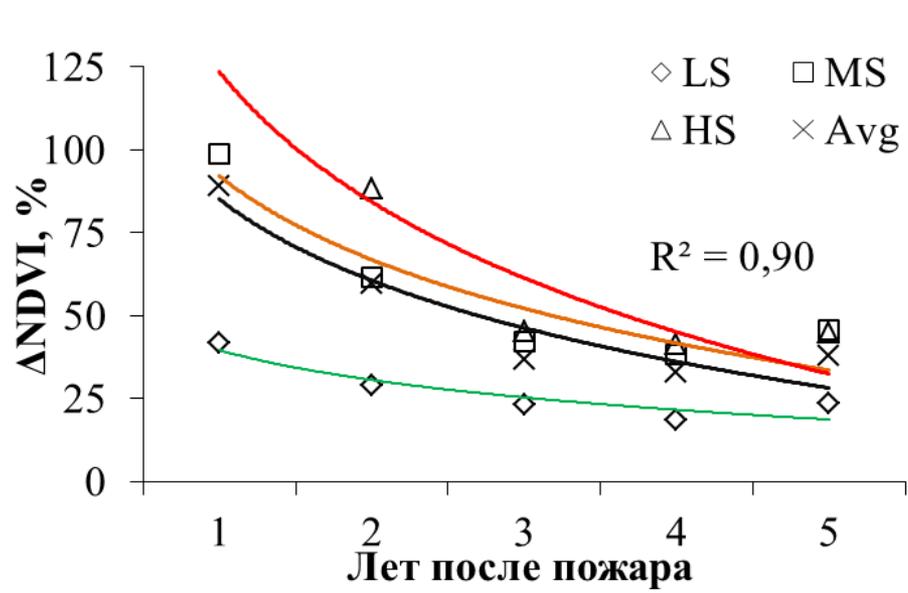
ΔT, %	Сосна			
	LS	MS	HS	Avg
1	8,1	22,3	40,9	23,7
2	6,4	18,3	30,2	18,3
3	4,4	12,9	21,3	12,8
4	4,9	13,0	20,0	12,6
5	5,9	12,9	18,9	12,6
ΔNDVI, %	Сосна			
	LS	MS	HS	Avg
1	24,7	62,3	92,2	59,7
2	29,0	57,0	74,9	53,6
3	26,3	39,6	49,2	38,4
4	24,2	35,8	45,8	35,3
5	14,2	15,7	15,7	15,2

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)



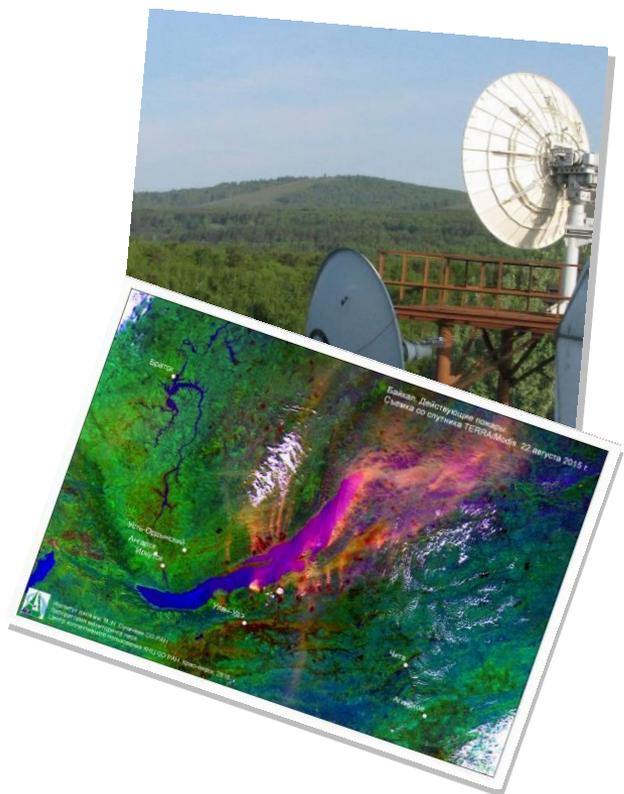
Среднее по всей территории
 Высокая степень воздействия
 Средняя степень воздействия
 Низкая степень воздействия

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 лиственных 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



Спасибо за внимание!

Работа выполнена в рамках базового проекта № 0287-2021-0040 (ФИЦ КНЦ СО РАН) и при поддержке РФФИ-КФН №20-44-242002 «Инструментальный мониторинг физических свойств и численное моделирование состояния техногенно-нарушенных почв Сибири».

В работе использовались данные и аппаратура предоставленная ФИЦ КНЦ СО РАН.