

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

**Москва, Россия  
11–15 ноября 2024 года**

*Особенности послепожарной динамики спектральных признаков  
участков лиственничных древостоев мерзлотной зоны Сибири*

Лаборатория космических систем и технологий  
ФИЦ КНЦ СО РАН, м.н.с.

Якимов Н.Д.

Соавторы:

Забродин А.В., Пономарёв Е.И.

# *Состояние вопроса. Мерзлотные слои*

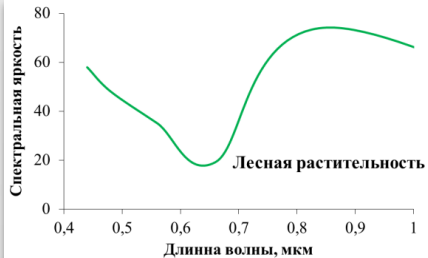
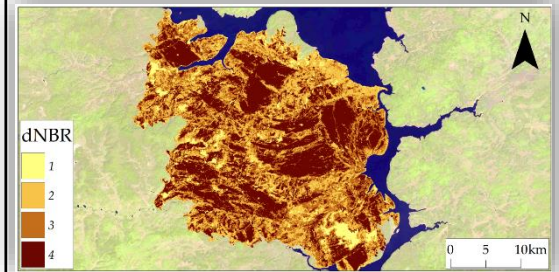
---

Пожары в криолитозоне с одной стороны являются неотъемлемой частью процессов формирования и динамики экосистем, а с другой стороны могут становиться причиной долговременных нарушений и неустойчивости экосистем. В первую очередь после пожаров фиксируются различная степень повреждения древостоев и почвенного покрова (Bartalev, Stytsenko, 2021, Лупян и др., 2022). Исследования, основанные на материалах спутниковой съемки с применением спектральных индексов, позволяют получать количественные оценки степени пирогенной нарушенности лесов, успешности восстановительного процесса в различных лесорастительных условиях определяемых присутствием мерзлоты.

# Состояние вопроса. Спектральные индексы

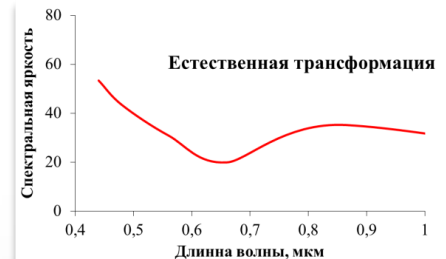
Двадцать вторая международная конференция "СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА"

Классификация послепожарных полигонов на снимках со спутников на основе спектрального нормализованного индекса **dNBR** (The differenced of Normalized Burn Ratio) позволяет характеризовать степень нарушенности в зависимости от типа пожара и интенсивности горения.



Один из самых распространённых вариантов количественно отследить степень трансформации растительного покрова – это использование вегетационных индексов, например **NDVI** (*Normalized Difference Vegetation Index*).

Использование данных с тепловых каналов, помимо традиционных вегетационных, увеличивают период наблюдений срока восстановления поврежденных участков.



# Цель работы:

Оценить: \*изменения спектральных признаков послепожарных участков для 4 вариантов степени сомкнутости мерзлоты на территории Сибири; \*диапазоны спектральных индексов при различных уровнях начального воздействия пожаров по индексу dNBR; \*скорость восстановления аномалий индексов  $\Delta NDVI$  и  $\Delta LST$  при послепожарной сукцессии в условиях 4 вариантов сомкнутости мерзлотных слоев.



# Район исследования:

Двадцать вторая международная конференция "СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА"

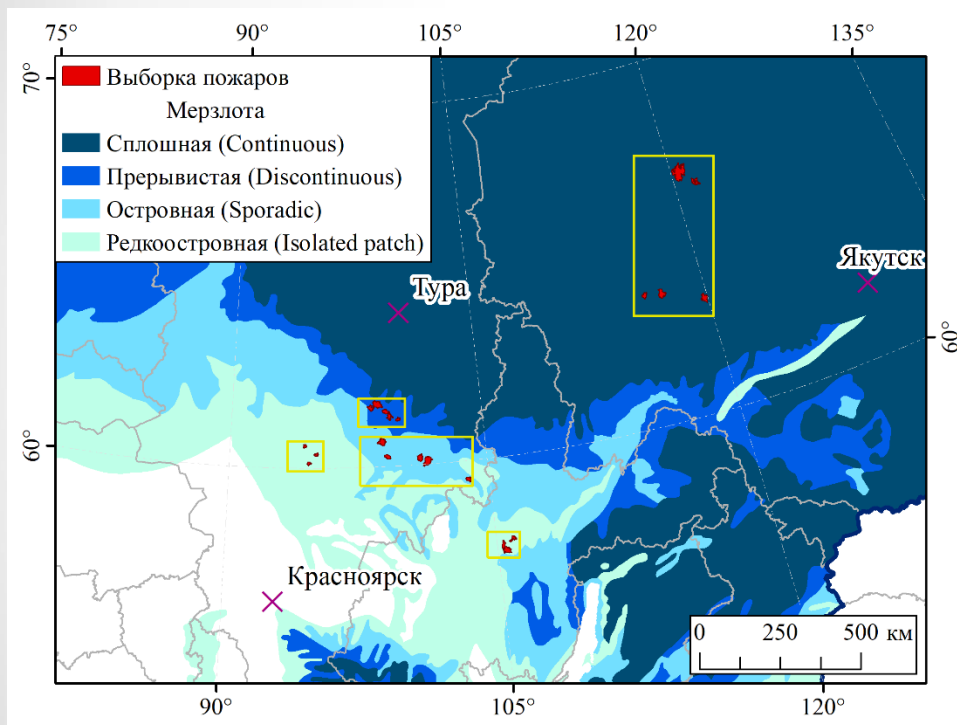


Рис. 1. Категории сомкнутости мерзлоты на территории средней Сибири. По материалам открытого каталога National Snow and Ice Data Center (<https://nsidc.org/data/ggd318>).

Прямоугольники – области выборки пожаров, красные полигоны – пожары по данным ДЗ; Предварительный анализ и пространственная привязка пожаров выполнена на основе базы данных «Пожарное воздействие в криолитозоне Сибири за период 1996–2023 гг.», содержащей сведения о масштабах пожарного воздействия в зоне многолетней мерзлоты Сибири.

Мерзлотные слои занимают:  
**Сплошная** – >90% площади,  
**Прерывистая** – от 50 до 90% площади,  
**Островная** – не менее 10% площади,  
**Редкоостровная** – территория с изолированными остаточными проявлениями мерзлоты.

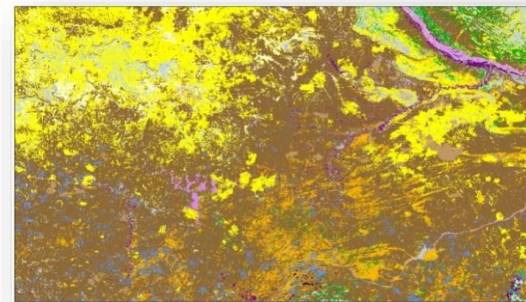
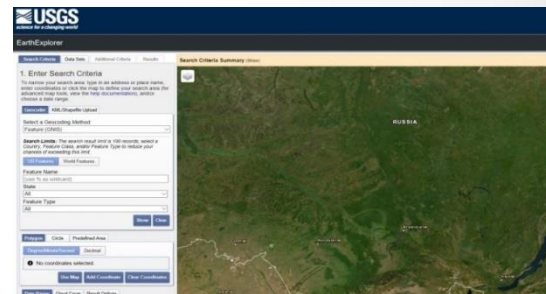
# Исходные данные:

1) Работа выполнена с использованием спутниковых снимков Landsat-8/9 OLI/TIRS (Operational Land Imager/Thermal Infrared Sensor) среднего пространственного разрешения (15–100 м) из каталога United States Geological Survey (USGS, <https://earthexplorer.usgs.gov>);

2) Банк данных пожаров: предоставлен институтом леса им. В.Н. Сукачева СО РАН. Временной интервал: 1996–2024 гг.; Объем данных:  $\sim 3 \times 10^6$  записей;

3) Карта древостоев Сибири по материалам спутниковой системы Vega-Pro (Луян Е.А., ИКИ РАН, г. Москва).

4) Категории сомкнутости мерзлоты на территории Сибири по материалам каталога National Snow and Ice Data Center (<https://nsidc.org/data/ggd318>)



# Расчет спектральных индексов, *BT, LST, ΔLST:*

$$BT = K2 / \ln[(K1 / L\lambda) + 1] \quad (1)$$

*BT* – brightness temperature (яркостная температура)

*Lλ* – Спектр излучения (Watts/(m<sup>2</sup>×srad×μm))

*K1* – Константа термического преобразования для конкретной полосы из метаданных

*K2* – Константа термического преобразования для конкретной полосы из метаданных

Расчет температуры поверхности земли LST:

$$LST = TB / [1 + (\lambda \times TB/c^2) \times \ln(emissivity)] \quad (2)$$

$\lambda$  – wavelength of emitted radiance (для 10 канала константа = 10.8)

$c^2 = h \times c / s = 1.4388 \times 10^{-2} \text{ m K} = 14388 \text{ } \mu\text{m K}$ ;  $h$  = Planck's constant =  $6.626 \times 10^{-34} \text{ J s}$

$s$  = Boltzmann constant =  $1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ ;  $c$  = скорость света =  $2.998 \times 10^8 \text{ m/s}$

*emissivity* – отражающая способность земной поверхности (константа 0.98)

Thermal Band:  
*L8 – 10.60-11.19 мкм*

Анализ амплитуды отклонений значений нарушенных участков от фоновых (%) для «LST», проводился за вегетационный период по формуле:

$$\Delta LST = 100 \times (LST_{цель} - LST_{фон}) / LST_{фон} \quad (3)$$

$LST_{фон}$  – температура земной поверхности на фоновых участках

$LST_{цель}$  – температура земной поверхности на трансформированных участках

# Расчет спектральных индексов, *NBR, dNBR, NDVI, ΔNDVI:*

$$NBR = (NIR - SWIR) / (NIR + SWIR) \quad (4)$$

*NIR* – Ближний ИК (λ=0,845—0,885 мкм)

*SWIR* – Коротковолновой ИК (λ= 2,100—2,300 мкм)

$$dNBR = NBR_{prefire} - NBR_{postfire} \quad (5)$$

*NBR<sub>prefire</sub>* – допожарное изображение

*NBR<sub>postfire</sub>* – послепожарное изображение

Расчет вегетационного индекса «NDVI»:

$$NDVI = float(NIR - Red) / float(NIR + Red) \quad (6)$$

*NIR* – Ближний ИК (λ=0,845—0,885 мкм)

*Red* – Видимый красный (λ=0,630—0,680 мкм)

Анализ отклонений значений нарушенных участков от фоновых (%) для «NDVI», проводился за вегетационный период по формуле:

$$\Delta NDVI = (NDVI_{цель} / NDVI_{фон}) \times 100 \quad (7)$$

*NDVI<sub>фон</sub>* – среднее значение показателя NDVI для фоновой растительности

*NDVI<sub>цель</sub>* – среднее значение показателя NDVI для поврежденной растительности

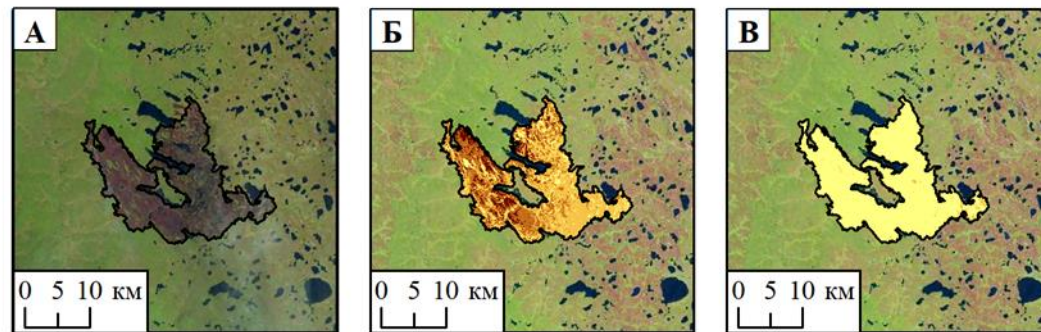


# Примеры вариативности спектральных индексов:

Класс	Диапазон $dNBR$	Характеристика
1	$< 0.099$	Несгоревшее
2	$0.101 \dots 0.439$	Низкий уровень
3	$0.440 \dots 0.659$	Средний уровень
4	$> 0.660$	Высокий уровень



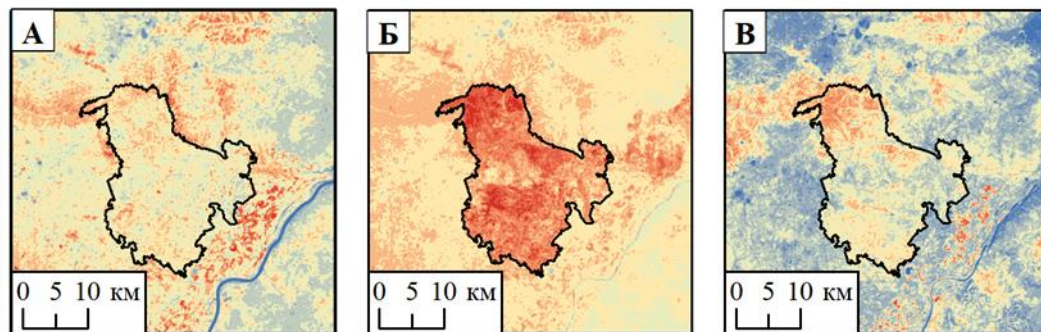
Пороговые значения  $dNBR$  для классификации уровня воздействия пожара на растительный покров.



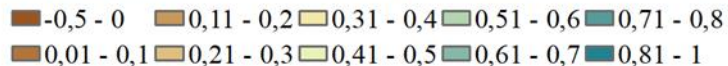
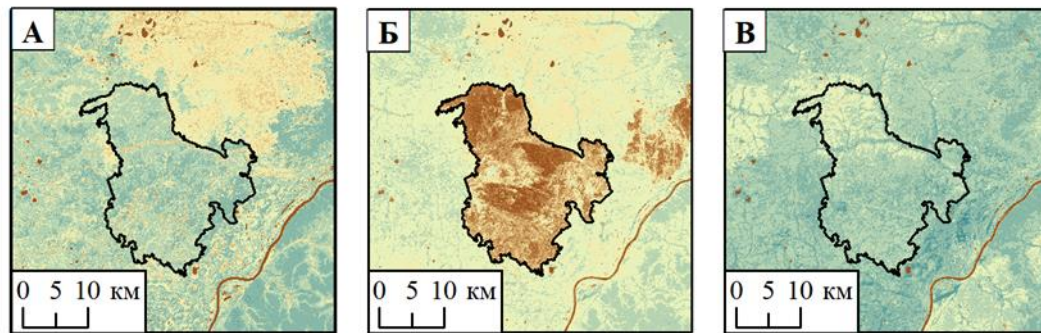
Расчет  $dNBR$  по данным Landsat, А – послепожарный снимок в естественных цветах, Б – в год пожара, В – через 5 лет.



# Примеры вариативности спектральных индексов:



LST после лесного пожара  
по данным Landsat,  
А – до пожара,  
Б – в год пожара,  
В – через 6 лет.



NDVI после лесного пожара  
по данным Landsat,  
А – до пожара,  
Б – в год пожара,  
В – через 6 лет.

# Результаты.

## Классификация территорий. (NDVI)

Таблица 2. Средние значения **NDVI** по 4 классам индекса **dNBR** на послепожарных участках с учетом начальной степени пожарного воздействия и типа сомкнутости мерзлоты

Средние значения NDVI								
Мерзлота	Классы dNBR							
	1	2	3	4	1	2	3	4
	$\Delta NDVI_{\text{ср}}$				$\Delta NDVI_{\text{макс}}$			
<i>Сплошная</i>	45	34	38	45	<b>71</b>	<b>64</b>	<b>71</b>	92
<i>Прерывистая</i>	80	61	52	46	93	89	86	87
<i>Островная</i>	70	52	40	35	98	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>
<i>Редкоостровная</i>	77	68	63	56	96	93	91	88

# Результаты. Сценарии $\Delta NDVI$

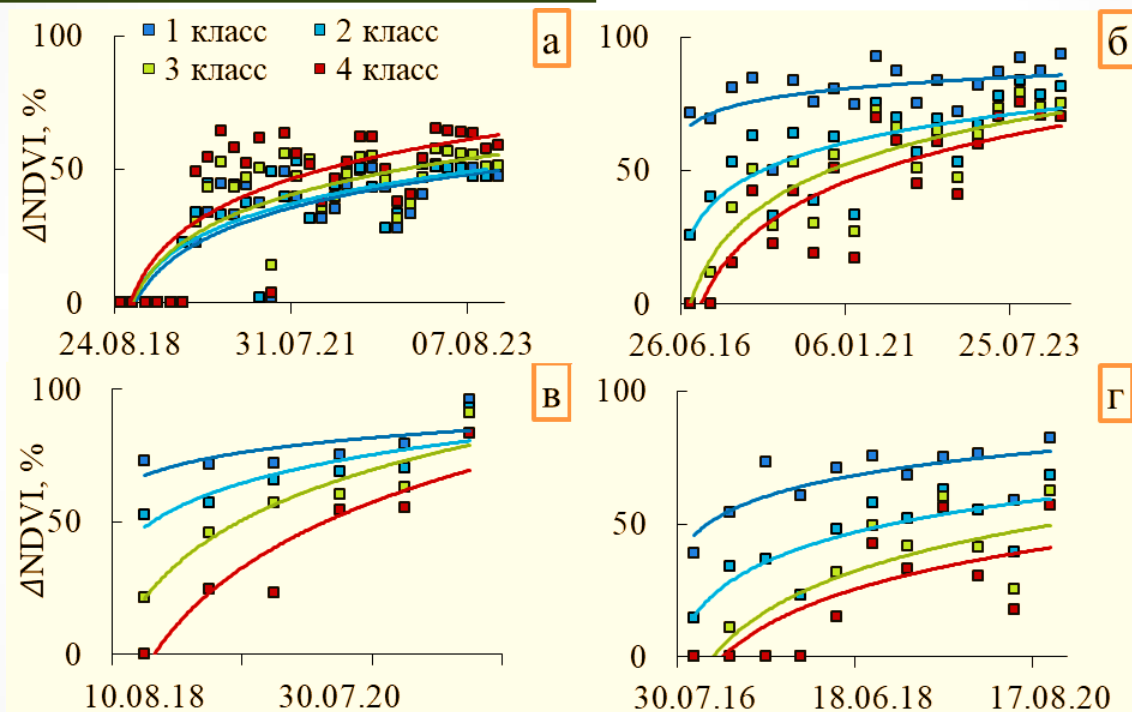


Рис. 1. Аппроксимация многолетней динамики  $\Delta NDVI$  с привязкой к классам пожарного воздействия (по dNBR) на послепожарных участках в условиях 4 вариантов мерзлоты:

а – сплошная мерзлота, б – прерывистая, в – редкоостровная, г – островная

# Результаты.

## Классификация территорий

Таблица 3. Средние значения температурной аномалии на послепожарных участках с учетом начальной степени пожарного воздействия и типа сомкнутости мерзлоты

Средние значения $\Delta LST$								
Мерзлота	Классы dNBR							
	1	2	3	4	1	2	3	4
	$\Delta LST_{\text{ср}}$				$\Delta LST_{\text{макс}}$			
<i>Сплошная</i>	8,4	<b>19,6</b>	<b>16,8</b>	<b>14,8</b>	<b>53,2</b>	<b>60,8</b>	<b>59,4</b>	<b>54,1</b>
<i>Прерывистая</i>	5,8	10,4	15,4	19,3	33,7	41,5	44,7	<b>47,6</b>
<i>Редкоостровная</i>	6,3	10,8	16,6	23,3	36,7	39,3	40,8	43,4
<i>Островная</i>	8,3	14,1	20,3	24,6	36,6	42,1	46,9	<b>49,6</b>

Максимальный уровень аномалии  $\Delta LST$  непосредственно после пожарного воздействия зафиксирован для сплошной мерзлоты ~85%, значения которых снижались в условиях прерывистой (~75%), островной (68%) и редкоостровной (64%) мерзлоты.

# Результаты. Сценарии $\Delta LST$

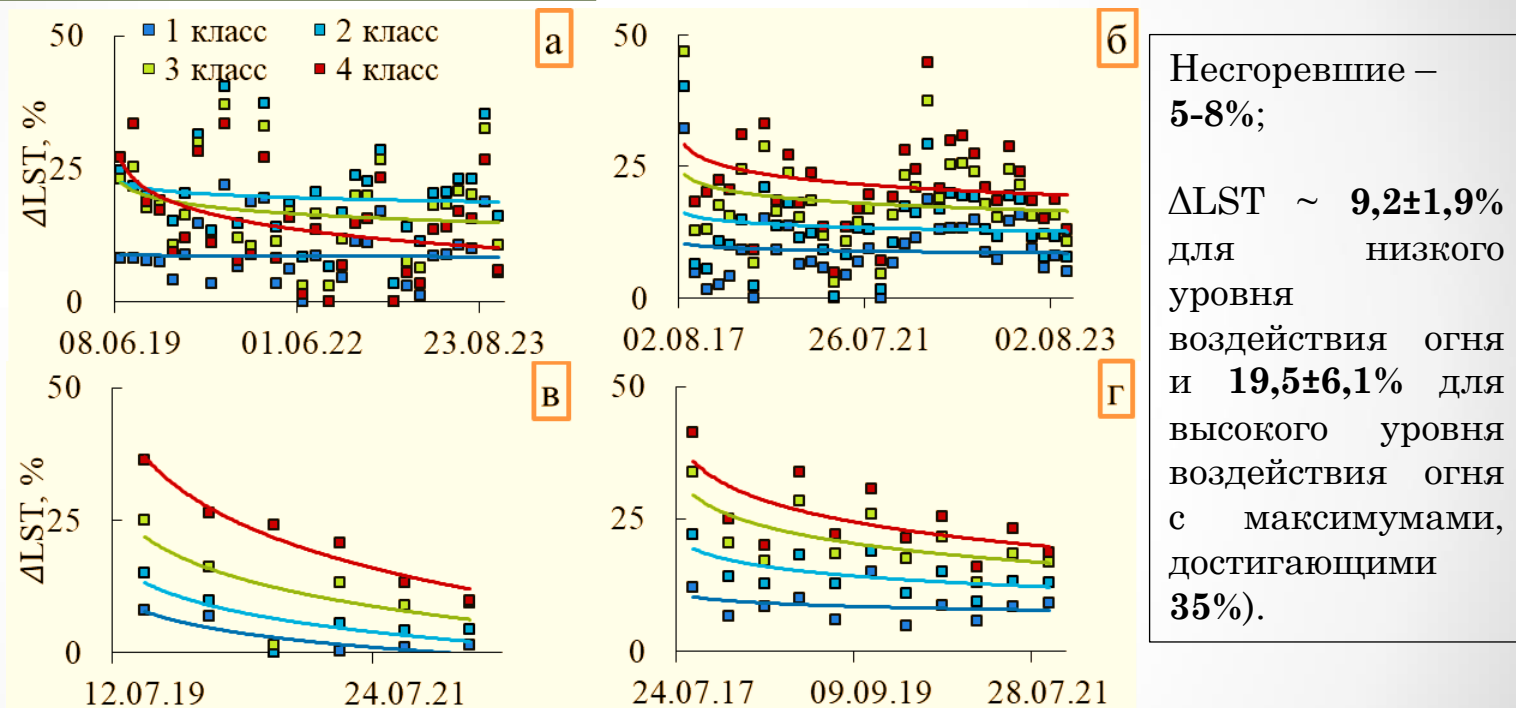


Рис. 2. Аппроксимация многолетней динамики  $\Delta NDVI$  с привязкой к классам пожарного воздействия (по dNBR) на послепожарных участках в условиях 4 вариантов мерзлоты:

а – сплошная мерзлота, б – прерывистая, в – редкоостровная, г – островная

# Заключение

---

Послепожарная динамика рассмотренных спектральных индексов может быть аппроксимирована семейством логарифмических функций, которые отражают как начальные условия (уровень пожарного воздействия), так и внешние условия – различия лесорастительных условий для вариантов распространения мерзлоты. Достоверность выбранных наборов функции в нашем случае составляла не ниже  $R^2=0,63$  для признака  $\Delta NDVI$  и не ниже  $R^2=0,33$  для тепловой аномалии по  $\Delta LST$  при заданном уровне значимости 0,95.

Показательно, что сценарии динамики аномалии  $\Delta NDVI$  и  $\Delta LST$  значительно меняются при переходе от условий распространения сплошной мерзлоты к территории прерывистой и островной. Можно предполагать, что в этом проявляются особенности послепожарных сукцессий в лиственничных редколесьях севера с преобладанием лиственницы Гмелина (*Larix gmelinii*) и в зоне доминирования лиственницы сибирской (*Larix sibirica*) с примесью темнохвойных пород, что может быть обозначено дополнительным признаком при решении с использованием спутниковой съемки данного класса задач.

**Спасибо за внимание!**

