ДВАДЦАТЬ ЧЕТВЕРТАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
"СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ
ИЗ КОСМОСА"
(Методы и алгоритмы обработки спутниковых данных)

Москва, ИКИ РАН, 9-13 ноября 2026 г.

Выбор методов анализа спутниковых данных для картографирования последствий пожаров в нелесных экосистемах

Феоктистова Н.В[1]., Чернова В.А[1]., Мурынин А.Б[2].

(1) Научно-исследовательский институт аэрокосмического мониторинга «АЭРОКОСМОС»
(2) ФИЦ ИУ РАН

Россия, г. Москва, Гороховский пер., д.4, 105064
Тел.: 632-16-54, тел./факс: 632-11-78; E-mail: office@aerocosmos.info

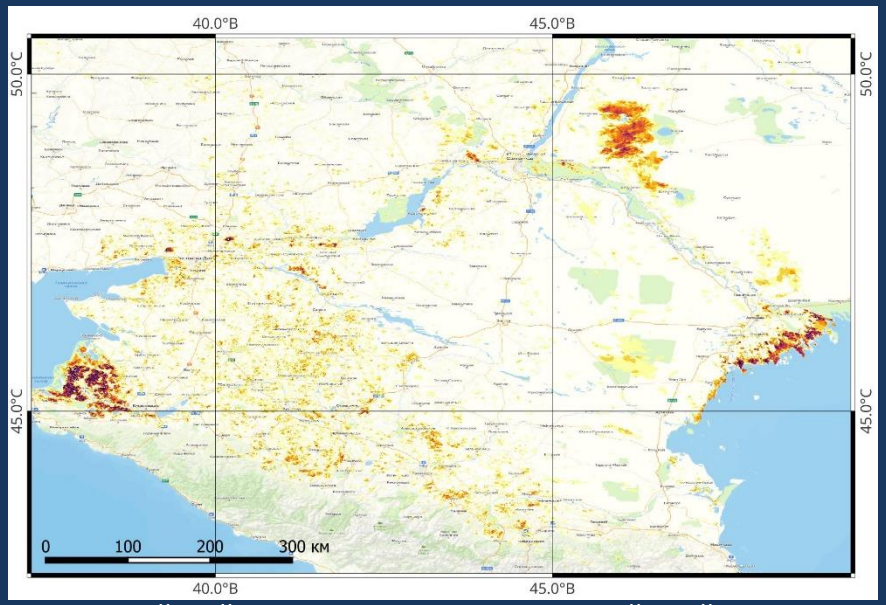
ВВЕДЕНИЕ

Современные системы дистанционного зондирования и методы обработки спутниковых данных позволяют получать непрерывные оценки площадей повреждения лесов пожарами. Оценки площадей природных пожаров, осуществляемые по спутниковым данным в различных исследованиях, могут значительно отличаться друг от друга. Это связано с тем, что они зависят от используемых средств дистанционного зондирования, методов и алгоритмов оценки выгоревших площадей, надежности информации о типах растительного покрова (Швиденко, Щепащенко, 2013). Глобальные спутниковые продукты о выгоревших площадях характеризуются низким пространственным разрешением, что приводит к пропуску малых выгоревших площадей и недооценке площадей природных пожаров с неоднородной структурой, обусловленной сложными режимами горения (Laris, 2005; Boschetti et al., 2016).

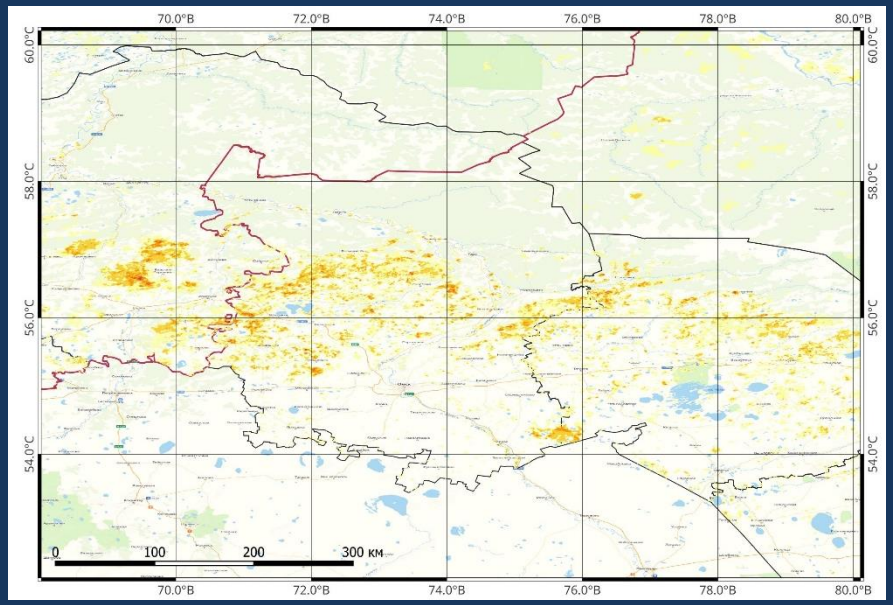
Многие исследователи отмечают худшую точность определения площадей участков, выгоравших при природных пожарах для сельскохозяйственных земель и травянисто-луговой растительности, а также сложность их картографирования (Матвеев, Барталев, 2025, Ostroukhov et al., 2022, Бондур и др., 2026; Кащницкий, 2022; Palomino, Anaya, 2012 и др.). Эти трудности связаны с короткой продолжительностью пожаров, быстрым восстановлением растительного покрова в весенний период, малой площадью горения, наличием облачности и особенностью алгоритмов детектирования гарей (Матвеев и др., 2025). Это приводит к сильной недооценке площадей нелесных пожаров и вызванных ими объемов эмиссий климатически активных газов (Ostroukhov et al., 2022).

Из-за высокой частоты возгораний и больших площадей, выгорающих ежегодно, суммарные выбросы углерода от пожаров в луговых и лугово-болотных экосистемах сопоставимы с ежегодными эмиссиями от пожаров на лесных территориях (Ostroukhov et al., 2022).

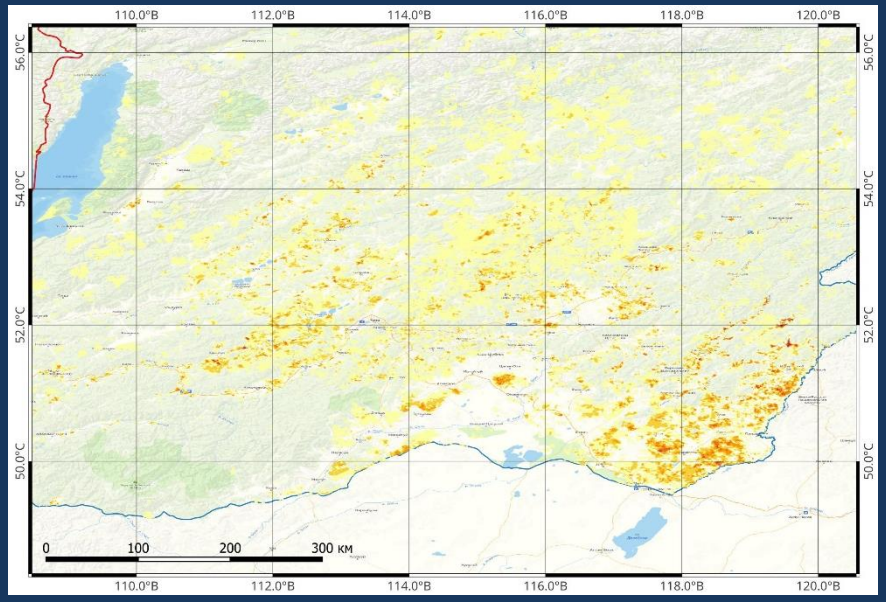
РЕГИОНЫ С ВЫСОКОЙ ПОВТОРЯЕМОСТЬЮ ЛУГОВЫХ, СТЕПНЫХ И С/Х ПОЖАРОВ (по данным VNP64)



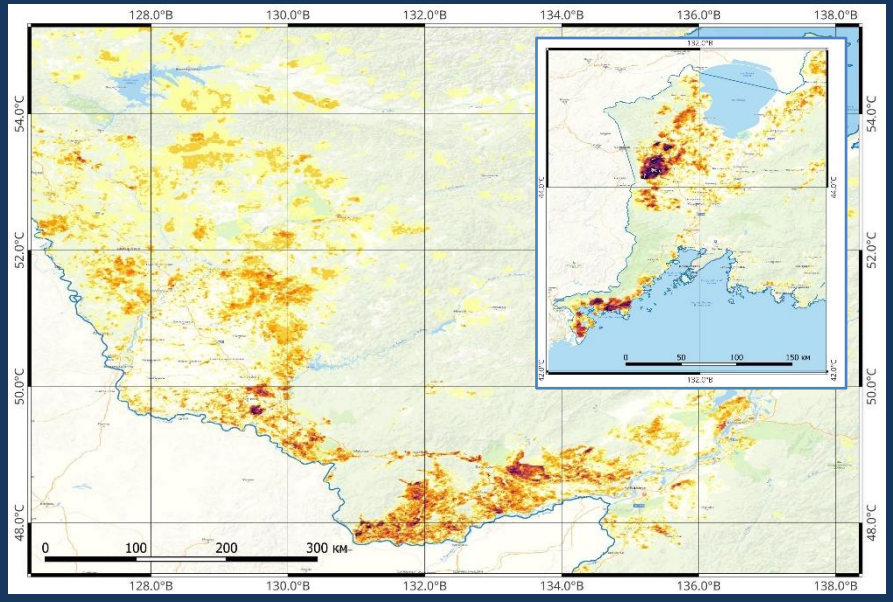
Юг Европейской части России: Краснодарский край, Волгоградская и астраханская области. Оренбургская обл.



Юг Сибири: Тюменская, Омская, Новосибирская области



Дальний Восток: Забайкальский край



Дальний Восток: Амурская область, ЕАО, Хабаровский и Приморский край

Обзор методов картографирования луговых и степных пожаров

Для оценки площадей гарей в нелесных экосистемах многие авторы используют данные среднего пространственного разрешения Landsat, которые позволяют с большей точностью картографировать гари по сравнению со спутниковыми данными низкого разрешения (MCD64, VNP64, FireCCI51).

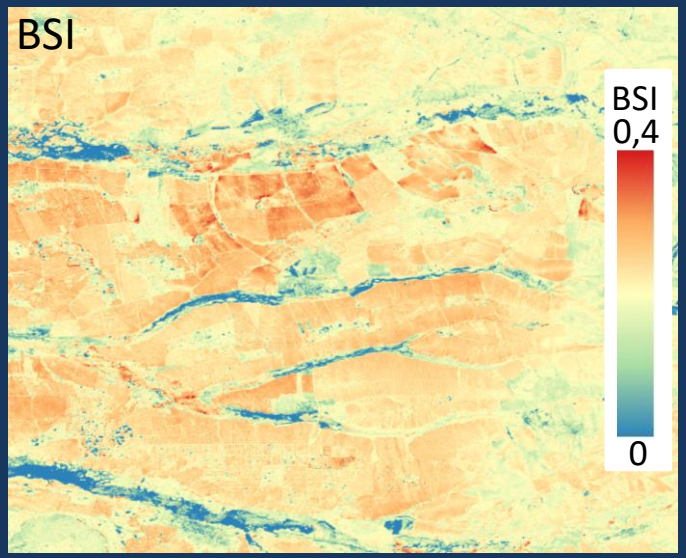
1. Ostroukhov, A.; Klimina, E.; Kuptsova, V.; Naito, D. Estimating Long-Term Average Carbon Emissions from Fires in Non-Forest Ecosystems in the Temperate Belt. Remote Sens. 2022, 14, 1197. https://doi.org/10.3390/rs14051197
2. Шинкаренко С.С., Дорошенко В.В., Берденгалиева А. Н. Динамика площади гарей в зональных ландшафтах юго-востока европейской части России // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2022. Т. 86. № 1. С. 122-133.
3. Шинкаренко С.С., Берденгалиева А.Н. Анализ многолетней динамики степных пожаров в Волгоградской области // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 2. С. 98-110.
4. Chen, L.; Wei, B.; Jia, X.; Liu, M.; Zhao, Y. Burned Area Mapping and Fire Severity Assessment of Forest–Grassland Ecosystems Using Time-Series Landsat Imagery (1985–2023): A Case Study of Daxing'anling Region, China. Fire 2025, 8, 337. https://doi.org/10.3390/fire8090337

Спутники

- Landsat 5,7,8 — 30 м, картографирование гарей за многолетний период [1, 2, 3, 4]
- Sentinel-2 MSI — 10 м, валидация результатов Landsat с пространственным разрешением [4,]
- VIIRS, MODIS — 375 -1000 м, тепловые аномалии [1, 2, 3, 4]
- GABAM — Сравнение площадей гарей за за многолетний период [1, 4]
- MODIS MCD64A1 — 500 м, сравнение результатов картирования выгоревших площадей, [4]
- FireCCI51 — Сравнение результатов картирования выгоревших площадей [4]

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ИНДЕКСОВ ДЛЯ КАРТОГРАФИРОВАНИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ПОЖАРОВ С ДАННЫМИ СРЕДНЕГО ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ



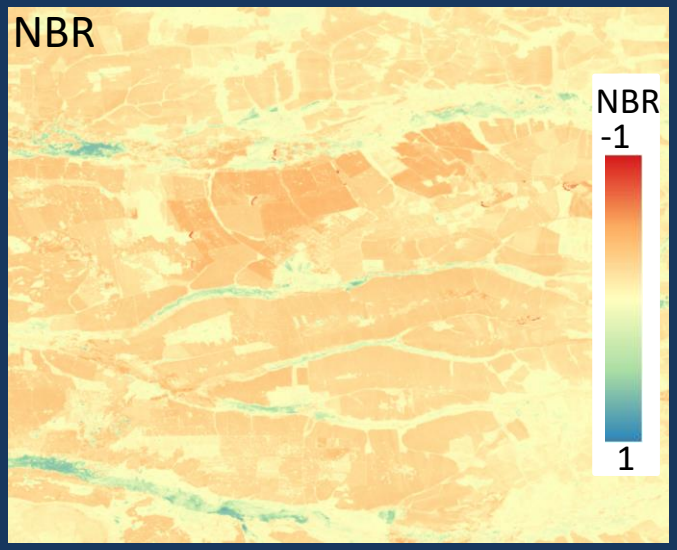


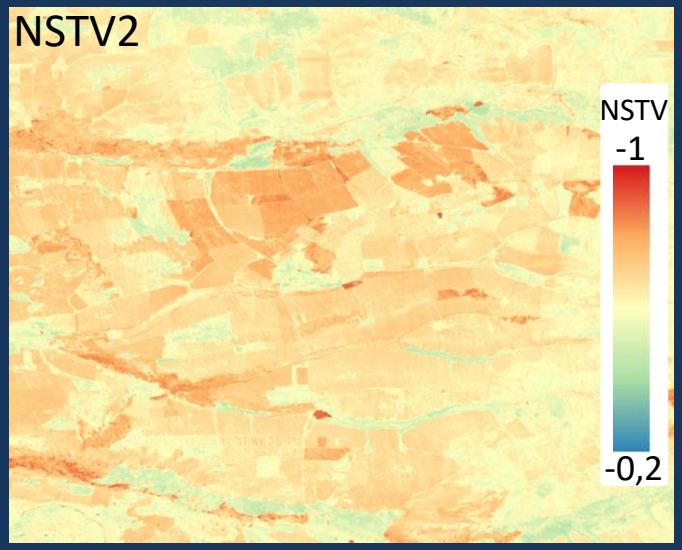
Индекс голой почвы (Bare Soil Index, BSI)

$$BSI = \frac{(SWIR1 + Red) - (NIR + Blue)}{(SWIR1 + Red) + (NIR + Blue)}$$

Нормализованный индекс гарей (Normalized Burn Ratio, NBR)

$$NBR = \frac{NIR - SWIR2}{NIR + SWIR2}$$





Нормализованный тепловой индекс гарей 2 (NIR-SWIR-Temperature Version 2)

$$NSTV2 = \frac{NIR - (SWIR2 + T))}{(NIR + (SWIR2 + T))}$$

Индекс NBR не позволяет надежно разделить гари на пашнях и распаханные поля.

Landsat 8 10.05.2025, с. Рогозовка, Амурская обл.

ОБЗОР МЕТОДОВ ВАЛИДАЦИИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ПОЖАРОВ

Проблема автоматизированного детектирования лугово-степных пожаров и сельскохозяйственных палов связана с выявлением ложноположительных участков (распаханных полей), которые имеют схожие спектральные характеристики, что и свежие гари. (Walker K., 2024; Kumar et al., 2025)

Список литературы

1. Walker K. *Overcoming Common Pitfalls to Improve the Accuracy of Crop Residue Burning Measurement Based on Remote Sensing Data*
2. van Dijk D., Shoaie S., van Leeuwen T., Veraverbeke S. *Spectral signature analysis of false positive burned area detection from agricultural harvests using Sentinel-2 data*
3. Kumar S., Ghosh S. K., Pateriya B. *Development of new spectral indices for mapping of crop residue burning using satellite remote sensing*
4. Walker K., Moscona B., Jack K., Jayachandran S., Kala N., Pande R., Xue J., Burke M. *Detecting Crop Burning in India using Satellite Data*. 2022.
5. Sarathamani A. P., Kumar A. *Synergistic contextual information and individual sample as mean training approach: paddy stubble burning mapping*
6. Deshpande M. V., Pillai D., Jain M. *Agricultural burned area detection using an integrated approach utilizing multi spectral instrument based fire and vegetation indices from Sentinel-2 satellite*

Спутники

- PlanetScope — 3 м [1, 4, 5, 6]
- Sentinel-2 — 20 м [1, 3, 4, 5]
- **Sentinel-3** (прибор OLCI) в комбинации с тепловыми аномалиями от MODIS [3]
- Landsat — 30 м [1]
- Дополнительно MODIS и VIIRS [1]
- **MCD64A1 Terra и Aqua** (инструмент MODIS) [3]
- **C3SBA10** Copernicus Climate Change Service (C3S) [3]
- **Sentinel-2 MSI**. Вспомогательно использовалась NLCD 2016 для определения сельхозземель. [2, 6]
- **MODIS Terra MOD14A1 + Aqua MYD14A1 Active fire** [6]
- FireCCI51 [6]

КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ ВАЛИДАЦИИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ПОЖАРОВ

Спектральные индексы

SCI, NDVI, BAIS2, STI, NBR, NBR2,MIRBI,BAI,NDSVI, RBR(NBR2) , TBI

Спектрально – временные изменения

- Абсолютное изменение спектральных показателей [2]

$$|\Delta X| = |X_{pre} - X_{post}|$$

- Оценка временной динамики до и после пожара [5]
- Анализ мощности изменения индексов во времени [1][4]

Оценка спектральной разделимости

- **Mean spectral plots** - графики средних спектральных характеристик [4]
- **Spectral Discrimination Index (SDI)** - Индекс спектральной различимости [3] [4]
- **Jeffries–Matusita distance (JM)**. [3] [4]
- **M-statistic** [1][2];

Методы классификации

- **PCM-S — contextual Possibilistic c-Means:** нечёткая классификация с учётом соседних пикселей [5]
- **ISM — Individual Sample as Mean:** каждый обучающий образец рассматривается как отдельный центр, чтобы сохранить внутриклассовую неоднородность[5]
- Ручное дешифрирование гарей на PlanetScope/Sentinel-2/Landsat; . [1, 6] Сравнение горелых с вспаханными и не вспаханными;
- Random Forest. [4]

Для оценки: **Mean Membership Difference (MMD)** - **Leave-One-Out Cross-Validation** - Перекрёстная проверка с исключением одного поля [4] классификация отличия лучшего класса от остальных, дисперсия, энтропия, F-score - общая оценка качества классификации, объединяющая точность и полноту.

- **Multi-index thresholding** - многоиндексная пороговая классификация [3]
- **Support Vector Machine (SVM)** - Метод опорных векторов [3]

ИНДЕКСЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ КАК ПРИЗНАКИ ДЛЯ ВАЛИДАЦИИ СЕЛЬСКО-ХОЗЯЙСТВЕННЫХ ПОЖАРОВ

(Normalized Difference Vegetation Index)
Нормализированный разностный вегетационный индекс

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

(Normalized Burn Ratio)
Нормализированный индекс гари

$$NBR = \frac{NIR - SWIR2}{NIR + SWIR2}$$

(Burned Area Index for Sentinel-2)
Индекс выгоревших территории для Sentinel-2

$$BAIS2 = \left(1 - \sqrt{\frac{RE2 \cdot RE3 \cdot NIR_n}{RED}}\right)\left(\frac{SWIR2 - NIR_n}{\sqrt{SWIR2 + NIR_n}} + 1\right)$$

(Normalized Burn Ratio 2)
Модифицированный нормализованный индекс гари

$$NBR2 = \frac{SWIR1 - SWIR2}{SWIR1 + SWIR2}$$

(Simple Tillage Index)
Индекс обработки почвы

$$STI = \frac{SWIR1}{SWIR2}$$

(Mid-Infrared Burn Index)
Двухспектральный среднеинфракрасный индекс гари

$$MIRBI = 10SWIR2 - 9.8SWIR1 + 2$$

(Burned Area Index)
Индекс выгоревших территории

$$BAI = \frac{1}{(0.1 - Red)^2 + (0.06 - NIR)^2}$$

(Char Soil Index)
Индекс обугленности почвы

$$CSI = \frac{NIR}{SWIR2}$$

(Relativized Burn Ratio)
Относительный индекс гари

$$RBR(NBR2) = \frac{dNBR2}{NBR2_{pre} + 1.001}$$

(Normalized Difference Senescent Vegetation Index)
Нормализованный индекс увядающей растительности

$$NDSVI = \frac{SWIR1 - Red}{SWIR1 + Red}$$

(Tasseled Cap Brightness, component 1) Индекс яркости преобразования

$$TBI = 0.3510B + 0.3813G + 0.3437R + 0.7196NIR + 0.2396SWIR1 + 0.1949SWIR2$$

Данные исследования: спутник **Sentinel-2 MSI**



26.10.2020



05.11.2020



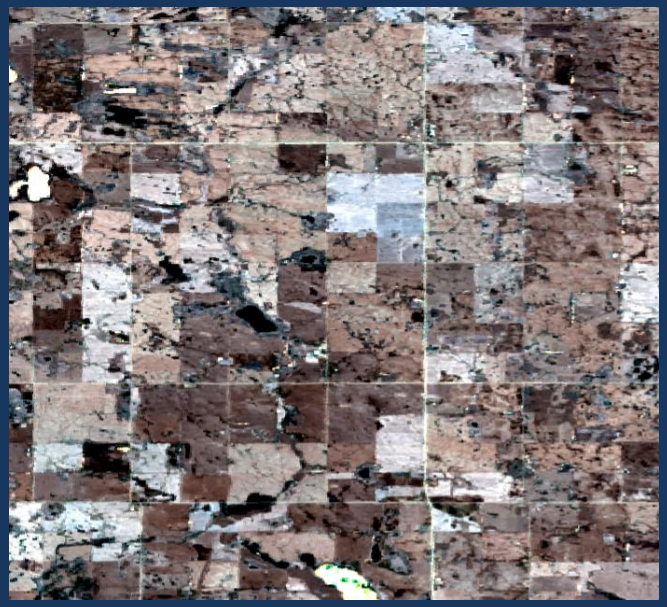
10.11.2020



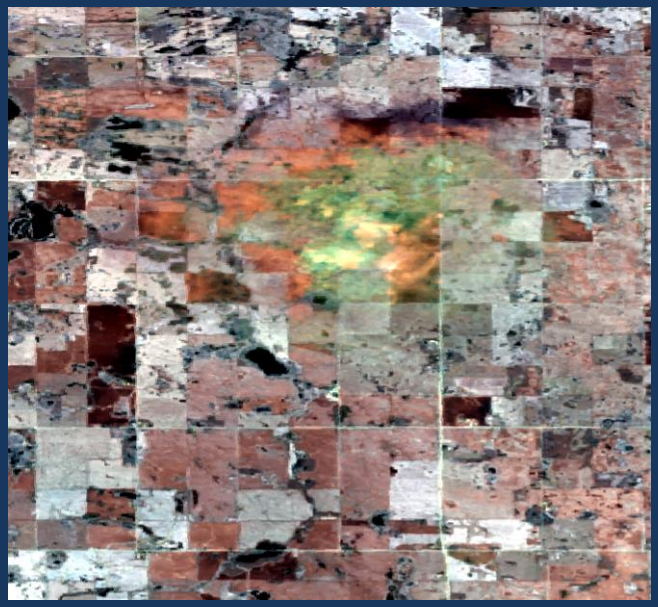
15.11.2020

Отдельные полигоны с/х полей
с подтвержденными датами событий.
Количество вспаханных полигонов : 8
Территория: Россия, Приморский край, село Вадимовка
Период вспашки : 10.11.2020-17.11.2020
Данные: Sentinel-2 MSI

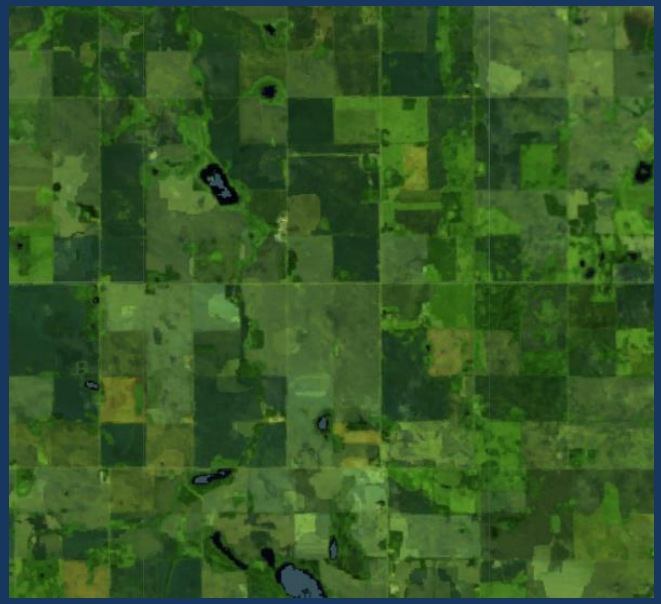
Данные исследования: спутник Sentinel-2 MSI



03.05.2018



10.05.2018



17.06.2018

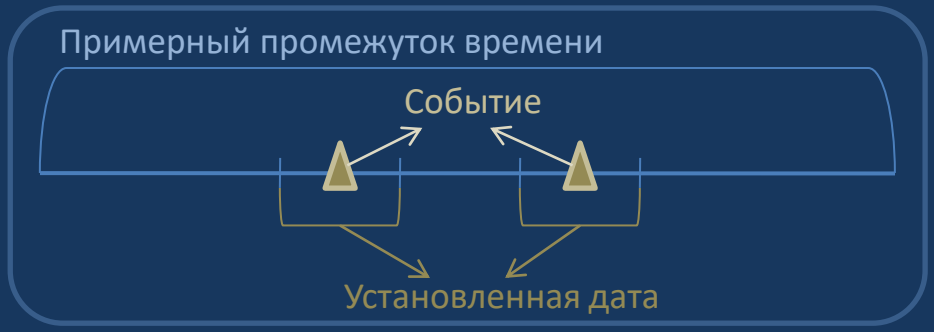


28.06.2018

Отдельные полигоны с/х полей с подтвержденными датами событий.
Количество сожженных полигонов : 16
Территория: Канада, Данбери, провинция Саскачеван
Период горения: 03.05.2018-14.05.2018
Данные: Sentinel-2 MSI

АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЯ АБСОЛЮТНОЙ МЕДИАННОЙ СКОРОСТИ СПЕКТРАЛЬНЫХ ОТКЛИКОВ КАНАЛОВ ГОРЕЛЫХ С/Х ПОЛЕЙ В СРАВНЕНИИ С ВСПАХАННЫМИ С/Х ПОЛЯМИ

Для исследования были использованы следующие методы:
•Экспертное дешифрирование спутниковых изображений Sentinel-2 (сравнение горелых с/х полей с вспаханными);
•Для расчета изменения абсолютной скорости спектральных откликов каналов (для установленной даты и для примерного промежутка времени по отдельности) были использованы формулы (1) (2) (3);



Абсолютная скорость (absolute speed) показывает скорость изменения значения канала. (2)
Знаковая скорость (signed speed) показывает знак значения, в зависимости от того, выросла она или уменьшилась. (1)
Burned median speed (BMS) - медианная скорость горелых/ вспаханных полей. (3)
•Проведены расчёты JM - statistic (4) (5) (6);

Jeffries–Matusita distance показывает величину разделимости изменения скоростей спектральных откликов каналов горелых с/х полей против вспаханных с/х полей и учитывает их пересечение.

$$\text{signed speed} = \frac{X_{\text{post}} - X_{\text{pre}}}{\Delta t} \quad (1)$$

$$\text{absolute speed} = \frac{|X_{\text{post}} - X_{\text{pre}}|}{\Delta t} \quad (2)$$

$$\text{Burned median speed} = \text{median}_i \left(\frac{|X_{\text{post},i} - X_{\text{pre},i}|}{\Delta t_i} \right) \quad (3)$$

•Xpre -Значения спектральных откликов каналов в период перед событием
•Xpost -Значения спектральных откликов каналов после события
•Δ X = Xpre - Xpost – Разница значений
•Δt-Количество дней прошедших между производством снимков

$$s_p^2 = \frac{s_b^2 + s_t^2}{2} \quad (4)$$

$$B = \frac{1}{8} \frac{(\mu_b - \mu_t)^2}{s_p^2} + \frac{1}{2} \ln \left(\frac{s_p^2}{\sqrt{s_b^2 s_t^2}} \right) \quad (5)$$

$$JM = 2 \left(1 - e^{-B}\right) \quad (6)$$

•b – набор значений спектральных откликов каждого канала горелых с/х полей за установленную дату/ примерный промежуток времени
•t - набор значений спектральных откликов каждого канала вспаханных с/х полей за установленную дату/ примерный промежуток времени
•B – среднее расстояние между двумя распределениями
μ_b, μ_t -средняя арифм. скорость спектральных откликов каждого канала b и t
s_b^2, s_t^2 - дисперсия значений скорости спектральных откликов каждого канала b и t
$s_p^2 = (s_b^2 + s_t^2)/2$ - среднее значение дисперсий b + t

АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЯ АБСОЛЮТНОЙ МЕДИАННОЙ СКОРОСТИ СПЕКТРАЛЬНЫХ ОТКЛИКОВ КАНАЛОВ SENTINEL-2 ГОРЕВШИХ С/Х ПОЛЕЙ В СРАВНЕНИИ С ВСПАХАННЫМИ С/Х ПОЛЯМИ

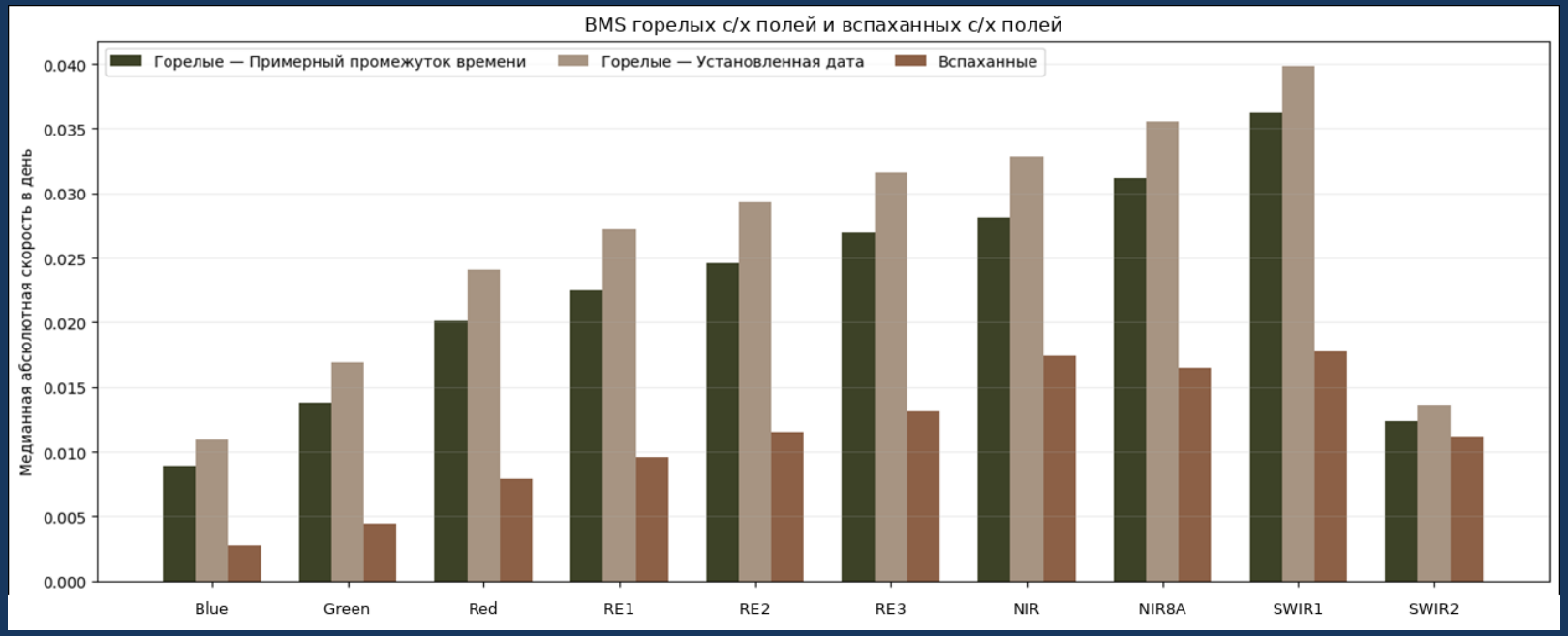


Рисунок 1 – График медианной скорости горелых и вспаханных с/х полей

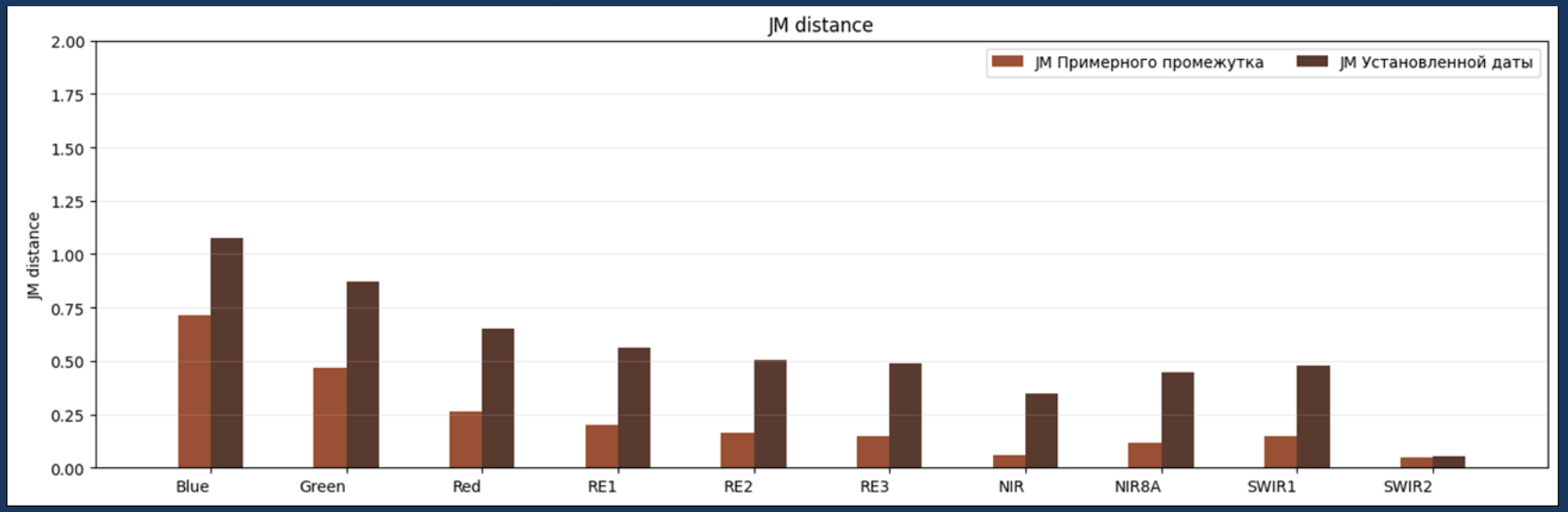


Рисунок 2 – JM distance

ВЫВОДЫ

В настоящей работе были проанализированы актуальные задачи картографирования последствий пожаров в нелесных экосистемах и методы их решения. Подробно рассмотрены методы разделения сельскохозяйственных палов и распаханных полей.

Выбраны основные методы исследования и анализа подходящие для гипотезы отличия абсолютной медианной скорости спектральных откликов каналов горелых с/х полей и вспаханных с/х полей, которая не фигурировала в анализируемой литературе.

К основным методам исследования относились:
- экспертное дешифрирование спутниковых данных, выбор тестовых участков с/х палов и пашен;
- расчет изменения абсолютной скорости спектральных откликов каналов **(BMS)** для двух промежутков времени для оценки точности применяемых временных отрезков;
- расчет **Jeffries–Matusita distance** для выявления величины разделимости изменения скоростей спектральных откликов каналов горелых с/х полей против вспаханных с/х полей.

На основании проведенных расчетов были получены значения **BMS** и **Jeffries–Matusita distance** для всех спектральных каналов (рис 1, 2). Основываясь на рис. 1 можно сделать вывод, что скорость горелых с/х полей в сравнении с вспаханными с/х полями на всех каналах заметно выше, исключая SWIR2, где разница почти незначительна. Но с помощью (рис. 1) определить наилучший показательно-эффективный канал нельзя, для этого анализируем (рис. 2), где наибольшая скорость изменения спектральных откликов каналов горелых с/х полей в сравнении с вспаханными с/х полями, выявлена у каналов Blue, Green, Red, RE1, которые проходят порог значения 0.50, однако лучший результат показал канал Blue со значением 1.10.