

Спектральная разделимость гарей и не повреждённых огнём участков на территории России по данным Landsat-8/9 OLI, Sentinel-2 MSI и NOAA-20 VIIRS

Матвеев А. М., Барталев С. А., Егоров В. А., Миклашевич Т. С.

ИКИ РАН, Отд. «Технологии спутникового мониторинга»
Лаб. «Спутниковый мониторинг наземных экосистем»

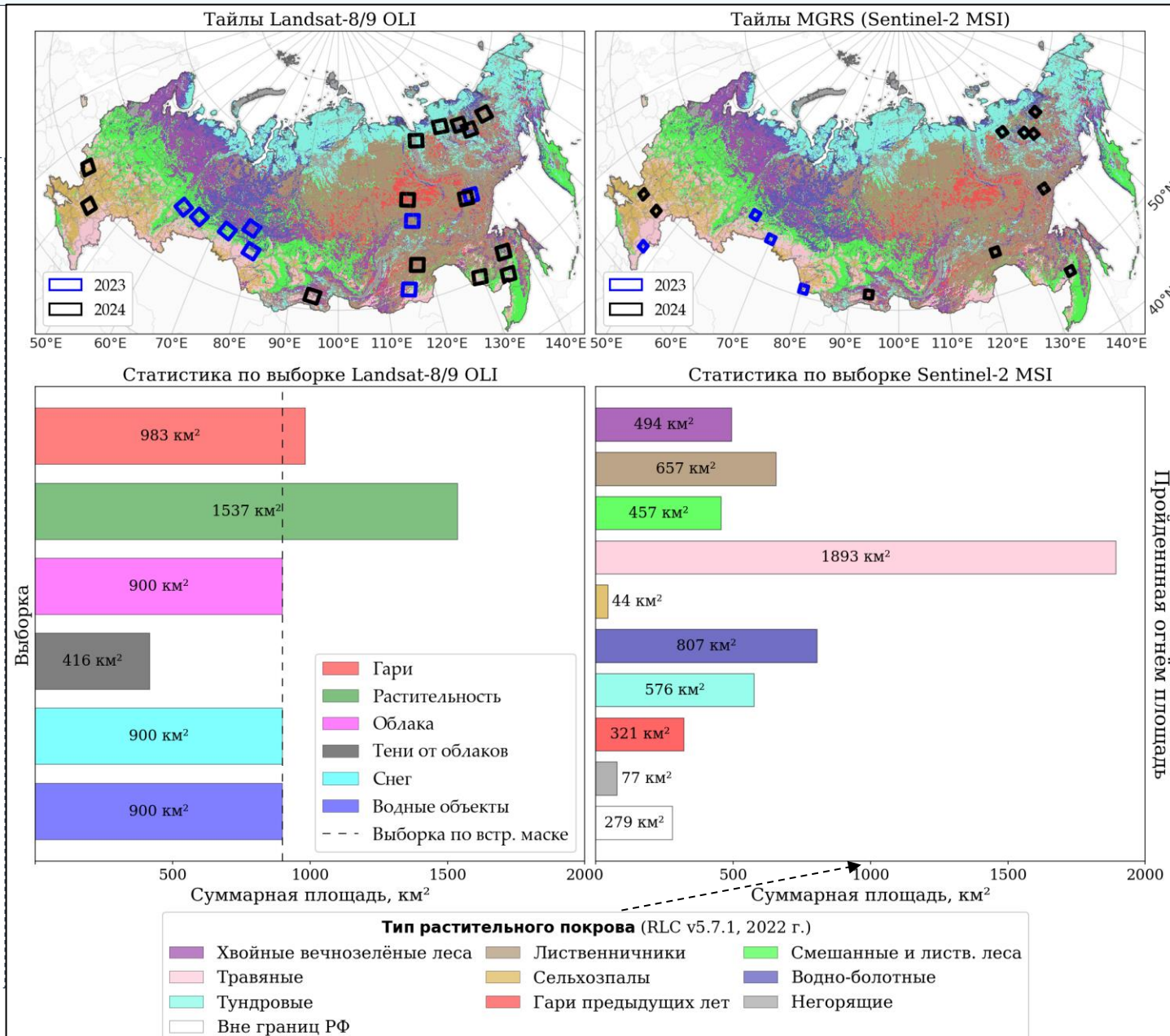
Landsat-8/9 OLI

- «Хотспоты» VIIRS → тайлы WRS с высокой пожарной активностью
- «Вега-лес» → пред- и постпожарная сцены
- Выборки *вручную*: гари, растительность и тени от облаков
- Выборка *по QA-маскам стандартного продукта*: облака, снег/лёд, водные объекты (по 100 тыс. пикс.)

[См. подробнее](#)

Использованные данные

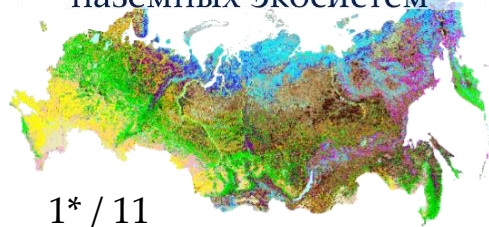
Landsat-8/9 OLI и Sentinel-2 MSI (2023–2024 гг.)



Sentinel-2 MSI

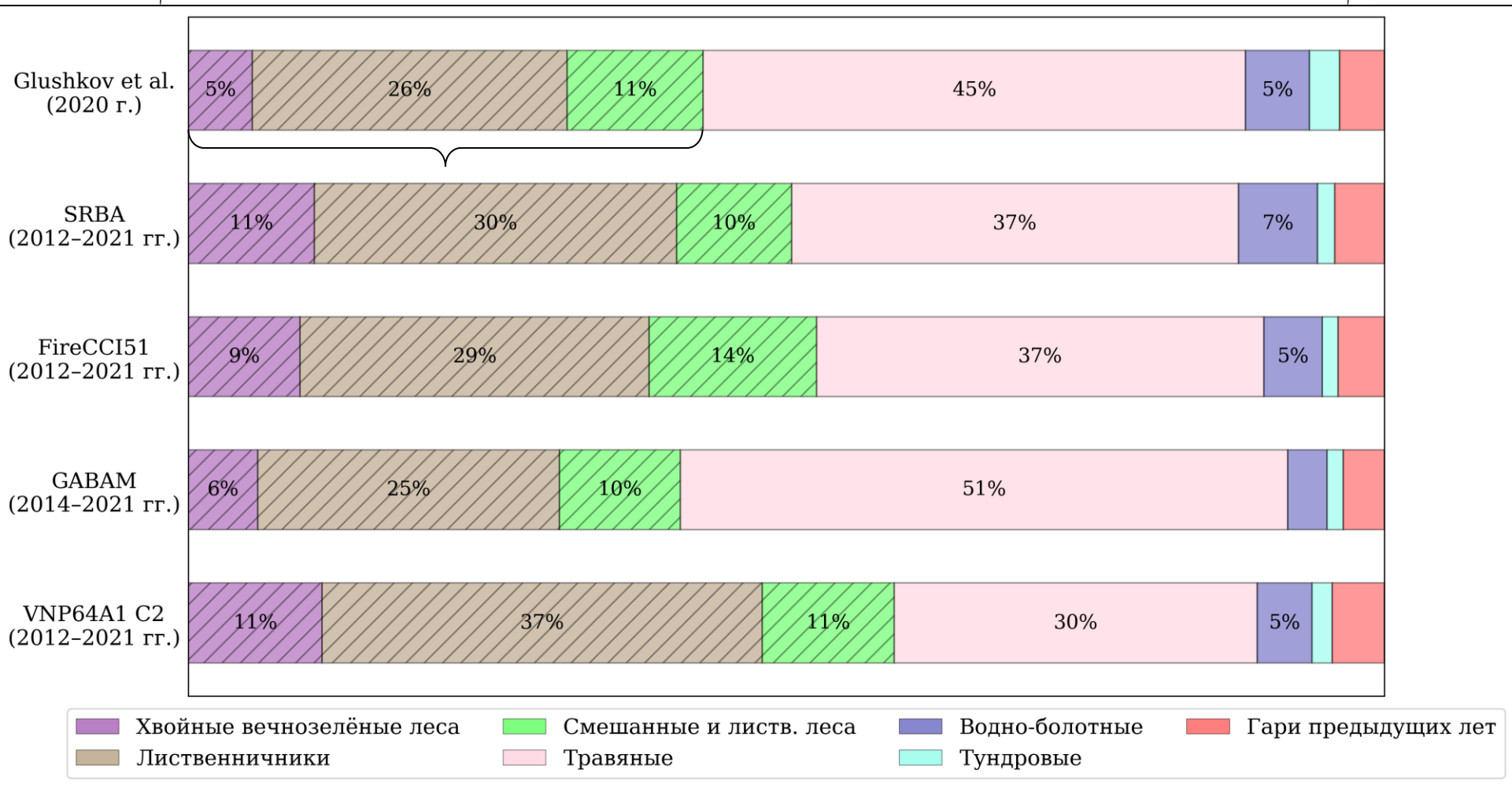
- «Хотспоты» VIIRS → тайлы MGRS с высокой пожарной активностью
- 2–6 сцен (1 предпожар.) → 39 сцен / 14 тайлов
- Классификация сцен по Random Forest → ручная корректировка
- Выборка *по классификации Random Forest* (горевшие / негоревшие) и карте растительного покрова RLC v5.7.1 [Барталев и др., 2016]

[См. подробнее](#)



Пройденная огнём площадь на территории России по типу растительного покрова

- Классификация растительности по карте RLC v5.7.2
- Комментарии по результатам [Матвеев и др., 2025]



! Сельхозпалы *исключены* (низкая точность выделения продуктами гарей [Матвеев и др., 2025; Hall et al., 2021])
 * Усред. за 2012–2021 гг.; выборка [Glushkov et al., 2021] только за 2020 г.; GABAM после запуска Landsat-8 (с 2014 г.)

Спектральные профили гарей и негоревших участков

(ср. [Long et al., 2019, Fig. 2] (GABAM))

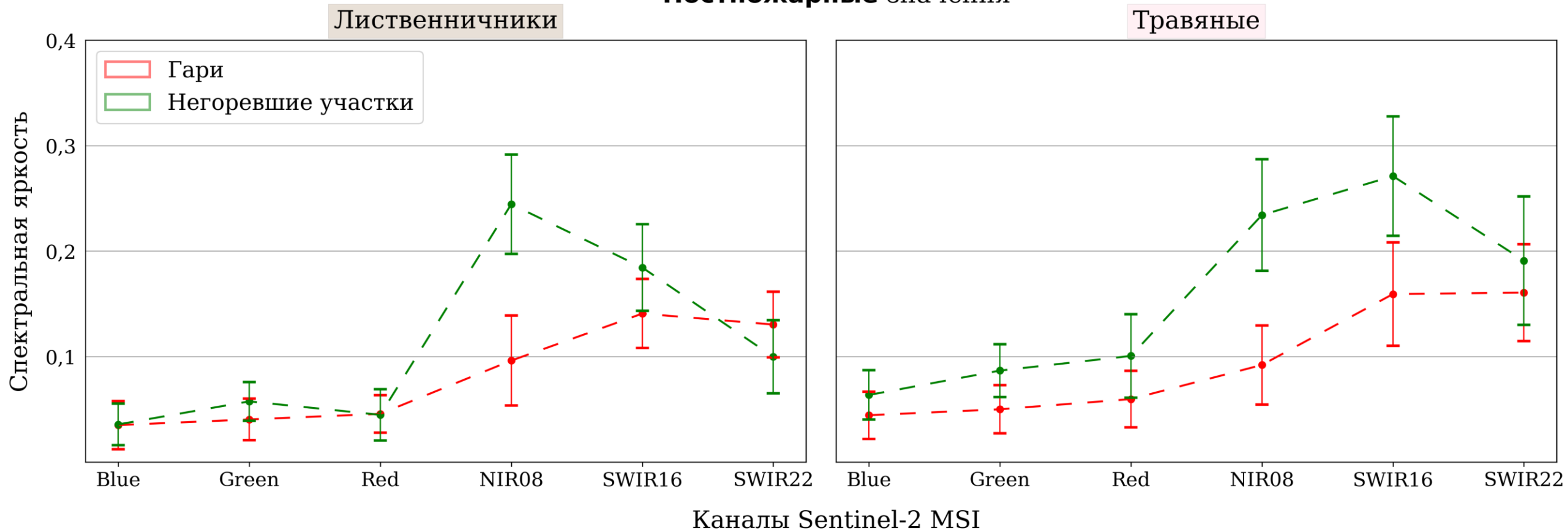


Спектральный профиль гарей

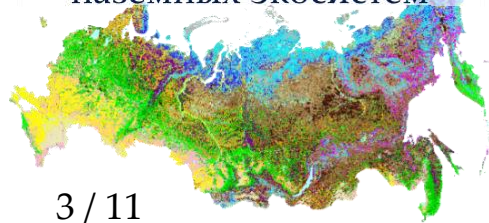
Гари vs негоревшие участки, Sentinel-2 MSI

- Применялись маски
облаков, теней от облаков, водных объектов и снега

Постпожарные значения



- **Гари:** VIS ↓, NIR08 ↓ ↓ ↓, SWIR16 ↓ ↓, SWIR22 ↓ ↑

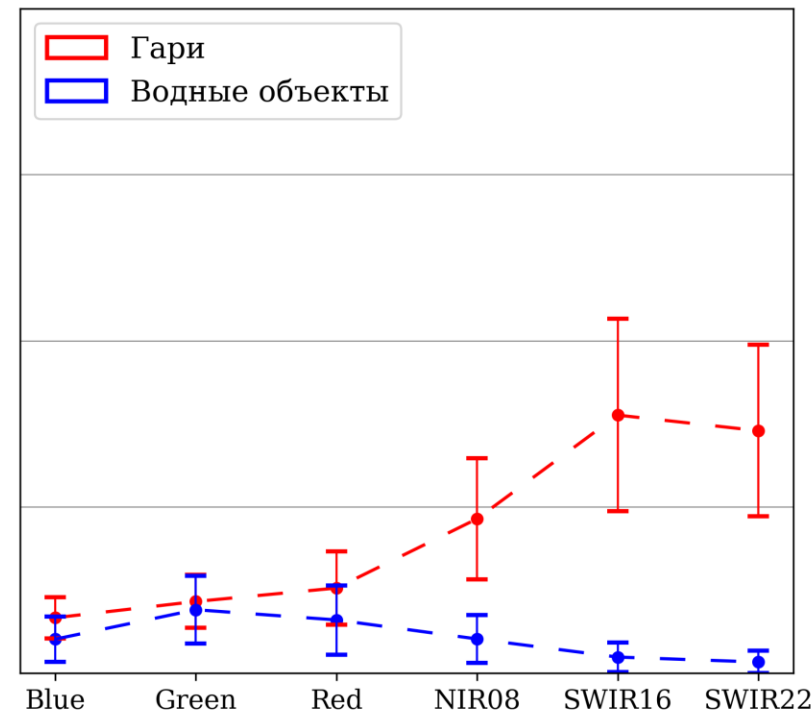
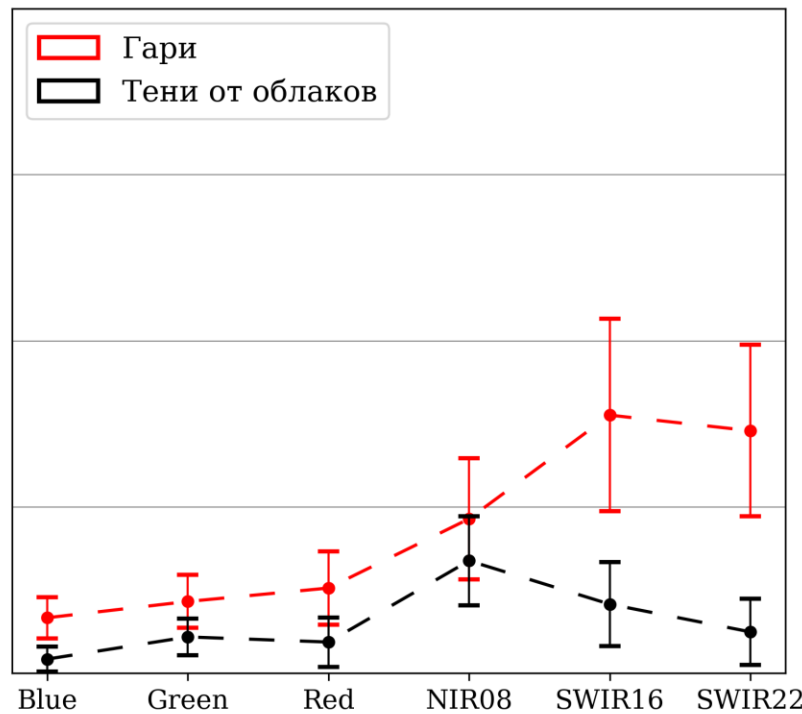
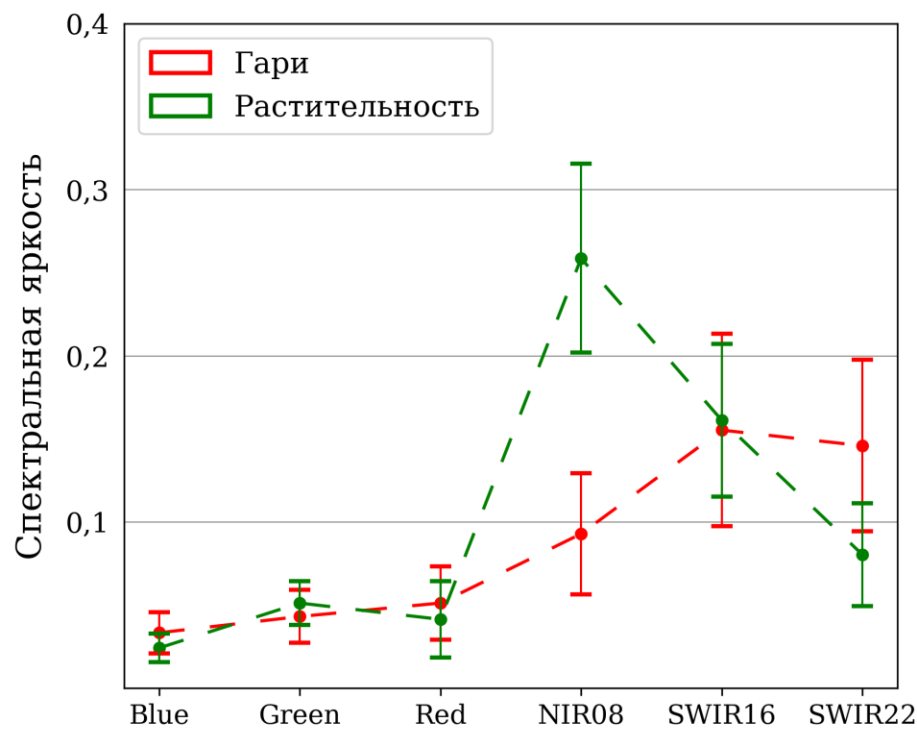


Спектральный профиль гарей

Гари vs другие классы, Landsat-8/9 OLI

- Растительность и тени от облаков выбраны вручную
- Водные объекты по QA-маске стандартного продукта

Постпожарные значения



Каналы Landsat-8/9 OLI

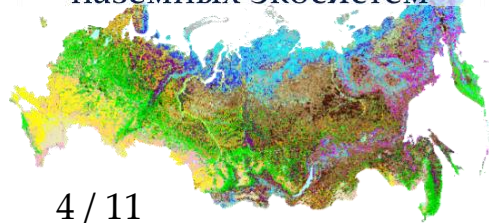
- ! **Гари** — высокая степень повреждения
- ! **Растительность** — активно вегетирующая, не усыхающая и ненарушенная
- ! Тени от облаков — над негоревшими участками

Спектральная разделимость гарей и негоревших участков

(ср. [Украинский, 2013; Oliva et al., 2011; Pereira, 1999; Liu et al., 2023; van Dijk et al., 2021])

$$Separability (спектр.) = \frac{|VI_{burnt} - VI_{unburnt}|}{\sigma_{burnt} + \sigma_{unburnt}},$$

где VI — среднее значение вегетационного индекса по выборке, σ — стандартное отклонение VI [Kaufman, Remer, 1994]



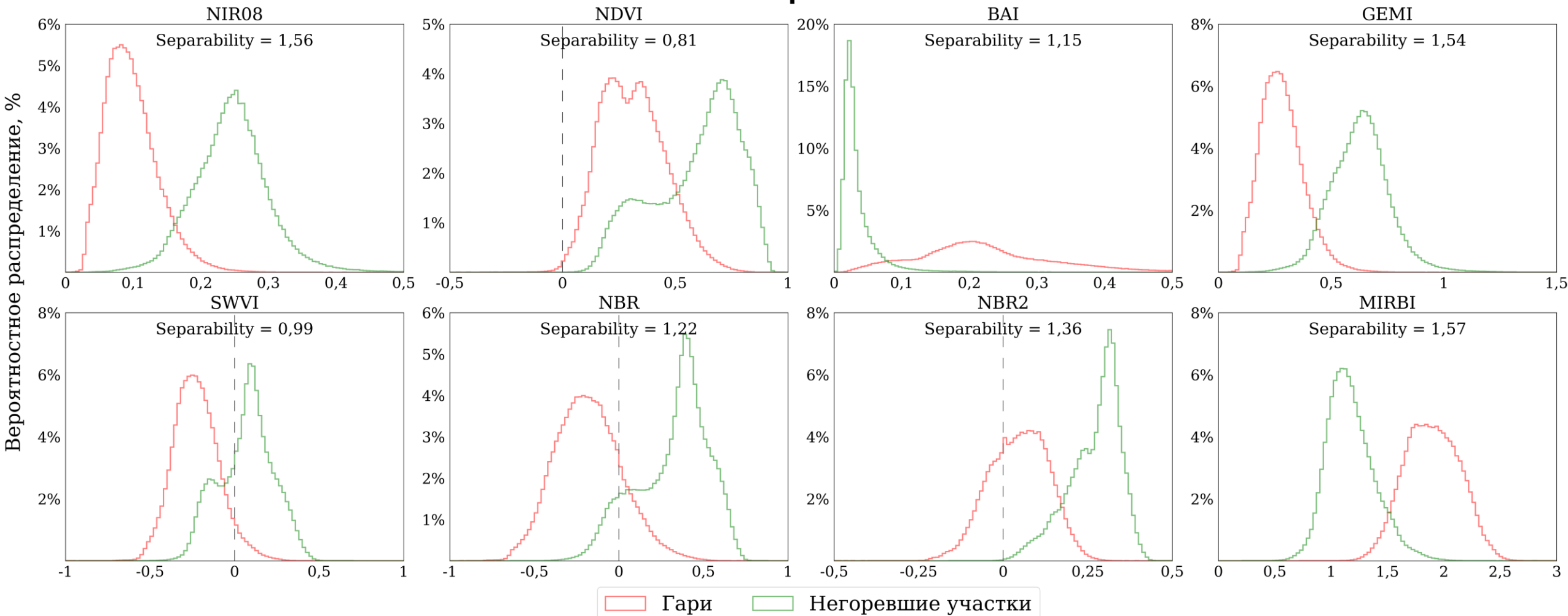
4 / 11

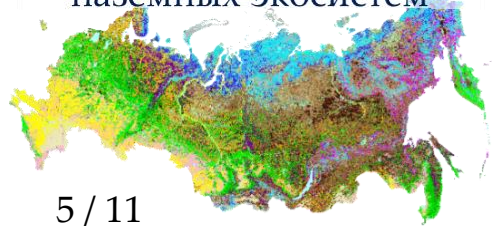
Спектральная разделимость гарей

Гари vs негоревшие участки, Sentinel-2 MSI

- Выборка по 100 000 пикс. на 7 типов растительности
- 8 каналов/индексов, используемых для выделения гарей

Постпожарные значения

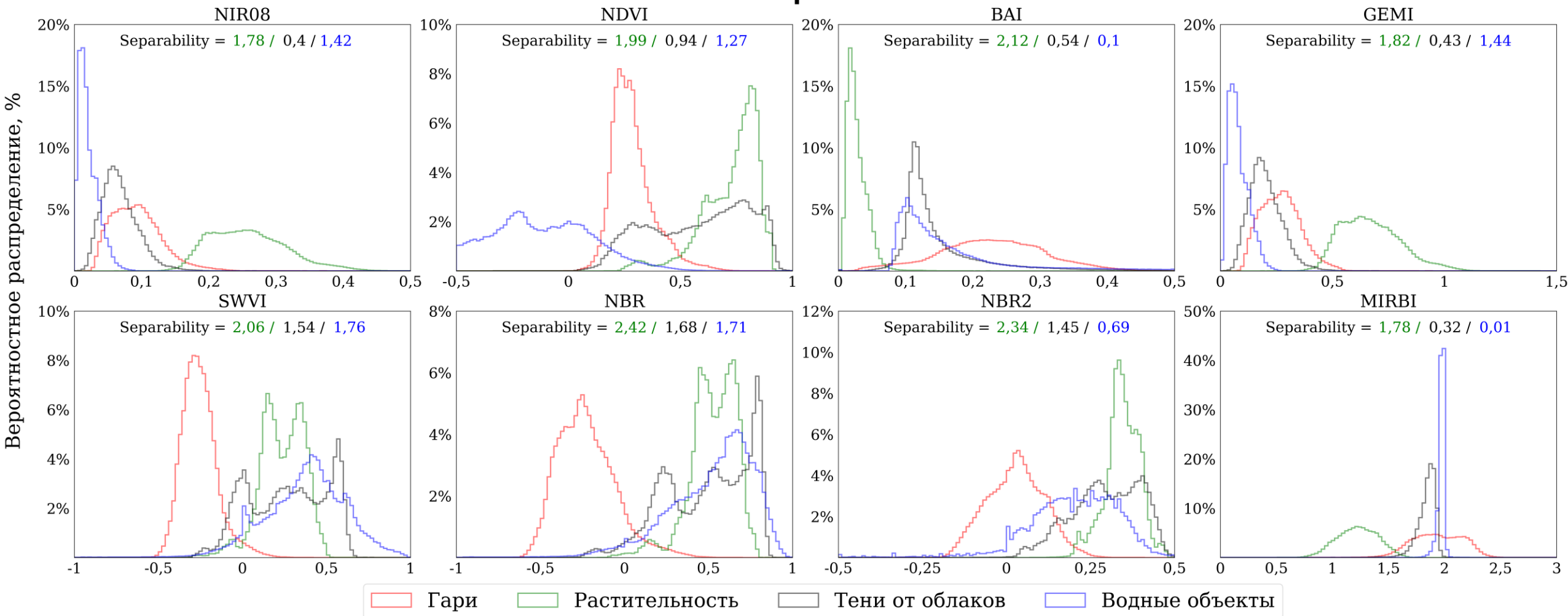


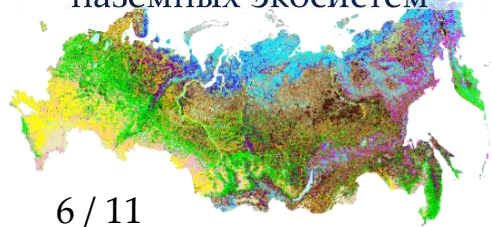


Спектральная разделимость гарей Гари vs другие классы, Landsat-8/9 OLI

- Растительность / тени от облаков / водные объекты

Постпожарные значения





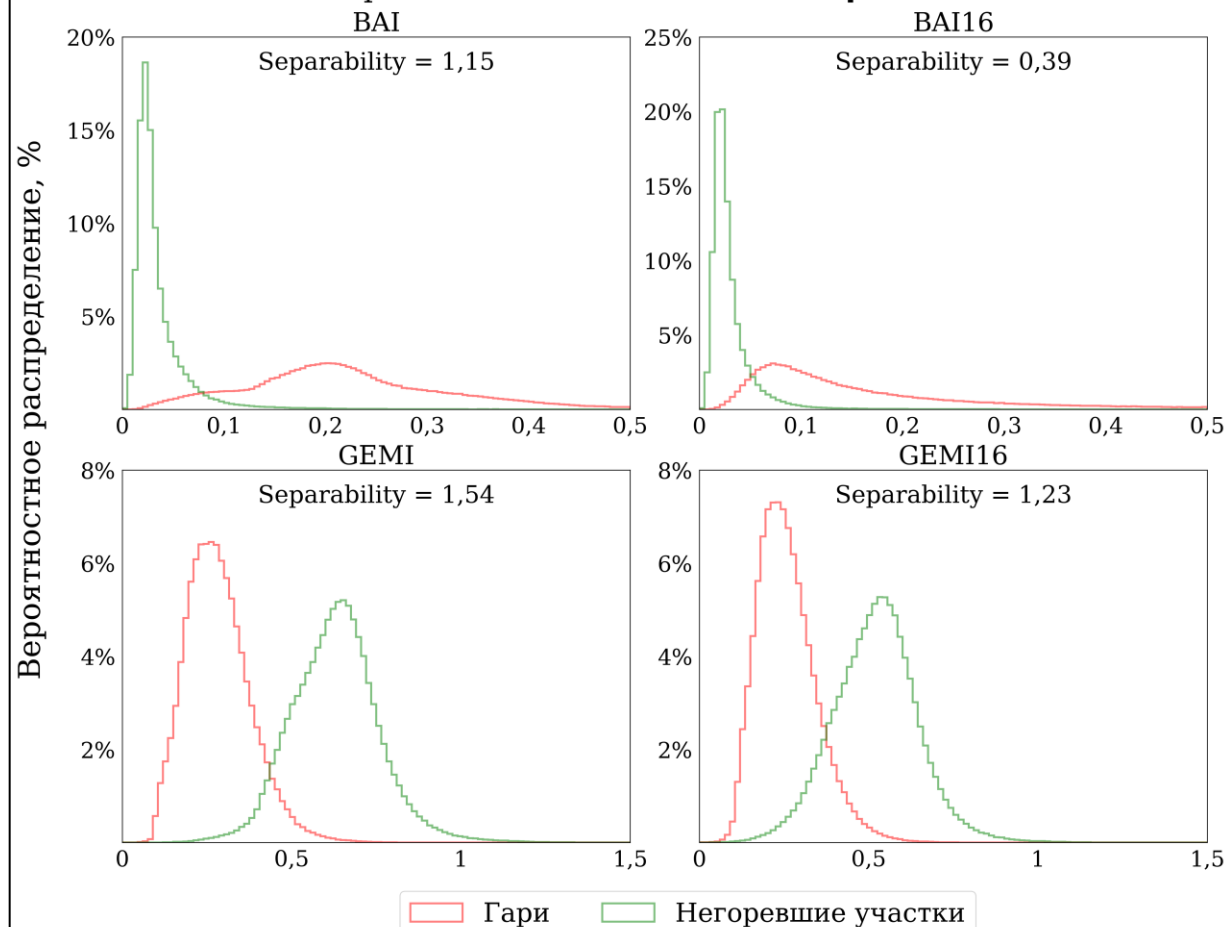
6 / 11

Спектральная разделимость гарей

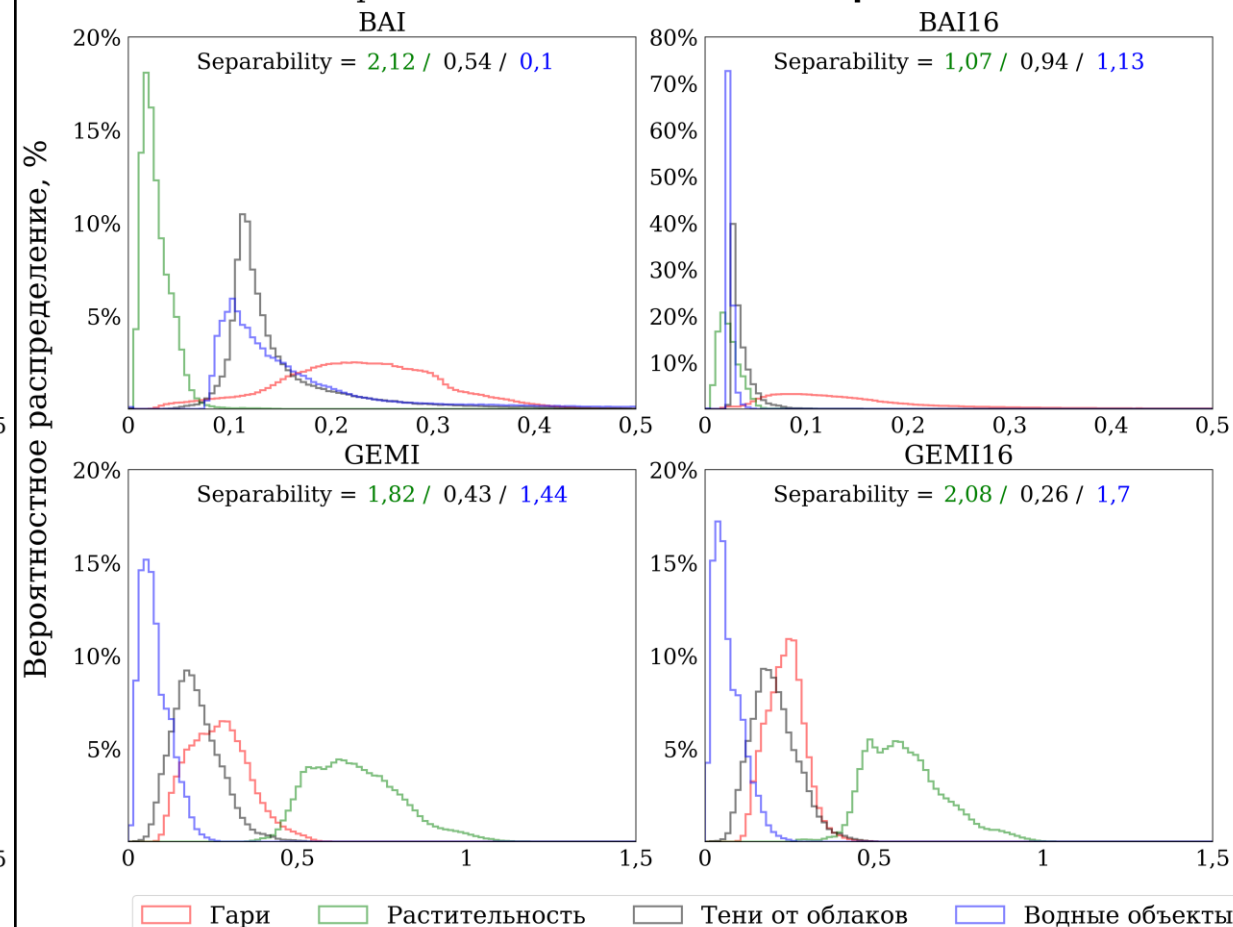
Эксперимент с индексами на основе SWIR16

- Ср. BAIM (NIR08 / SWIR22) [Martin et al., 2005]
- Ср. GEMI3 (AVHRR — NIR08 / MWIR) [Barbosa et al., 1999]

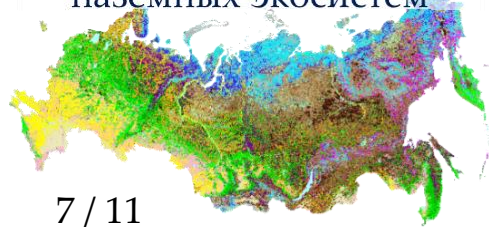
Выборка Sentinel-2 MSI: **постпожарные** значения



Выборка Landsat-8/9 OLI: **постпожарные** значения



- BAI16: NIR08 = 0.05, SWIR16 = 0.21 (NIR ∈ [0.05; 0.1]; SWIR16 ∈ [0.1; 0.3])
- GEMI16: Red → SWIR16 (без замены коэффициентов, так же как и в GEMI3)



Спектральная разделимость гарей

Ранжирование индексов по разделимости

- Чем выше ранк, тем выше разделимость *с гарями*
- Ср. [\[Liu et al., 2023, Fig. 3\]](#)

Выборка Sentinel-2 MSI

		Постпожарные значения																				
Типы растительного покрова	ВЗЛ	20	15	21	1	17	16	19	18	11	12	9	2	10	6	13	14	4	5	7	8	3
	ЛХЛ	21	18	20	4	15	17	19	16	12	11	9	5	10	7	13	14	6	3	2	8	1
	СЛЛ	20	16	19	4	15	21	18	17	13	12	6	5	11	7	10	14	8	2	1	9	3
	Л-с	18	12	15	1	9	19	20	21	14	17	7	3	11	8	13	16	6	4	2	10	5
	ВБУ	20	16	17	2	12	21	19	18	15	11	8	3	10	7	13	14	6	5	1	9	4
	Тун	18	12	17	1	13	21	20	19	9	14	11	2	10	8	15	16	5	6	3	7	4
	Гар	20	16	19	3	13	21	18	17	14	12	9	2	10	7	11	15	6	5	1	8	4

Выборка Landsat-8/9 OLI

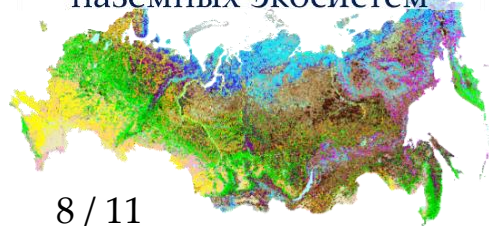
Класс	Тен	8	13	12	17	7	1	21	18	3	10	15	16	4	2	11	14	20	5	19	9	6
	Вод	17	19	18	10	5	3	4	2	1	11	21	9	6	7	12	16	8	14	20	13	15
	Обл	12	8	9	4	11	13	7	5	6	18	2	1	10	14	15	19	3	20	17	16	21
	Снг	12	10	11	9	16	13	5	2	1	17	6	8	3	4	14	20	7	19	21	15	18
		Blue	Green	Red	NIR08	SWIR16	SWIR22	NDSI_B	NDSI_R	MNDWI	NDVI	BAI	GEMI	SWVI	NBR	BAI16	BAIM	GEMI16	NBR2	MIRBI	CSI	SR_SWIR

- ВЗЛ = вечнозелёные хвойные леса
- ЛХЛ = лиственничники
- СЛЛ = смешанные и лиственные леса
- Л-с = травяные
- ВБУ = водно-болотные
- Тун = тундровые
- Гар = гари предыд. лет
- Тен = тени от облаков
- Вод = водные объекты
- Обл = облака
- Снг = снег/лёд



Временная разделимость по данным NOAA-20 VIIRS

Separability [Giglio et al., 2018, 2025] (MCD-/VNP64A1), [Lizundia-Loiola et al., 2022] (ESA FireCCIS311)



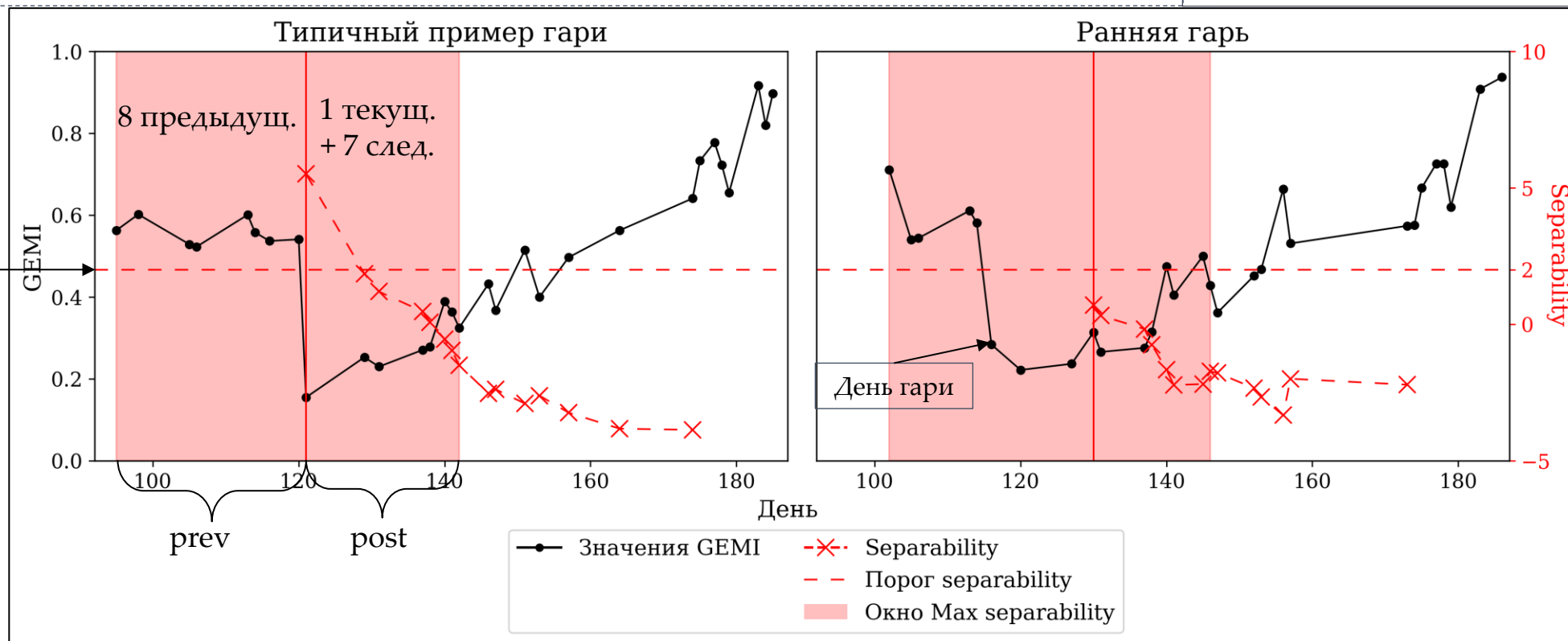
8 / 11

Фиксация гарей VIIRS: временная разделимость

Пример временных рядов

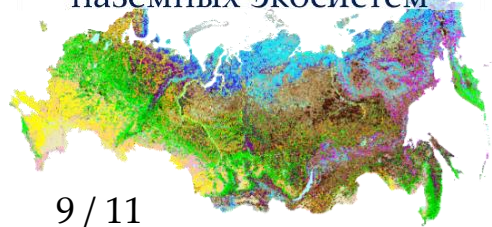
- Timeseries separability [Giglio et al., 2018]
- На примере индекса GEMI

Порог фиксации гарей
[Giglio et al., 2018]



$$Separability (врем.) = \frac{VI_{prev} - VI_{post}}{|\sigma_{prev} + \sigma_{post}|/2},$$

где *prev* и *post* — окна предыдущих 8 / текущего + 7 последующих наблюдений; *VI* — среднее значение вегетационного индекса, σ — std. отклонение *VI*. Для max и min значений среднего и σ используется весовой коэффициент 0.2 [Lizundia-Loiola et al., 2022].

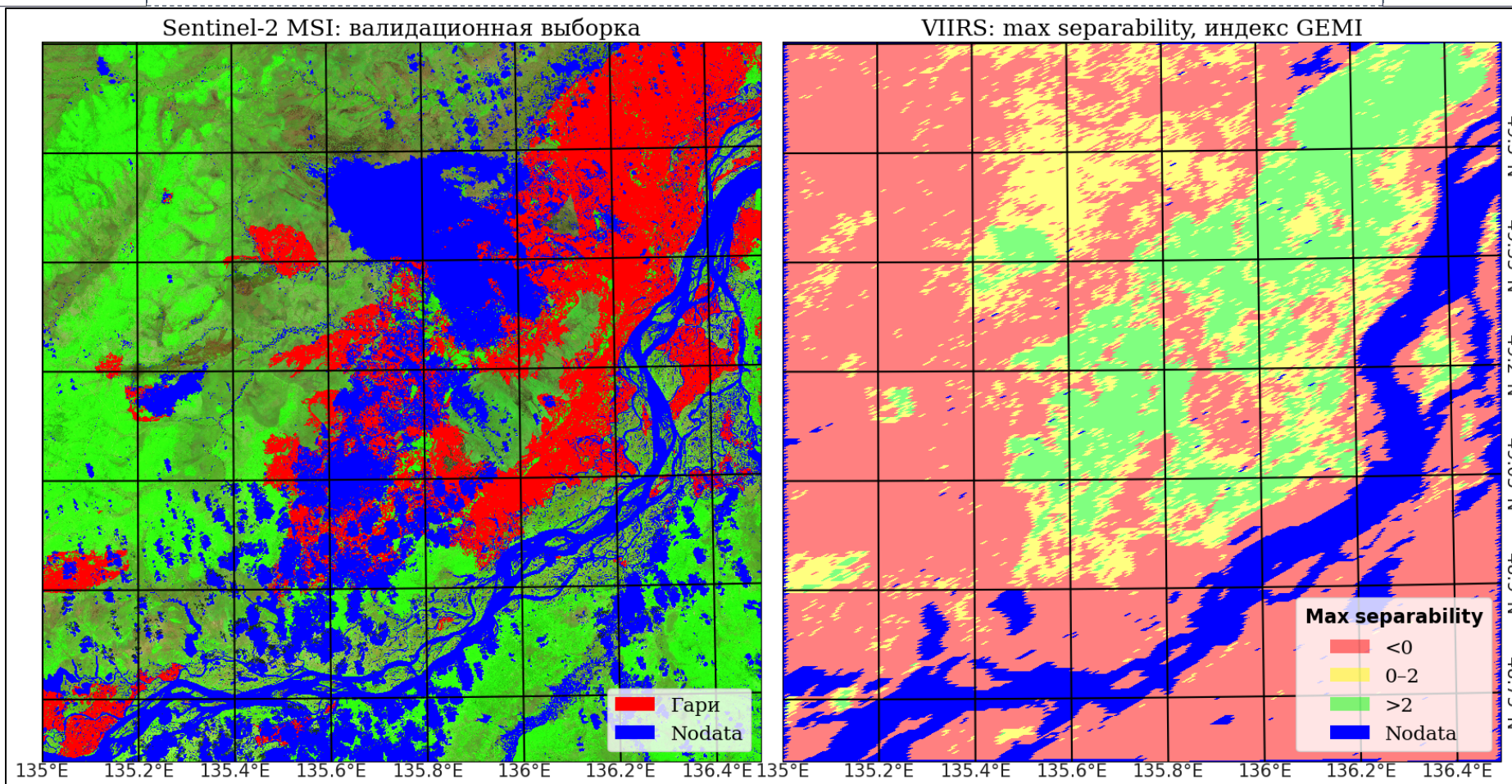


9 / 11

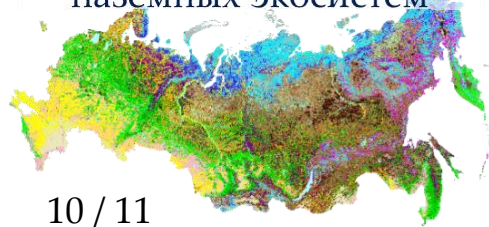
Фиксация гарей VIIRS: временная разделимость

Пример применения максимальной разделимости

- Макс. separability за период выборки Sentinel-2 MSI ± 30 дней
 - Приамурье, апрель–май 2024 г., по индексу GEMI



- Приемлемая точность, но пропускаются ранние гари / пиксели на границе сред



10 / 11

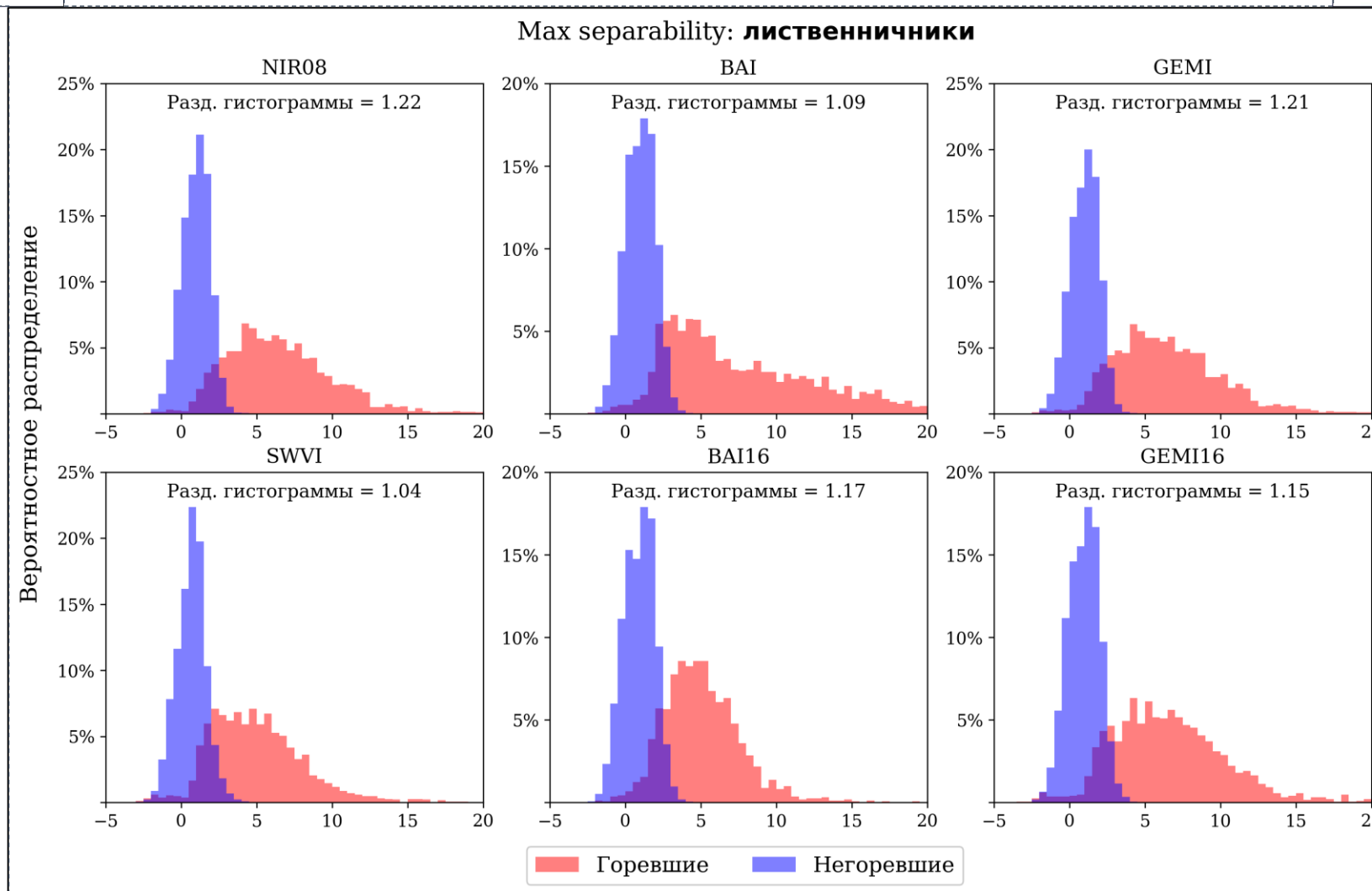
Фиксация гарей VIIRS: временная разделимость

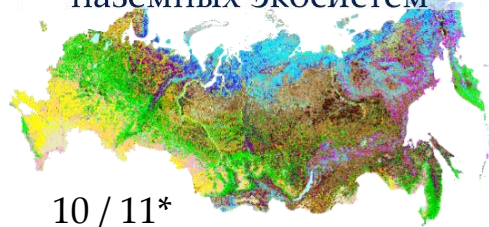
Разделимость горевших и негоревших участков

- Макс. значения **separability** за период тестовой выборки
- [Методика получения выборки](#)

! Знач. Separability > 2 возможно у негоревших участков. Это типично для осенней фенологии и для нарушений, не связанных с пожарами. Необходима дополнительная фильтрация.

• См. [пример](#).



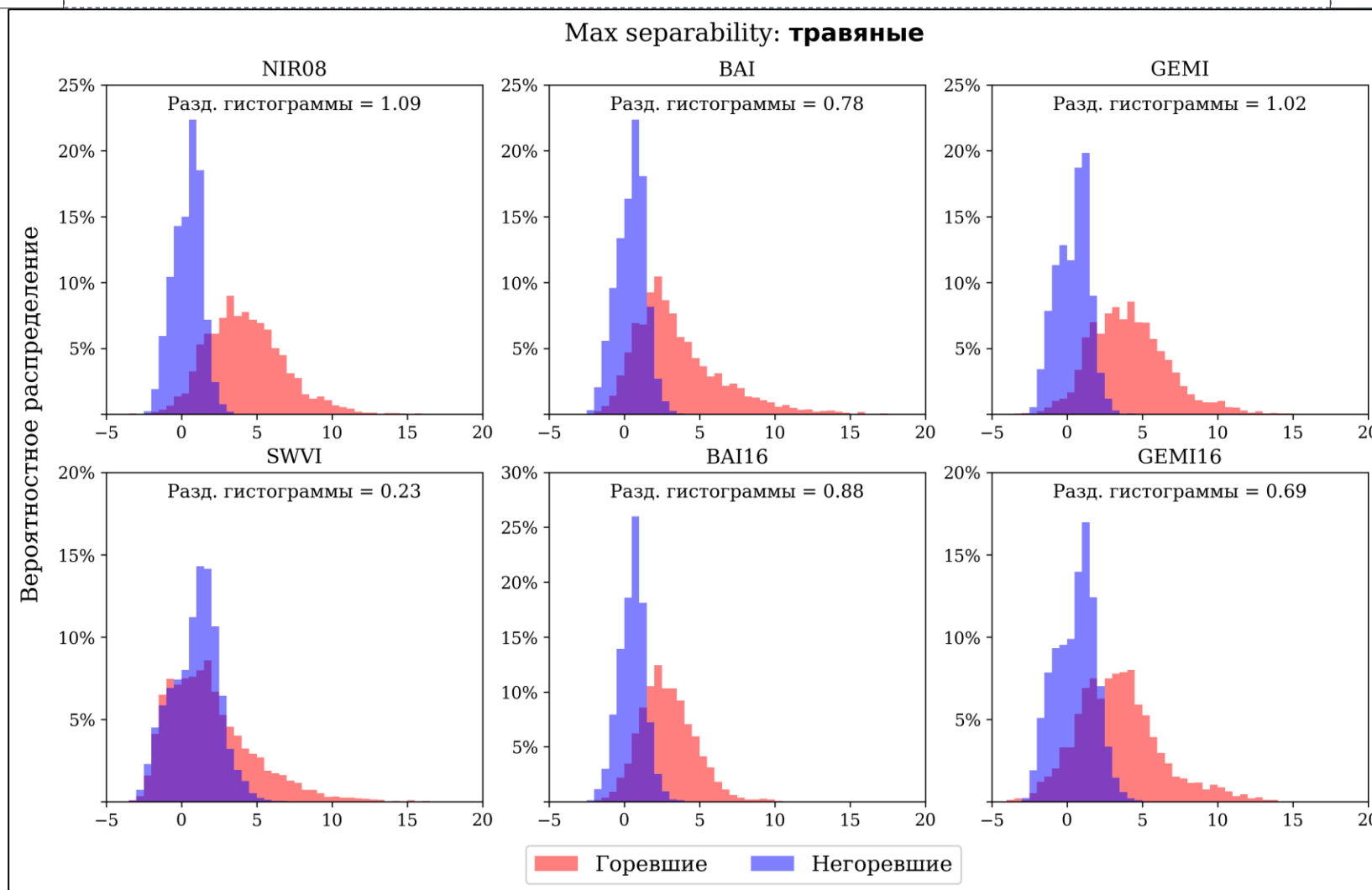


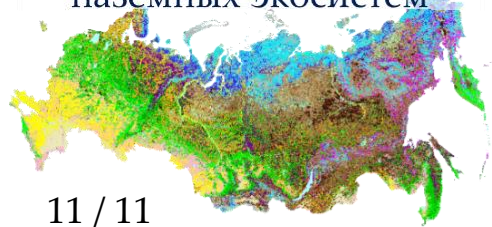
10 / 11*

Фиксация гарей VIIRS: временная разделимость

Разделимость горевших и негоревших участков

- Макс. значения **separability** за период тестовой выборки
 - [Методика получения выборки](#)

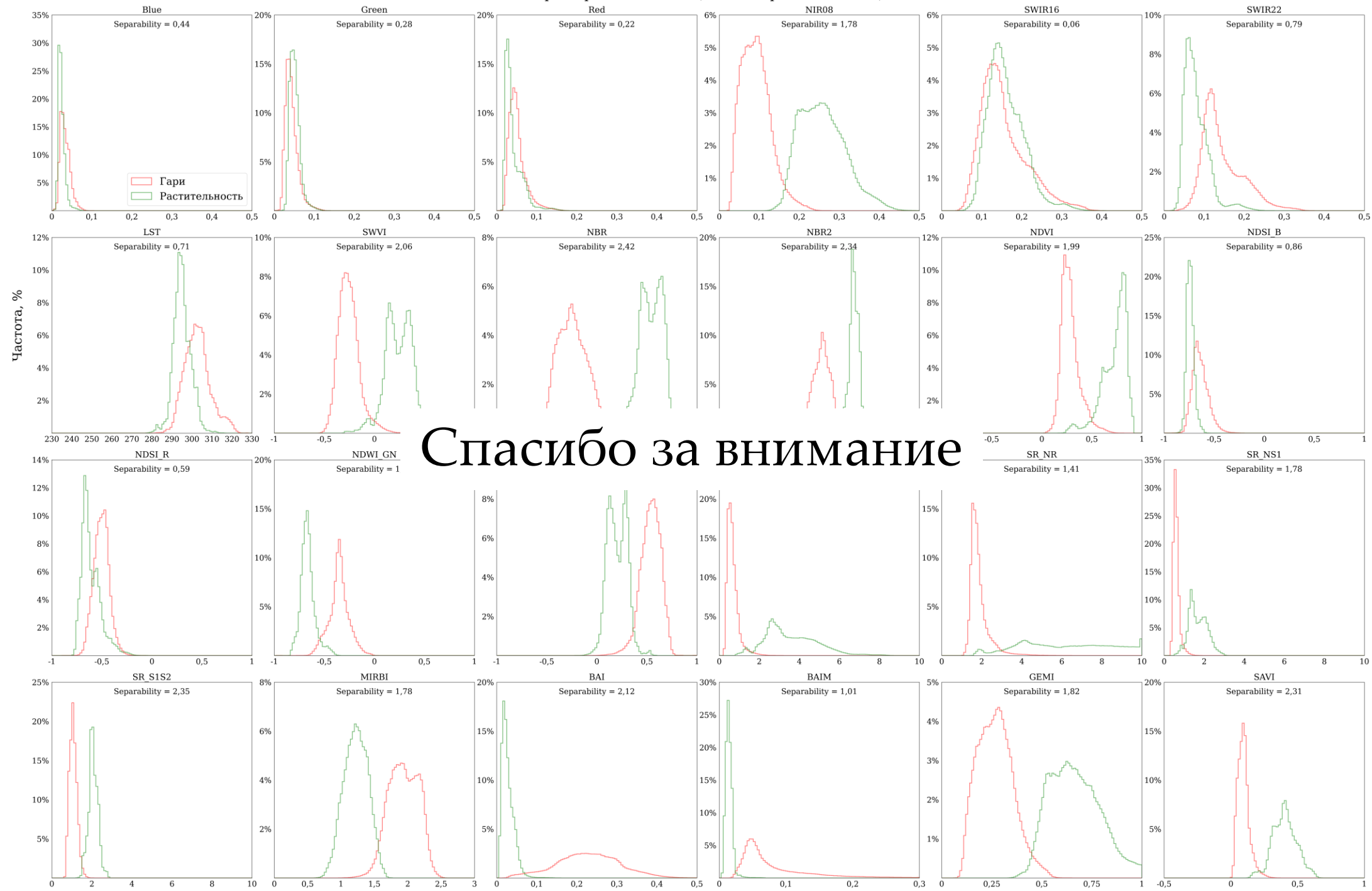




Результаты и выводы

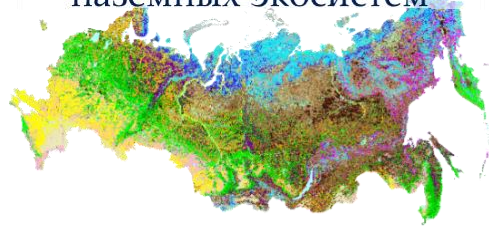
- Получены обширные выборки гарей и негоревших участков различных классов
- Получена валидационная выборка гарей по Sentinel-2 MSI на территории России за 2023–2024 гг.
- Для повреждённых пожарами участков наблюдается значительное снижение СЯ в NIR и SWIR16, однако в SWIR22 наблюдаются незначительные изменения
 - ? SWIR22 служит «якорем» в нормализованных индексах NBR, NBR2, VI (*используется в MCD-/VNP64A1*)
- ✓ Наибольшая спектральная разделимость гарей и негоревшей растительности достигается для наблюдений в канале NIR и индексов MIRBI, GEMI, SR_SWIR и NBR2
 - × Низкая разделимость с др. классами: MIRBI со всеми классами; NBR2 и SR_SWIR с водными объектами, облачностью и снежным покровом; NIR08 и GEMI с тенями от облаков и водными объектами
 - ? Индекс MNDWI возможно использовать для фильтрации шумов (воды, теней, облаков)
- × Для предложенных индексов BAI16 и GEMI16 (NIR/SWIR16) характерна более низкая спектральная разделимость гарей и негоревших участков в сравнении с исходными BAI и GEMI (NIR/Red)
- ✓ На примере данных NOAA-20 VIIRS продемонстрирована применимость показателя временной разделимости [Giglio et al., 2018] для фиксации гарей
 - ! Применение метрики временной разделимости может приводить к пропуску ранних весенних и поздних осенних гарей

Гари vs растительность (постпожарное состояние)





Дополнительные слайды



Методика получения выборки: Landsat-8/9 OLI

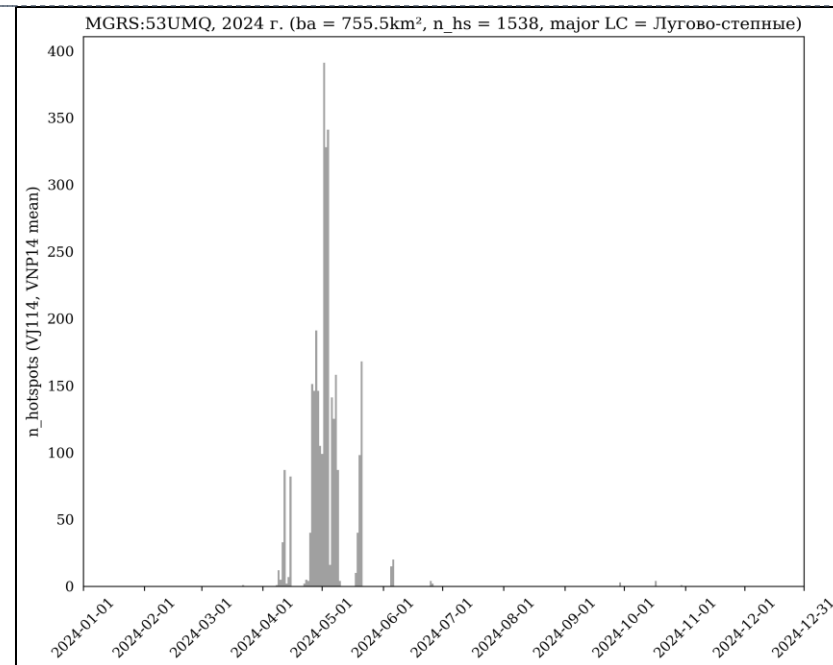
- Выборка *зарей*, *растительности* и *теней от облаков* вручную
- Выборка *снега*, *облаков* и *водных объектов* по QA-маскам растров

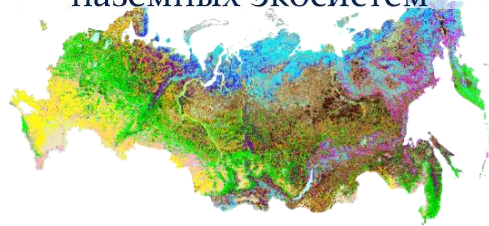
- Растры Landsat 8/9 OLI C2 [Landsat..., 2024] с встроенными QA-масками шумов
- Тайлы WRS с >1000 «хотспотов» VIIRS VNP-/VJ114IMGML C2 [Schroeder et al., 2024] в этом году
- Подбор пар снимков Landsat-8/9 OLI в системе «Вега-Лес» за период до/после основного сезона пожаров (в некоторых случаях — предпожарный снимок за предыдущий год)

Пороговые фильтры

- Негорящие ландшафты по ESA WC 10m (2021 г.) [Zanaga et al., 2021]
- Маски воды: продукт GSW [Pickens et al., 2020] >20% OR QA = "Water" OR MNDWI > 0.1
- Снег и облака: QA = "Snow" OR NDSI_B > 0.
- Облака и яркие объекты: QA = "Cloud" OR QA = "Dilated Cloud" OR Blue > 0.15 OR LST < 270K.
- Тёмные объекты: (albedo(RGB)* < 0.01 AND albedo(SWIR16, SWIR22) < 0.07).
- «Хотспоты»: (SWIR22/NIR08 > 2 AND SWIR22 > 0.35) OR (SWIR16 > 0.6 & SWIR22 < 0.12) (упрощённо по [Schroeder et al., 2016])

*Albedo = усред. значение по нескольким каналам





Методика получения выборки: **Sentinel-2 MSI**

- Подход на основе [Bastarrika et al., 2024; Hantson et al., 2013; Melchiorre, Boschetti, 2018; Stroppiana et al., 2022]
- Выборка гарей и негоревших участков по класс. Random Forest

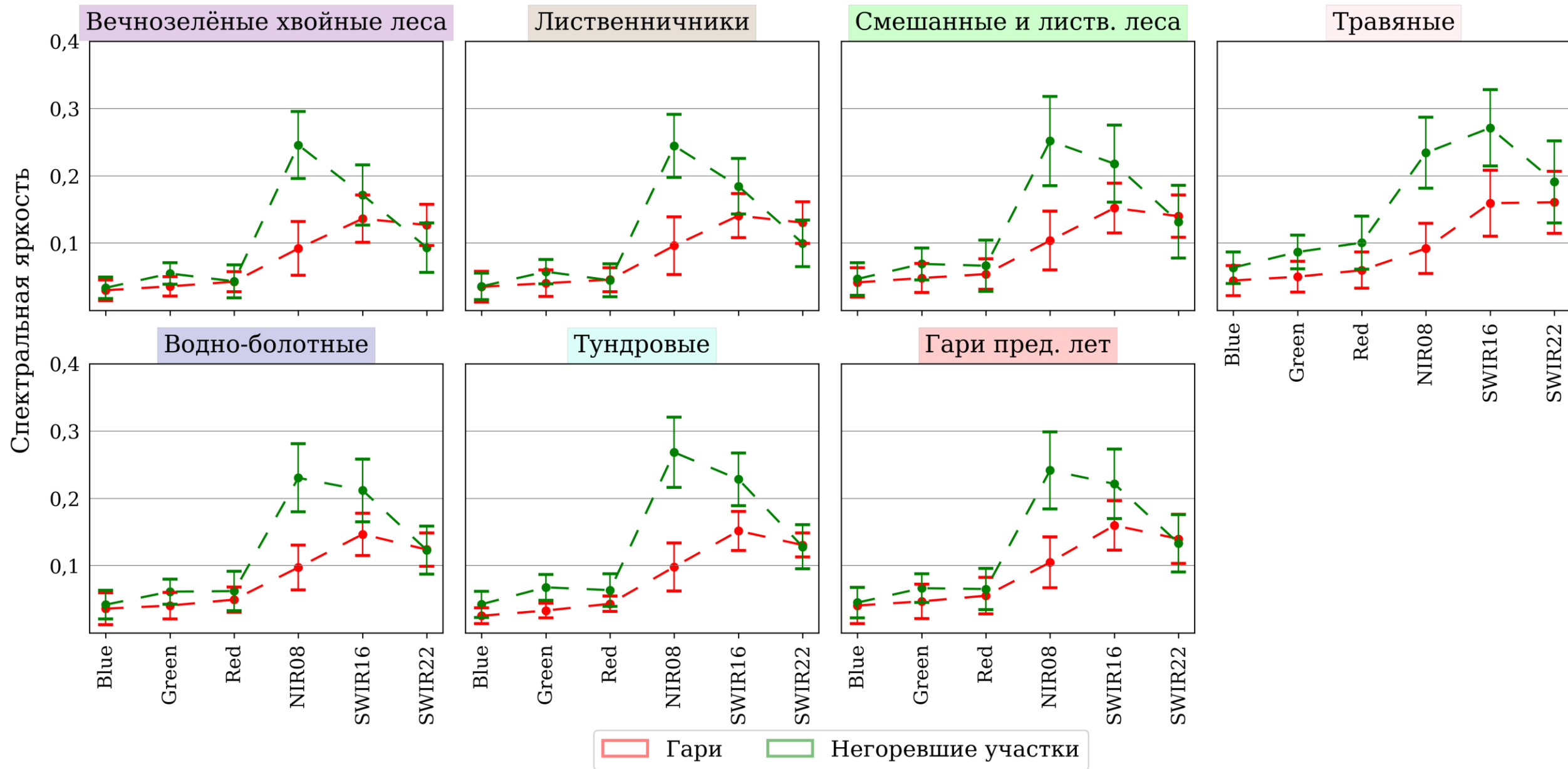
- Растры Sentinel-2 MSI L2A с масками SCL [Sen2Cor..., 2021] и ИКИ РАН [Миклашевич и др., 2023]
- Тайлы MGRS полностью в одной зоне UTM; только сцены $>95\%$ $Area_{\text{тайл}}$ и $<15\%$ облачности
- Тайлы MGRS в 20%-ном перцентиле по числу «хотспотов» VIIRS VNP-/VJ114IMGML C2
- Сцены за пожарный период (80% всех «хотспотов» за год; >50 «хотспотов» в день сцены); $\Delta t_{\text{max}} = 30$ дней
- Удаление сцен: значительное перекрытие гарей облаками или дымкой
- Применение маски с/х-полей Минсельхоза (\rightarrow Nodata)
- Класс. Random Forest (СЯ каналов, NDVI, MNDWI, SWVI, NBR, NBR2) \rightarrow ручное исправление контуров

Пороговые фильтры

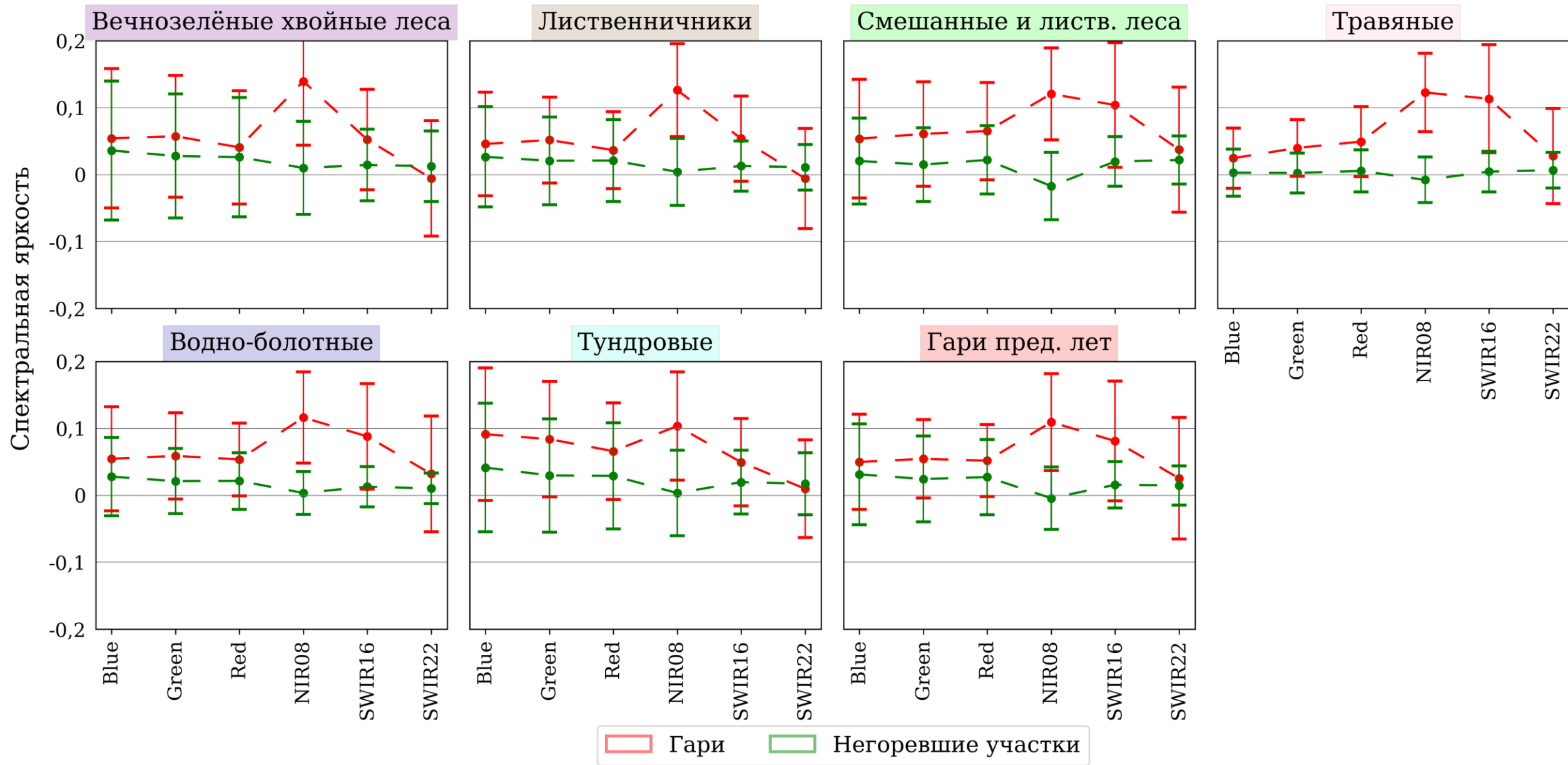
- Негорящие ландшафты по ESA WC 10m (2021 г.) [Zanaga et al., 2021]
- Маска воды: $GSW > 35\%$ OR $(MNDWI > 0.1 \text{ AND } albedo(SWIR) < 0.07)$
- Коррекция масок облаков SCL и ИКИ РАН с применением NDSI_B, Blue, NBR
- Коррекция масок теней от облаков SCL и ИКИ РАН с применением NBR, GEMI, NIR08, $albedo(SWIR)$
- Маска «хотспотов»: $(SWIR22 > 0.3 \text{ AND } NBR2 < -0.3)$ OR $SWIR22 > 0.4$; буфер 2 пикс.
- Доп. демаскирование обводнённых гарей по NIR08, NBR, SWIR16 и MIRBI

Индекс	Формула	Источник	Комментарий
BAI	$BAI = \frac{1}{(\rho_{NIR_{0,8}} - 0,06)^2 + (\rho_{Red} - 0,1)^2}$	[Verstraete, Pinty, 1996; Chuvieco et al., 2002]	<ul style="list-style-type: none"> BAIM: $NIR_{0,8} = 0.05, SWIR_{2,2} = 0.2$ [Martin et al., 2005] BAI16: $NIR_{0,8} = 0.05, SWIR_{1,6} = 0.21$ [в данной работе]
CSI	$CSI = \frac{\rho_{NIR_{0,8}}}{\rho_{SWIR_{2,2}}}$	[Smith et al., 2007]	
GEMI	$GEMI = \eta(1 - 0,25\eta) - \frac{\rho_{Red} - 0,125}{1 - \rho_{Red}},$ $\eta = \frac{2(\rho_{NIR_{0,8}}^2 - \rho_{Red}^2) + 1,5\rho_{NIR_{0,8}} + 0,5\rho_{Red}}{\rho_{NIR_{0,8}} + \rho_{Red} + 0,5}$	[Pinty, Verstraete, 1992; Verstraete, Pinty, 1996]	GEMI16: замена <i>Red</i> на $SWIR_{1,6}$, без изменения коэффициентов
NBR	$NBR = \frac{\rho_{NIR_{0,8}} - \rho_{SWIR_{2,2}}}{\rho_{NIR_{0,8}} + \rho_{SWIR_{2,2}}}$	[García, Caselles, 1991; Key, Benson, 1999]	
NBR2	$NBR2 = \frac{\rho_{SWIR_{1,6}} - \rho_{SWIR_{2,2}}}{\rho_{SWIR_{1,6}} + \rho_{SWIR_{2,2}}}$	https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-normalized-burn-ratio-2	
NDSI	$NDSI_B = \frac{\rho_{Blue} - \rho_{SWIR16}}{\rho_{Blue} + \rho_{SWIR16}}$	[Dozier, 1989]	NDSI_R: замена <i>Blue</i> на <i>Red</i>
NDVI	$NDVI = \frac{\rho_{NIR_{0,8}} - \rho_{Red}}{\rho_{NIR_{0,8}} + \rho_{Red}}$	[Tucker, 1979]	
MIRBI	$MIRBI = 10 \times \rho_{SWIR_{2,2}} - 9,8 \times \rho_{SWIR_{1,6}} + 2$	[Trigg, Flasse, 2001]	
MNDWI	$MNDWI = \frac{\rho_{SWIR22} - \rho_{Green}}{\rho_{SWIR22} + \rho_{Green}}$	[Xu, 2006]	
SR_SWIR	$SR_SWIR = \frac{\rho_{SWIR_{1,6}}}{\rho_{SWIR_{2,2}}}$	[Kushla, Ripple, 1998]	
SWVI	$SWVI = \frac{\rho_{NIR_{0,8}} - \rho_{SWIR_{1,6}}}{\rho_{NIR_{0,8}} + \rho_{SWIR_{1,6}}}$	[Jürgens, 1997; Fraser et al., 2000]	Другие названия: NDII, mNDMI, NDMI
VI (неимен.)	$VI = \frac{\rho_{SWIR_{1,2}} - \rho_{SWIR_{2,2}}}{\rho_{SWIR_{1,2}} + \rho_{SWIR_{2,2}}}$	[Giglio et al., 2009]	

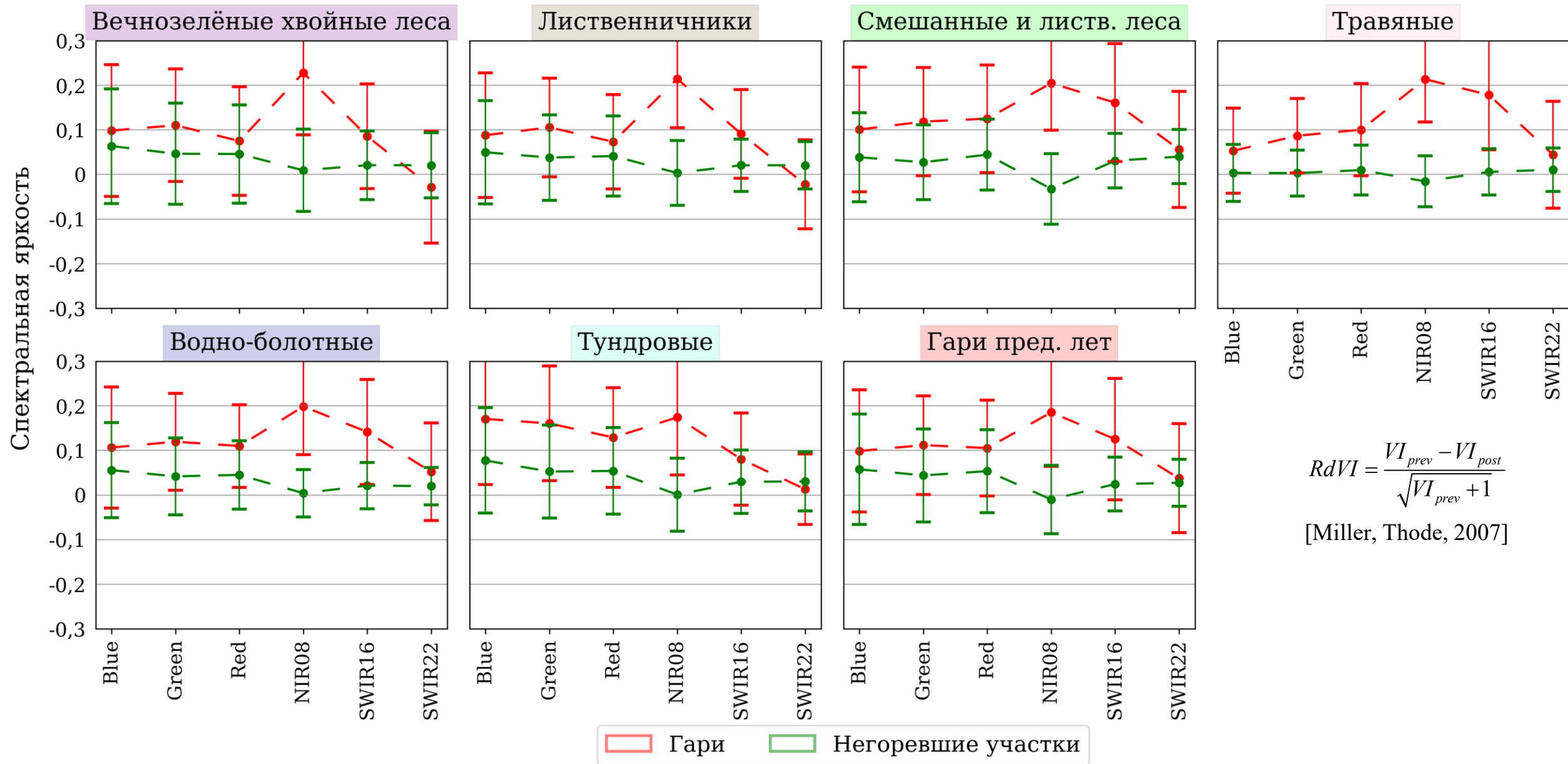
Постпожарные значения



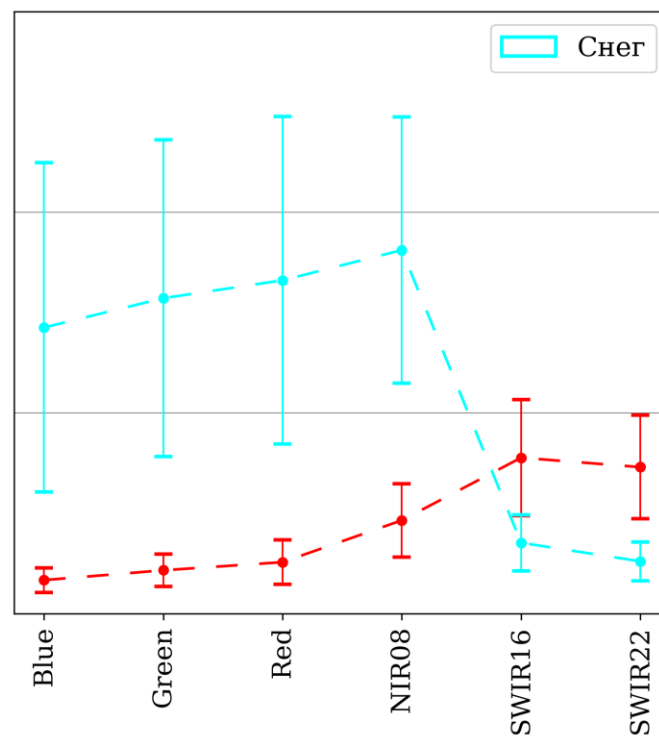
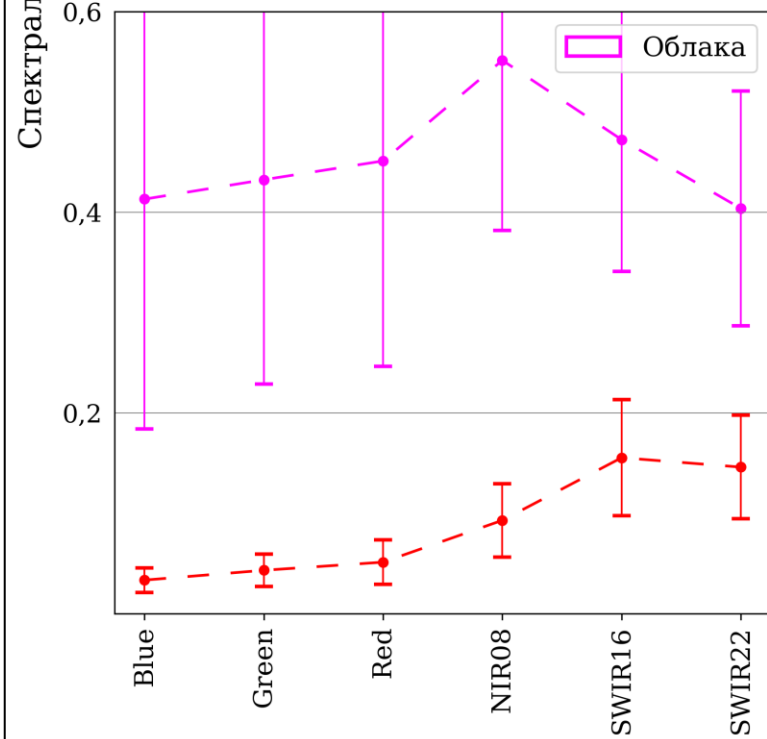
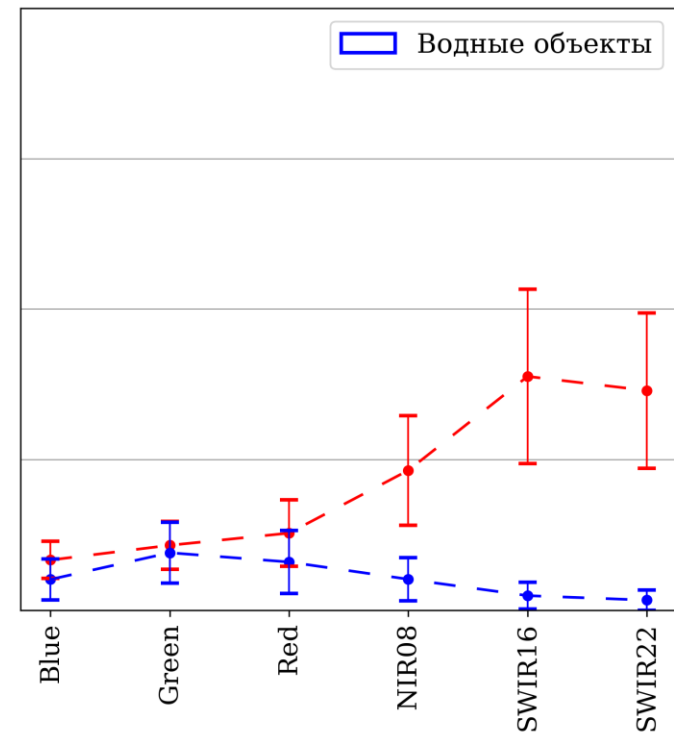
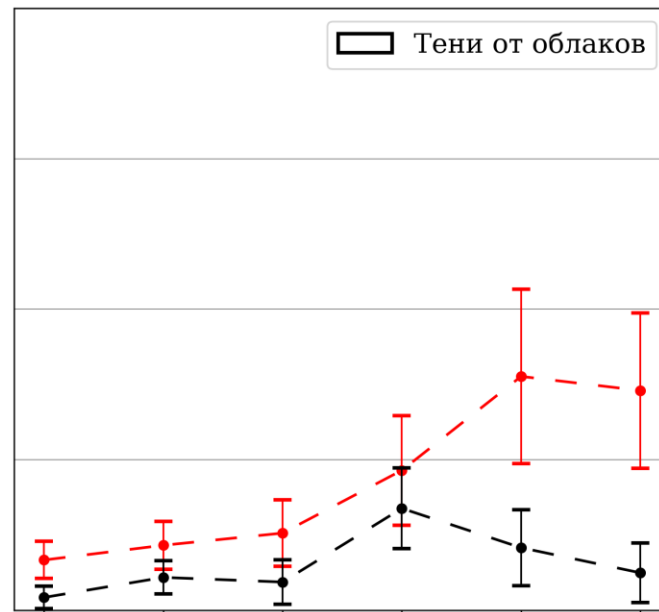
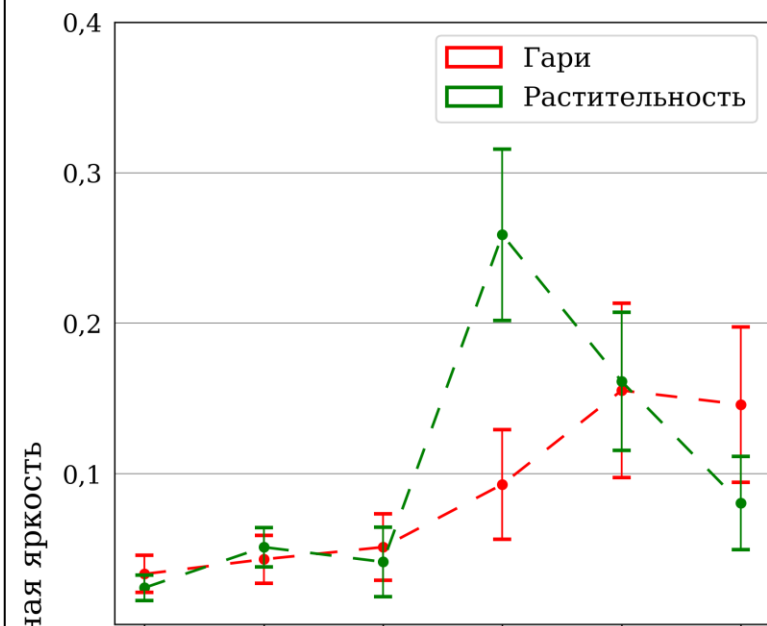
Разновременные значения



Норм. разновременные значения

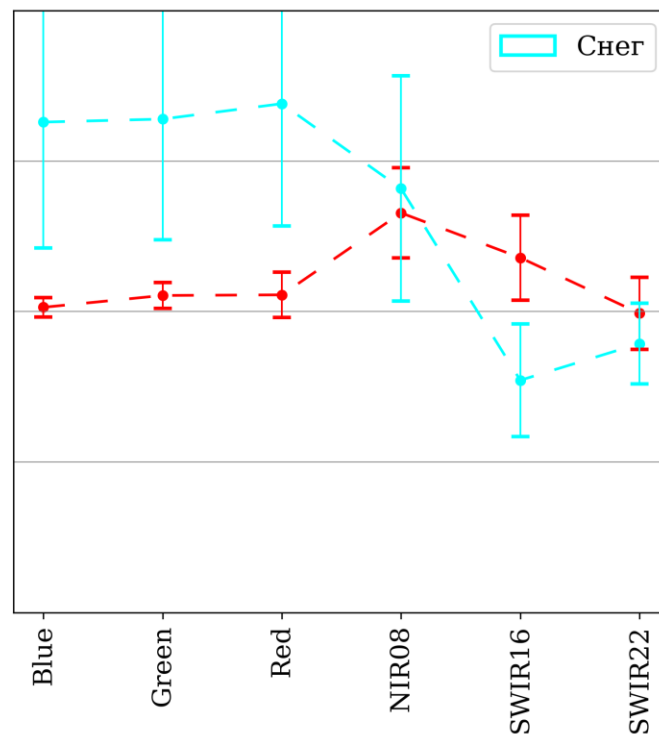
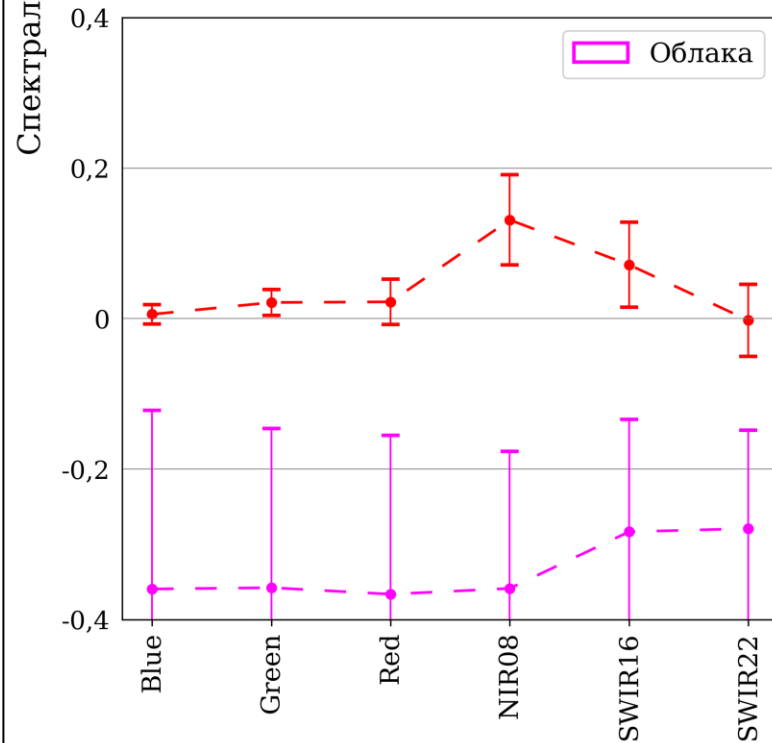
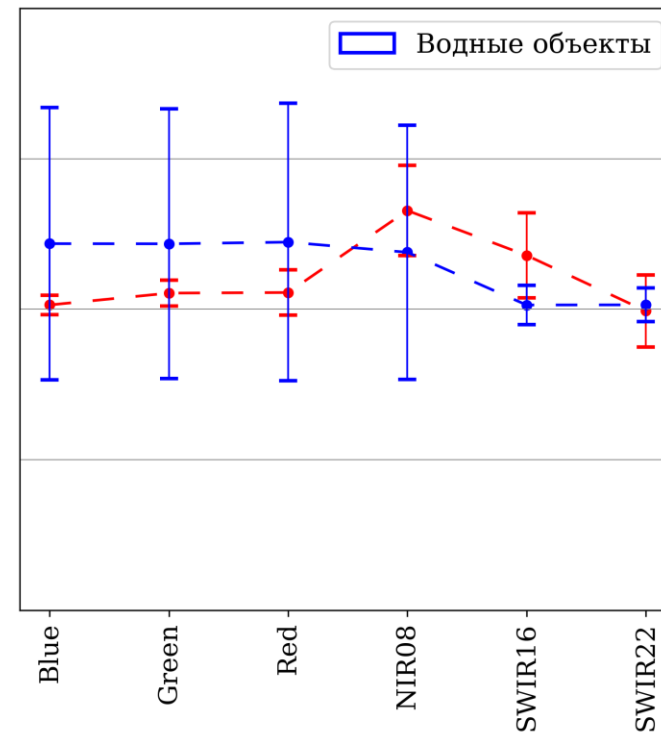
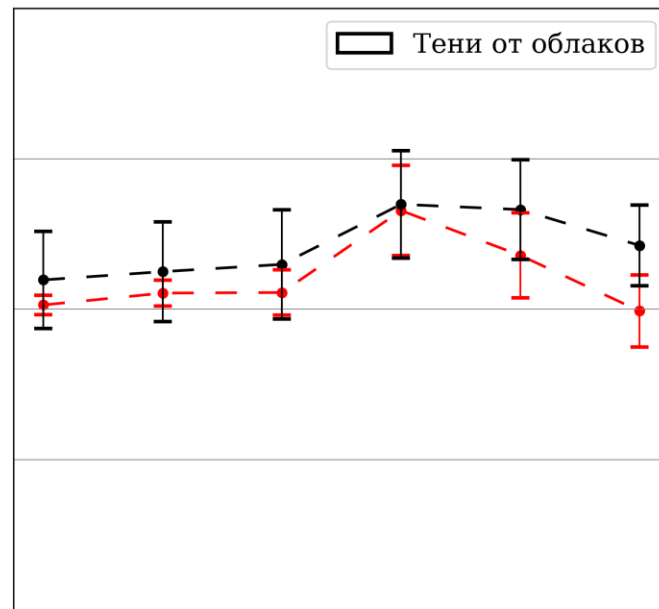
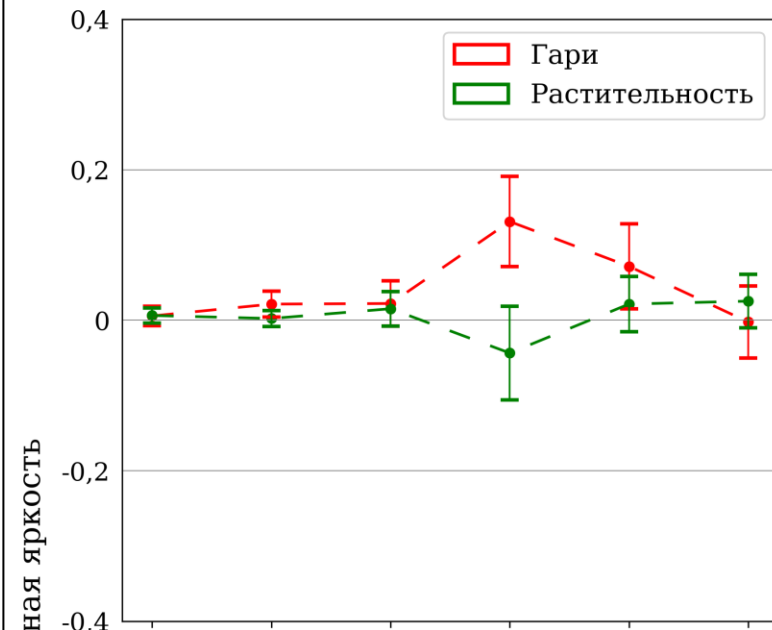


Постпожарные значения



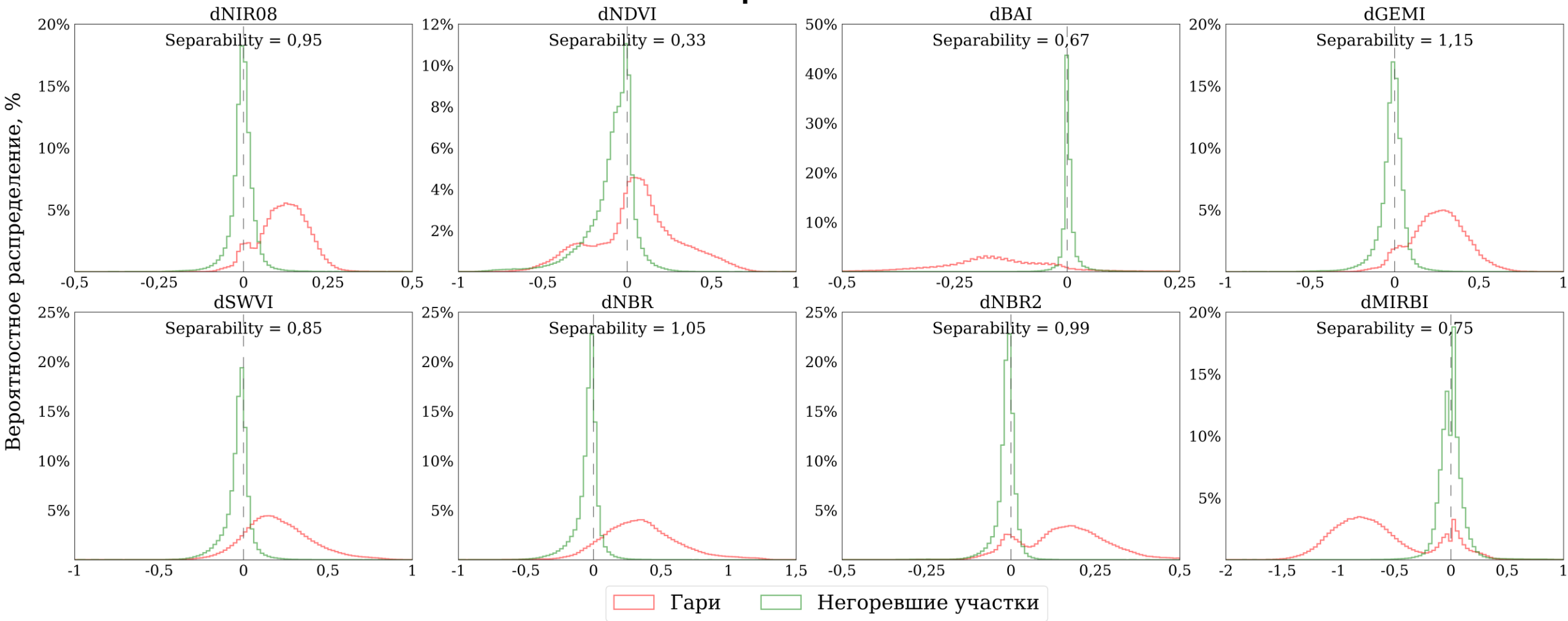
[Назад](#)

Разновременные значения

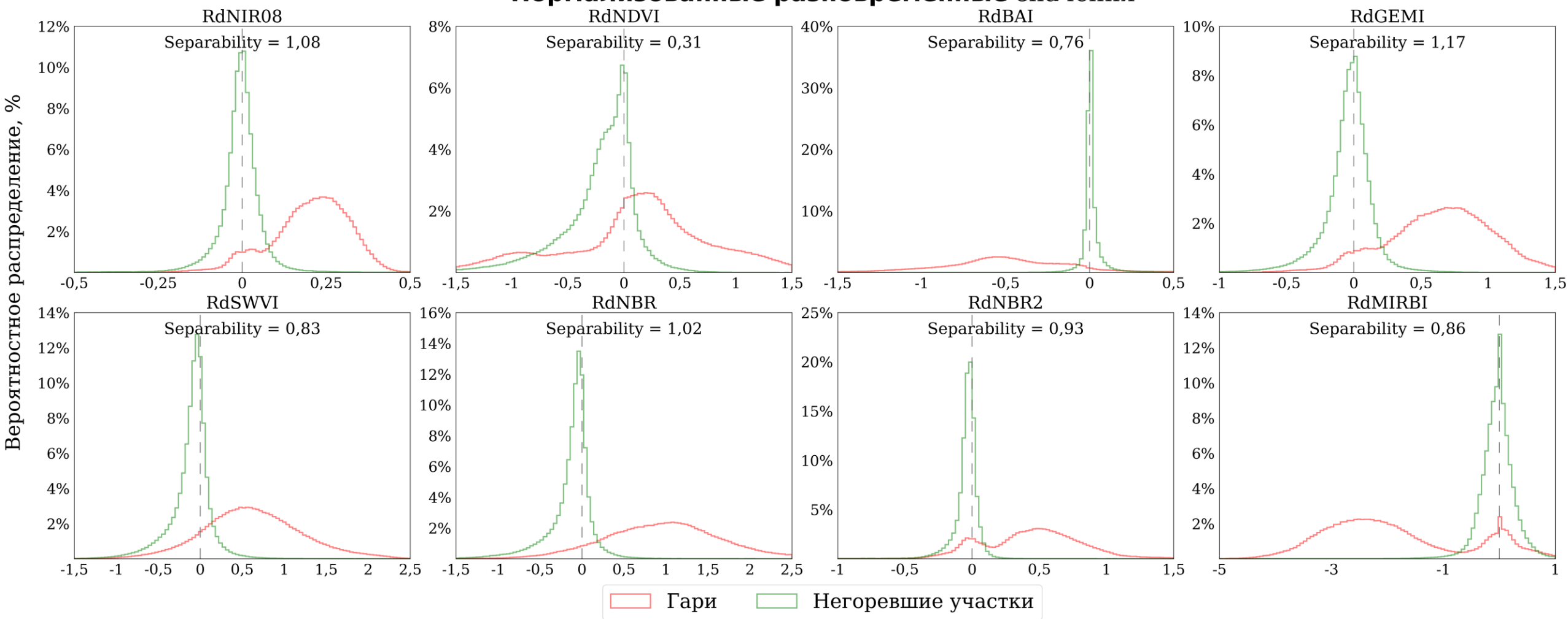


[Назад](#)

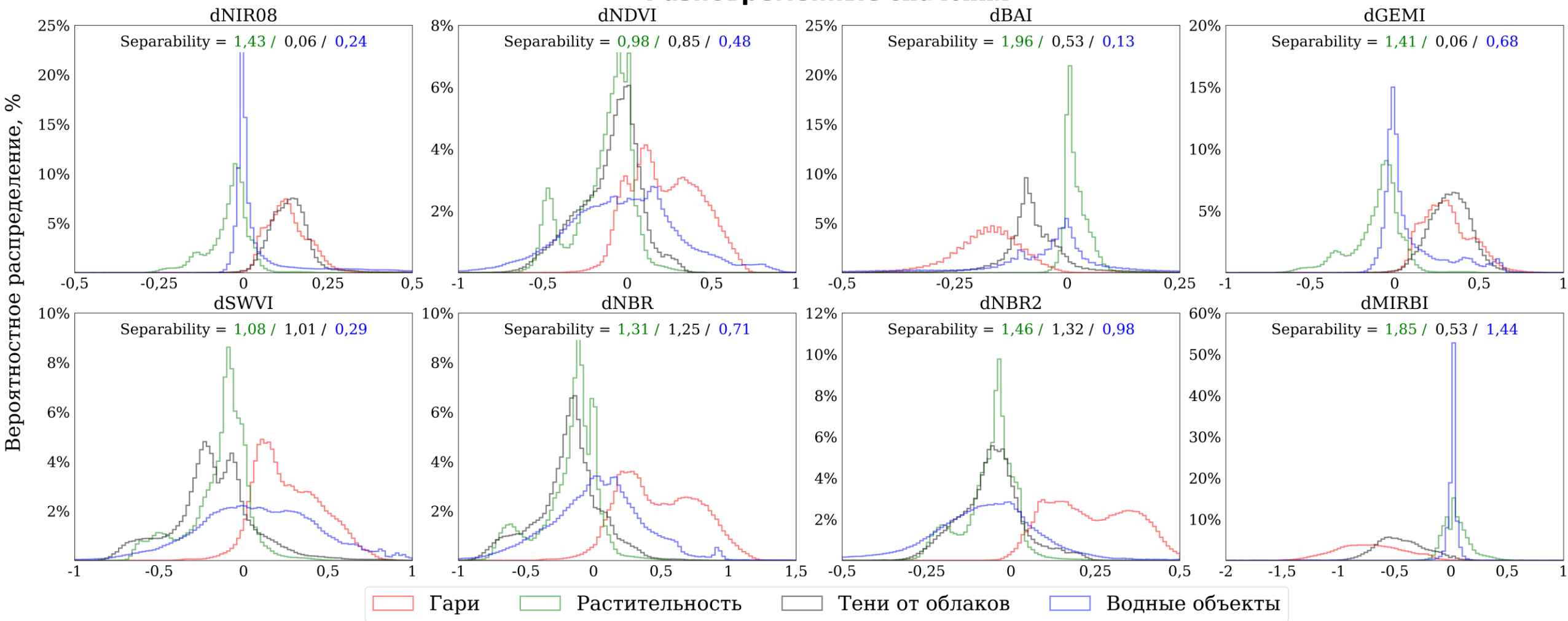
Разновременные значения



Нормализованные разновременные значения



Разновременные значения





Спектральная разделимость гарей

Ранжирование индексов по разделимости



- Чем выше ранк, тем выше разделимость *с гарями*

Выборка Sentinel-2 MSI

		Разновременные значения																				
Типы растительного покрова	ВЗЛ	18	16	19	10	15	17	20	21	12	14	9	2	4	1	8	13	7	5	11	6	3
	ЛХЛ	19	16	18	8	15	17	20	21	12	13	10	2	4	1	11	14	6	5	9	7	3
	СЛЛ	18	17	16	3	13	19	21	20	14	15	9	1	11	5	8	12	6	2	7	10	4
	Л-с	18	15	14	5	8	19	20	21	13	17	9	4	11	6	12	16	7	1	2	10	3
	ВБУ	19	16	15	2	11	18	20	21	14	17	10	1	9	5	8	13	3	6	12	7	4
	Тун	18	16	19	10	17	21	13	15	7	20	14	4	2	1	9	11	5	8	12	3	6
	Гар	18	16	17	3	12	19	20	21	14	15	11	1	7	2	9	13	5	6	10	8	4

Выборка Landsat-8/9 OLI

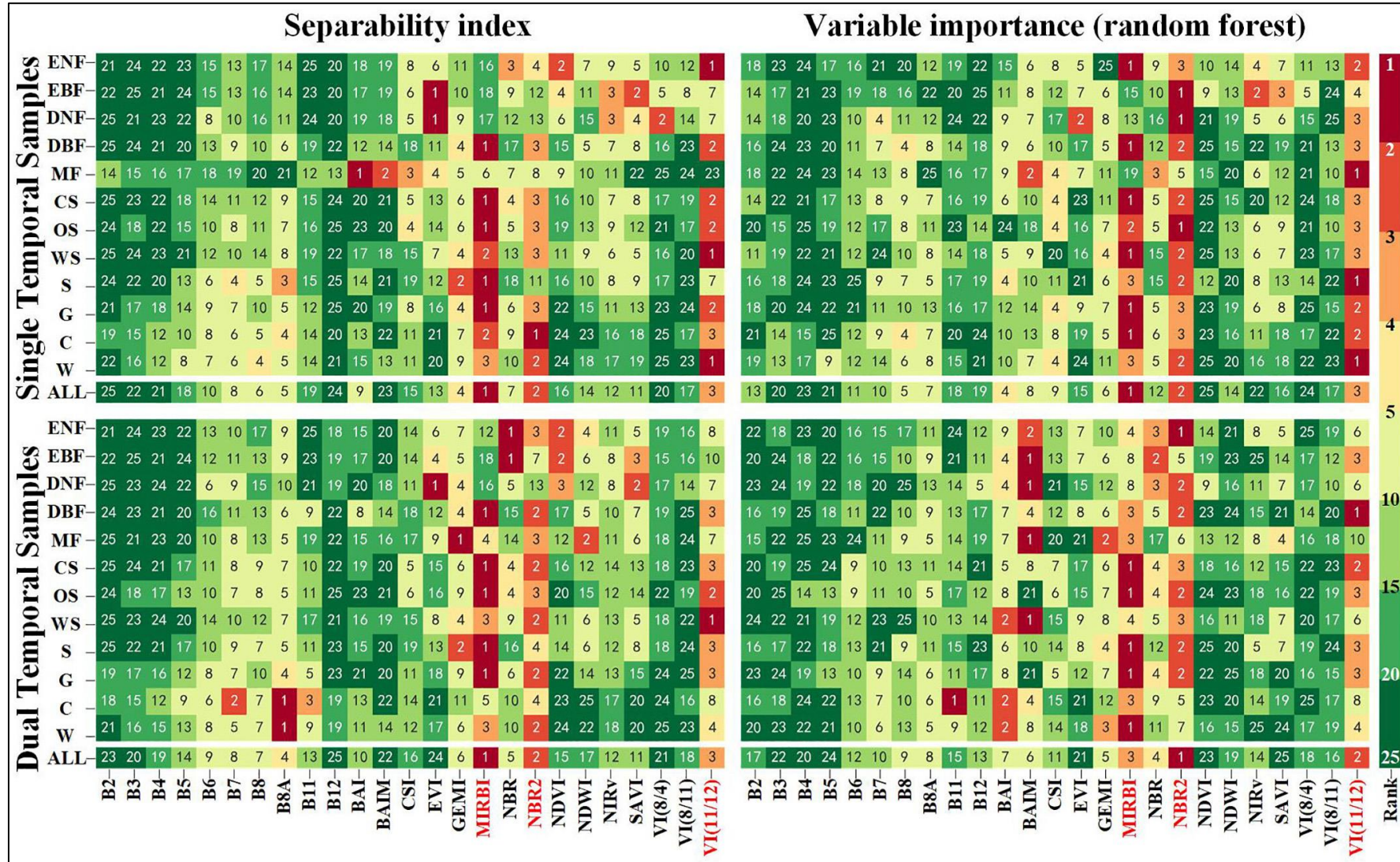
Класс	Тен	Вод	Обл	Снг	Blue	Green	Red	NIR08	SWIR16	SWIR22	NDSI_B	NDSI_R	MNDWI	NDVI	BAI	GEMI	SWVI	NBR	BAI16	BAIM	GEMI16	NBR2	MIRBI	CSI	SR_SWIR
Тен	14	16	15	19	12	6	17	21	5	7	11	20	4	2	8	13	18	1	10	9	3				
Вод	11	13	14	17	5	20	10	15	12	9	19	7	16	6	3	8	21	2	1	18	4				
Обл	8	5	6	2	4	7	12	14	9	21	11	1	15	16	13	17	3	18	10	20	19				
Снг	6	9	8	21	10	18	1	3	11	7	19	12	15	20	13	17	16	5	2	14	4				

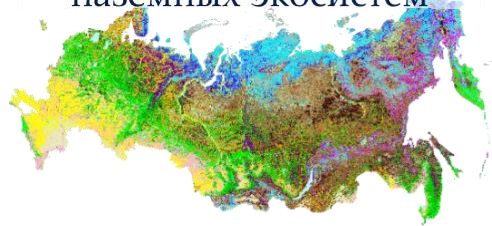
- ВЗЛ = вечнозелёные хвойные леса
- ЛХЛ = лиственничники
- СЛЛ = смешанные и лиственные леса
- Л-с = травяные
- ВБУ = водно-болотные
- Тун = тундровые
- Гар = гари предыд. лет
- Тен = тени от облаков
- Вод = водные объекты
- Обл = облака
- Снг = снег/лёд



[Liu et al., 2023; Fig. 3]: Спектральная разделимость гарей и неповреждённых участков (Sentinel-2 MSI)

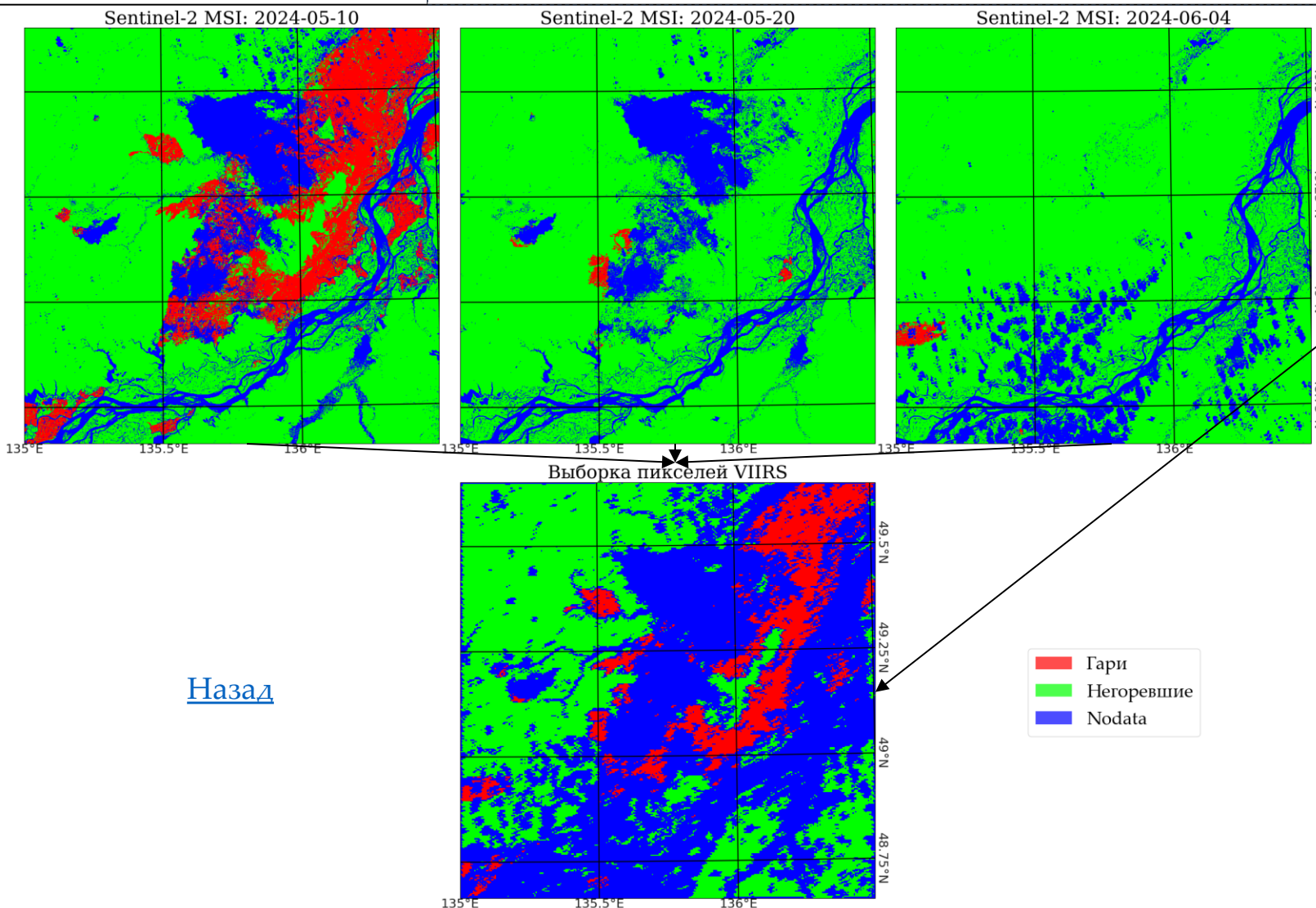
- Single Temporal = постпожарные значения
- Dual Temporal = разновременные значения





Получение выборки пикселей для гистограмм разделимости горевших и негоревших участков

Приамурье, апрель–май 2024 г.



[Назад](#)

Горевший пиксель VIIRS

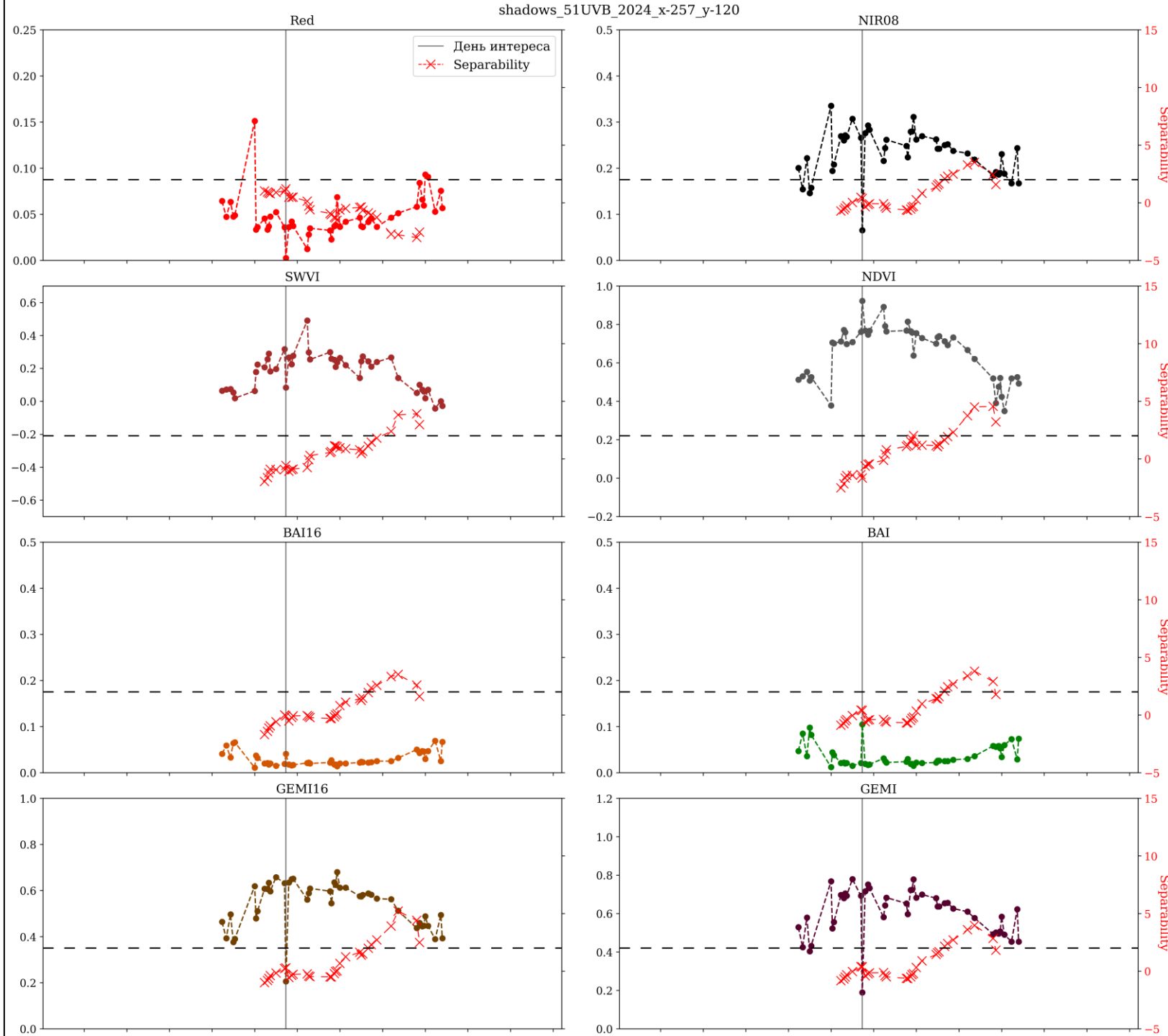
- >50% горевших пикселей тестовой выборки Sentinel-2 MSI в пикселе VIIRS
- <5% пикселей Nodata в пикселе VIIRS
- Объединение сцен *OR*

Негоревший пиксель VIIRS

- >95% негоревших пикселей тестовой выборки Sentinel-2 MSI
- <1% пикселей Nodata в пикселе VIIRS
- Объединение сцен *AND*
- Пиксели VIIRS на границе тайла MGRS (<98% площади пикселя VIIRS внутри тайла MGRS) исключаются

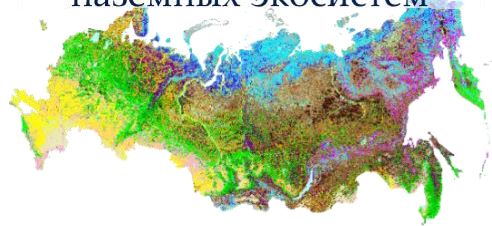
! Из-за перепроектирования исходных 375 м изображений VIIRS SDR в 463 м синусоидальную сетку в стандартном продукте VJ109, реальная доля, занимая гарью тестовой выборки Sentinel-2 MSI в пикселе VIIRS, может заметно отличаться

[Назад](#)



Временной ряд для
негоревшего участка
(Якутия).

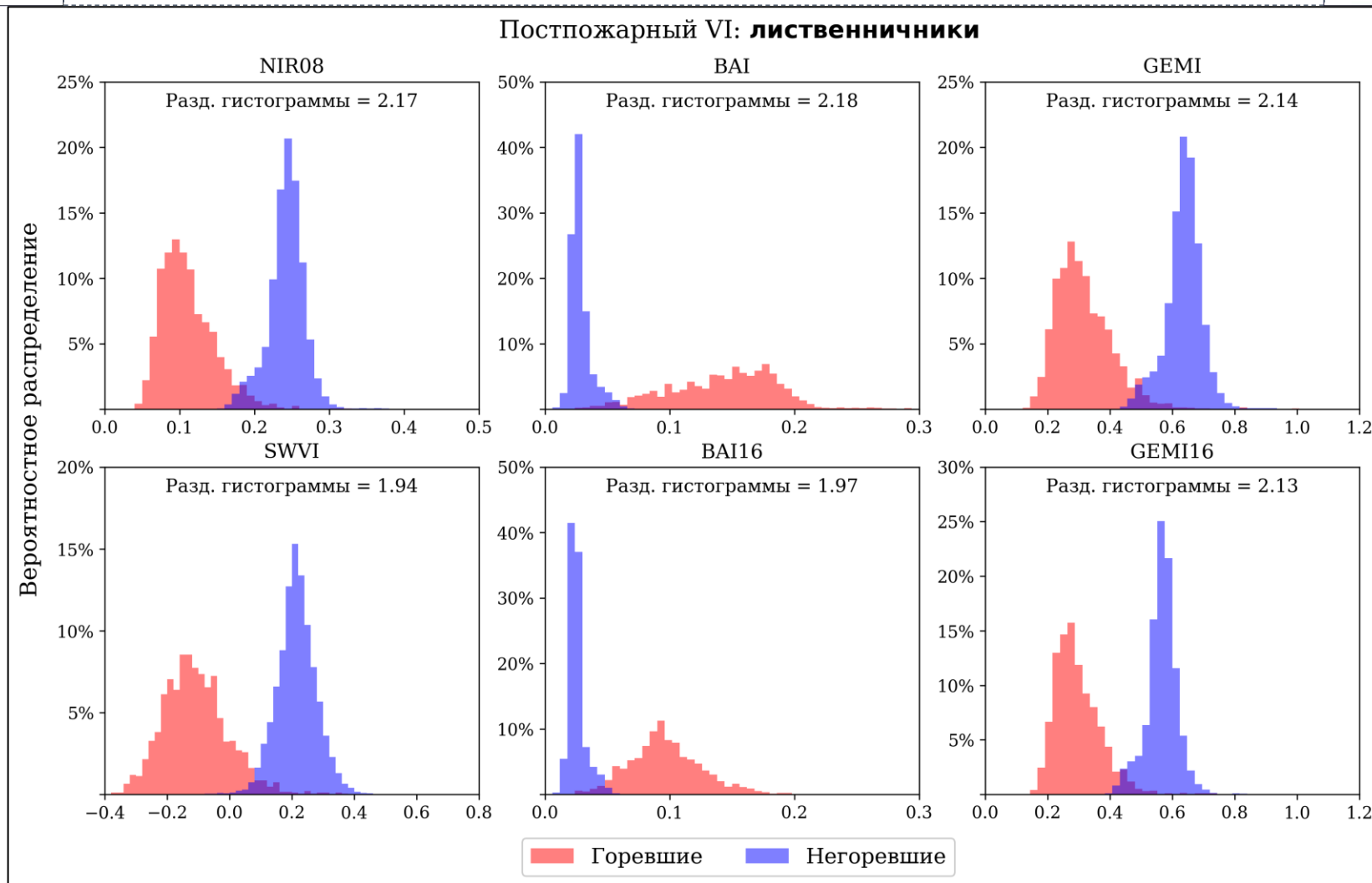
Вертикальной линией
выделено наблюдение с
затенением от облаков.

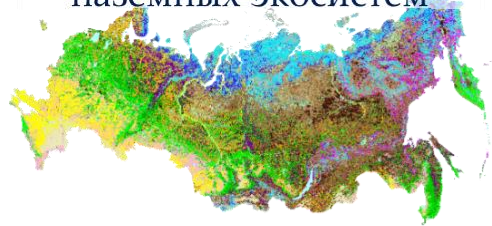


Фиксация гарей VIIRS: временная разделимость

Разделимость горевших и негоревших участков

- VI_{post} за период тестовой выборки
- [Методика получения выборки](#)

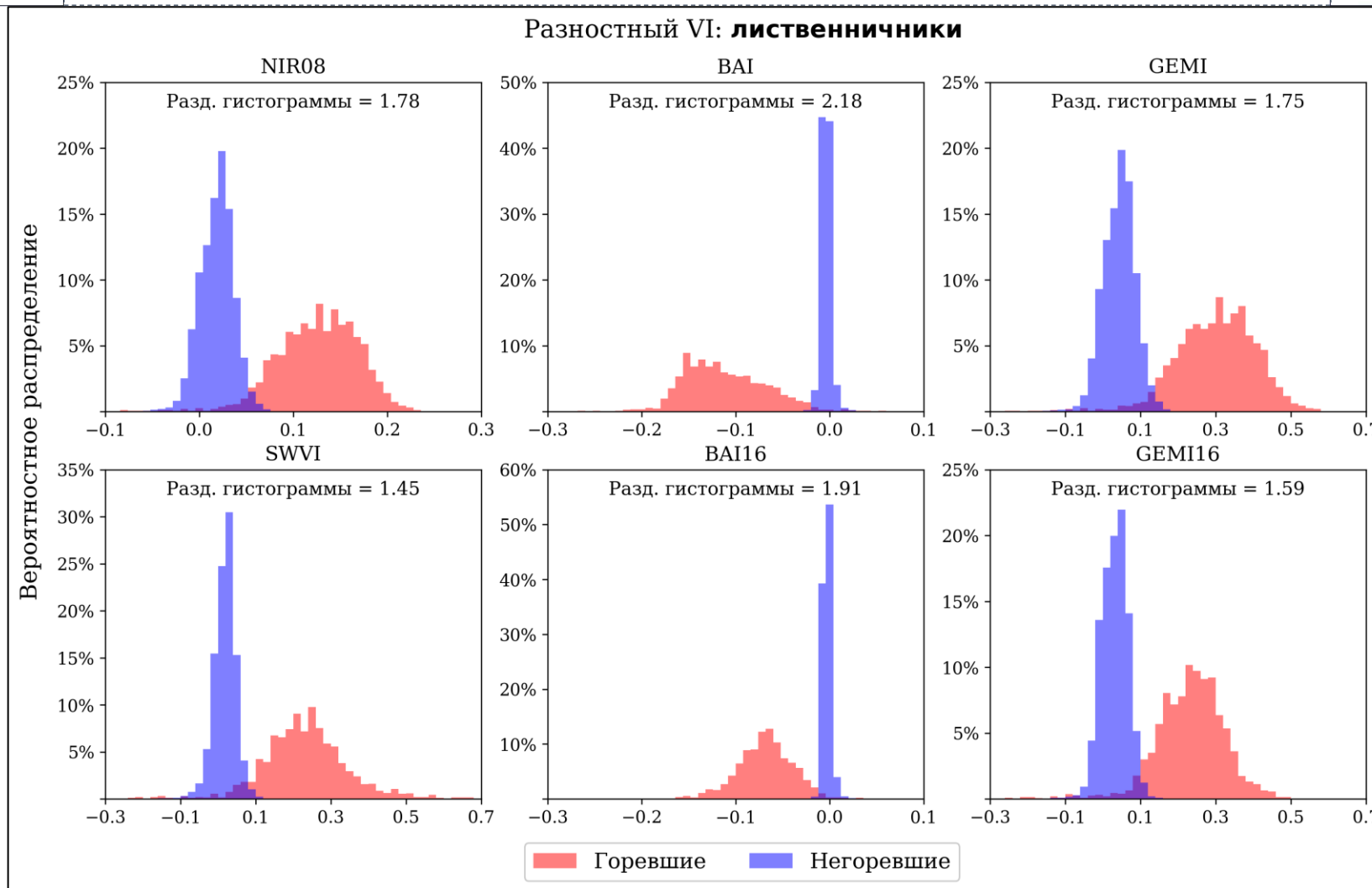


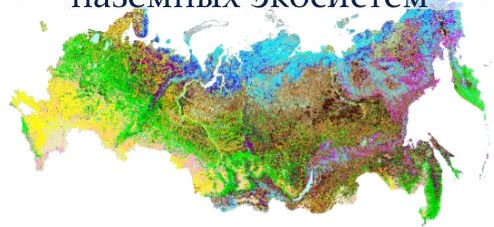


Фиксация гарей VIIRS: временная разделимость

Разделимость горевших и негоревших участков

- dVI за период тестовой выборки
- [Методика получения выборки](#)

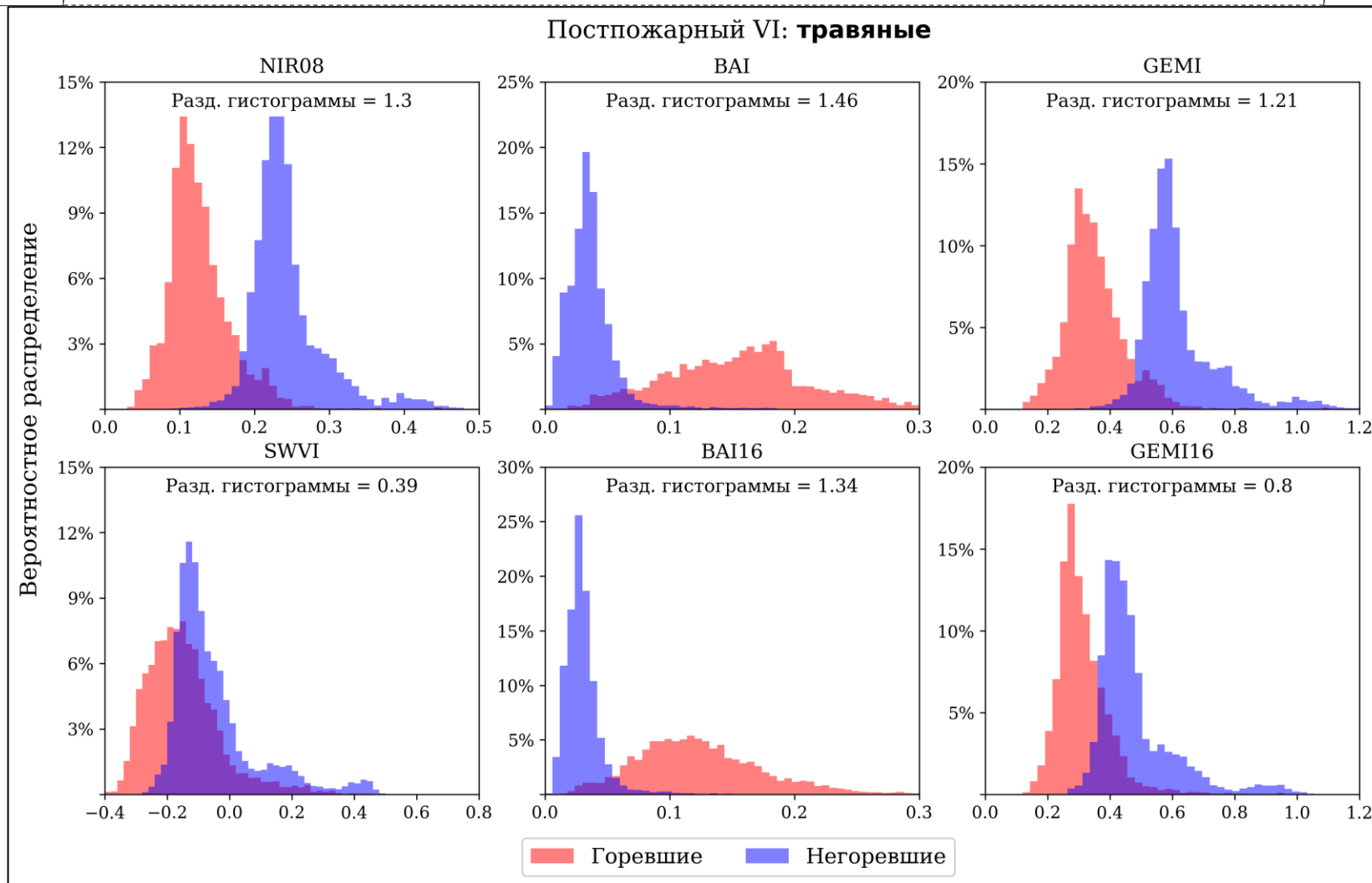


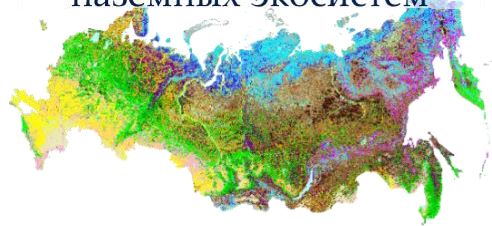


Фиксация гарей VIIRS: временная разделимость

Разделимость горевших и негоревших участков

- VI_{post} за период тестовой выборки
- [Методика получения выборки](#)

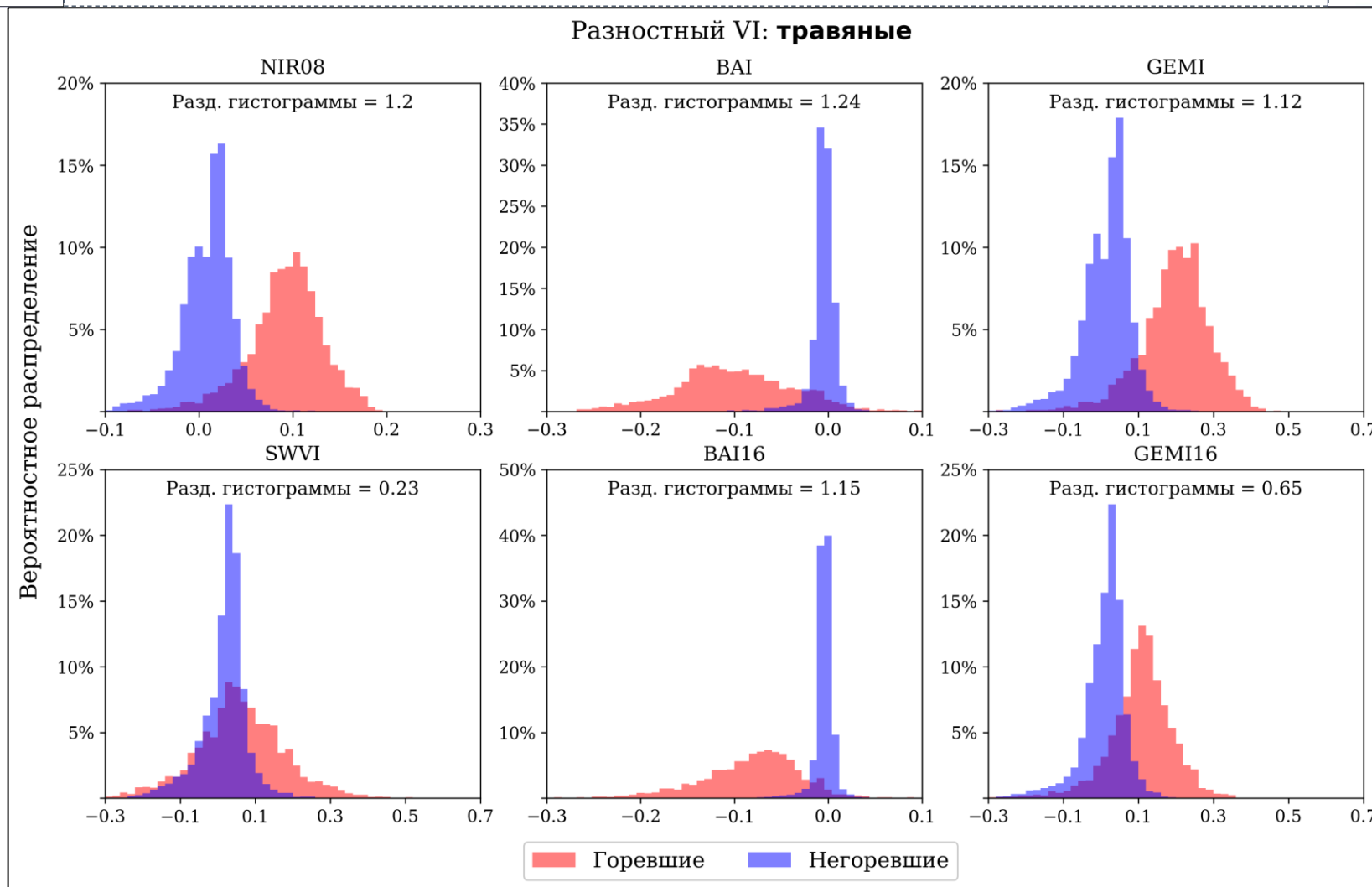


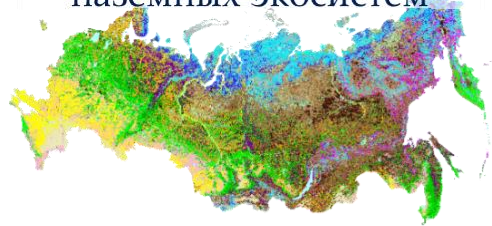


Фиксация гарей VIIRS: временная разделимость

Разделимость горевших и негоревших участков

- dVI за период тестовой выборки
- [Методика получения выборки](#)

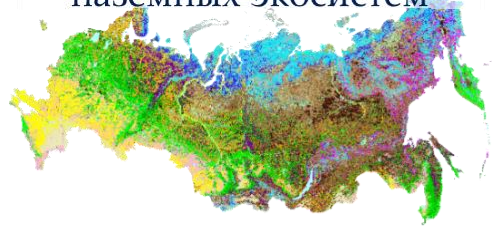




Список литературы

Продукты картографирования гарей

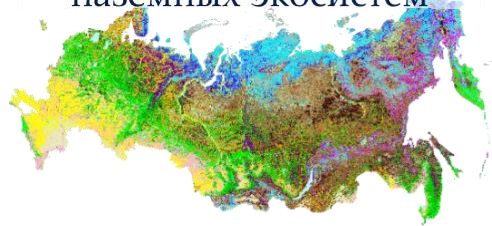
- **SRBA** (ИКИ РАН): Барталев С. А., Егоров В. А., Ефремов В. Ю., Лупян Е. А., Стыщенко Ф. В., Флитман Е. В. Оценка площади пожаров на основе комплексирования спутниковых данных различного пространственного разрешения MODIS и Landsat-TM/ETM+ // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 2. С. 9–26.
- **FireCCI51**: Lizundia-Loiola, J., Otón, G., Ramo, R., Chuvieco, E. A spatio-temporal active-fire clustering approach for global burned area mapping at 250 m from MODIS data // Remote sensing of Environment. 2020. V. 236. Article 111493. DOI: 10.1016/j.rse.2019.111493.
- **FireCCIS311**: Lizundia-Loiola, J., Franquesa, M., Khairoun, A., Chuvieco, E. Global burned area mapping from Sentinel-3 Synergy and VIIRS active fires // Remote Sensing of Environment. 2022. V. 282. Article 113298. DOI: 10.1016/j.rse.2022.113298.
- **GABAM**: Long T., Zhang Z., He G. et al. 30 m Resolution Global Annual Burned Area Mapping Based on Landsat Images and Google Earth Engine // Remote Sensing. 2019. V. 11. Iss. 5. Article 489. DOI: 10.3390/rs11050489.
- **MCD64A1 C5/C6**:
 - Giglio, L., Loboda T., Roy, D. P., Quayle B., Justice C. O. An active-fire based burned area mapping algorithm for the MODIS sensor // Remote Sensing of Environment. 2009. V. 113. P. 408–420. DOI: 10.1016/j.rse.2008.10.006
 - Giglio, L., Boschetti, L., Roy, D. P., Humber, M. L., Justice, C. O. The Collection 6 MODIS burned area mapping algorithm and product // Remote Sensing of Environment. 2018. V. 217. P. 72–85. DOI: 10.1016/j.rse.2018.08.005.
- **VNP64A1 C2**: Giglio L., Boschetti L., Roy D. P. et al. The NASA VIIRS burned area product, global validation, and intercomparison with the NASA MODIS burned area product // Remote Sensing of Environment. 2025. V. 331. Article 115006. DOI: 10.1016/j.rse.2025.115006.



Список литературы

Вегетационные индексы

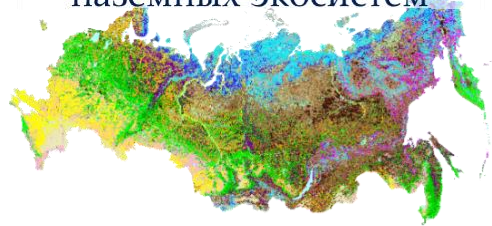
- **BAI:** Chuvieco E., Martín M.P., Palacios A., Assessment of different spectral indices in the red-near-infrared spectral domain for burned land discrimination // Int. J. of Remote Sens. 2002. V. 23. P. 5103–5110. DOI: 10.1080/01431160210153129.
Verstraete M. M., Pinty B. Designing optimal spectral indexes for remote sensing applications // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 1996. V. 34. Issue 5. P. 1254–1265. DOI: 10.1109/36.536541.
- **BAIM:** Martin M. P., Gómez I., Chuvieco E. Performance of a burned-area index (BAIM) for mapping Mediterranean burned scars from MODIS data // Proceedings of the 5th International Workshop on Remote Sensing and GIS Applications to Forest Fire Management: Fire Effects Assessment. P. 193–197.
- **CSI:** Smith A. M. S., Drake N. A., Wooster M. J. et al. Production of Landsat ETM+ reference imagery of burned areas within Southern African savannahs: comparison of methods and application to MODIS // Int. J. of Remote Sens. 2007. V. 28. P. 2753–2775. DOI: 10.1080/01431160600954704.
- **GEMI:** Pinty B., Verstraete M. M. GEMI: a non-linear index to monitor global vegetation from satellites // Plant Ecology. 1992. V. 101. P. 15–20. DOI: 10.1007/BF00031911.
- **GEMI3:** Barbosa P. M., Grégoire J-M., Pereira J. M. C. An Algorithm for Extracting Burned Areas from Time Series of AVHRR GAC Data Applied at a Continental Scale // Remote Sensing of Environment. 1999. V. 69. P. 253–263. DOI: 10.1016/S0034-4257(99)00026-7.
- **NBR:** García M. J. L., Caselles V. Mapping burns and natural reforestation using thematic Mapper data // Geocarto International. 1991. V. 6. Issue 1. P. 31–37. DOI: 10.1080/10106049109354290.
Key C., Benson N. Measuring and remote sensing of burn severity: the CBI and NBR. // Proceedings Joint Fire Science Conference and Workshop. V. II, Boise, ID, 15-17 June 1999. University of Idaho and International Association of Wildland Fire. 284 p.



Список литературы

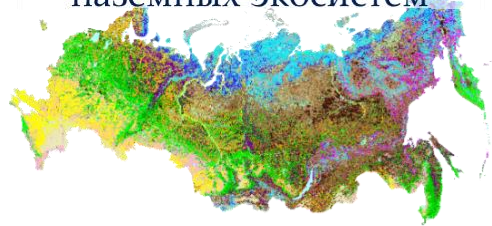
Вегетационные индексы

- **NDSI:** Dozier J. Spectral Signature of Alpine Snow Cover from the Landsat Thematic Mapper // Remote Sensing of Environment. 1989, V. 28. P. 9–22. DOI: 10.1016/0034-4257(89)90101-6.
- **NDVI:** Tucker C. J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation // Remote Sensing of Environment. 1979. V. 8. P. 127–150. DOI: 10.1016/0034-4257(79)90013-0.
- **MIRBI:** Trigg S., Flasse S. An evaluation of different bi-spectral spaces for discriminating burned shrub-savannah // International Journal of Remote Sensing. 2001. V. 22. Issue 13. P. 2641–2647. DOI: 10.1080/01431160110053185.
- **MNDWI:** Xu H. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery // International Journal of Remote Sensing. 2006. V. 27. No. 14. P. 3025–3033. DOI: 10.1080/01431160600589179.
- **SR_SWIR:** Kushla J. D., Ripple W. J. Assessing wildfire effects with Landsat thematic mapper data // Int. J. of Remote Sens. 1998. V. 19. P. 2493–2507. DOI: 10.1080/014311698214587.
- **SWVI (mNDMI):** Fraser R. H., Li Z., Landry R. SPOT VEGETATION for characterizing boreal forest fires // International Journal of Remote Sensing. 2000. V. 21. Issue 18. P. 3525–3532. DOI: 10.1080/014311600750037534.
Jürgens C. The modified normalized difference vegetation index (mNDVI) a new index to determine frost damages in agriculture based on Landsat TM data // International Journal of Remote Sensing. 1997. V. 18. Issue 17. P. 3583–3594. DOI: 10.1080/014311697216810.
- **VI:** Giglio L., Loboda T., Roy D. P., Quayle B., Justice C. O. An active-fire based burned area mapping algorithm for the MODIS sensor // Remote Sensing of Environment. 2009. V. 113. Issue 2. P. 408–420. DOI: 10.1016/j.rse.2008.10.006.
- **RdVI:** Miller J. D., Thode A. E., Quantifying burn severity in a heterogeneous landscape with a relative version of the delta Normalized Burn Ratio (dNBR), Remote Sensing of Environment, 2007, V. 109, Iss. 1, pp. 66–80, DOI: 10.1016/j.rse.2006.12.006.

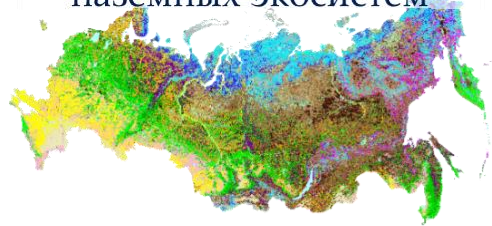


Список литературы

- Барталев С. А., Егоров В. А., Жарко В. О., Лупян Е. А., Плотников Д. Е., Хвостиков С. А., Шабанов Н. В. Спутниковое картографирование растительного покрова России. М.: ИКИ РАН, 2016. 208 с. ISBN: 978-5-00015-006-1.
- Лупян Е. А., Прошин А. А., Бурцев М. А. и др. Опыт эксплуатации и развития центра коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных (ЦКП «ИКИ-Мониторинг») // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 151–170. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.
- Матвеев А. М., Барталев С. А., Егоров В. А. и др. Валидация на территории России национальных и глобальных продуктов картографирования повреждённых пожарами ландшафтов по данным ДЗЗ // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2025. Т. 22. № 3. С. 9–30. DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-3-9-30.
- Миклашевич Т. С., Барталев С. А., Егоров В. А. Развитие предварительной обработки данных спутниковых наблюдений приборов VIIRS и MODIS для задачи мониторинга растительного покрова // Материалы 19-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». М.: ИКИ РАН, 2021. С. 366. DOI: 10.21046/19DZZconf-2021a.
- Миклашевич Т. С., Барталев С. А., Егоров В. А. Предварительная обработка спутниковых данных высокого пространственного разрешения Sentinel-2 для задач мониторинга растительного покрова // Материалы 21-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». М.: ИКИ РАН, 2023. С. 387. DOI: 10.21046/21DZZconf-2023a.
- Украинский П. А. Динамика спектральных свойств зарастающих травяных гарей // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 4. С. 229–238.

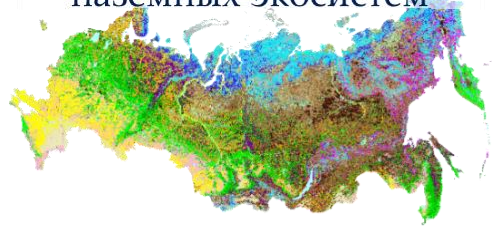


- Barbosa P. M., Grégoire J-M., Pereira J. M. C. An Algorithm for Extracting Burned Areas from Time Series of AVHRR GAC Data Applied at a Continental Scale // Remote Sensing of Environment. 1999. V. 69. P. 253–263. DOI: 10.1016/S0034-4257(99)00026-7.
- Bastarrika A., Rodriguez-Montellano A., Roteta E. et al. An automatic procedure for mapping burned areas globally using Sentinel-2 and VIIRS/MODIS active fires in Google Earth Engine // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2024. V. 218. P. 232–245. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2024.08.019/.
- Glushkov I., Zhuravleva I., McCarty J. L. et al. Spring fires in Russia: results from participatory burned area mapping with Sentinel-2 imagery // Environmental Research Letters. 2021. V. 16. Iss. 12. Article 125005. DOI: 10.1088/1748-9326/ac3287.
- Hall J. V., Argueta F., Giglio L. Validation of MCD64A1 and FireCCI51 cropland burned area mapping in Ukraine // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2021. V. 102. Article 102443. DOI: 10.1016/j.jag.2021.102443.
- Hantson S., Padilla M. Corti D., Chuvieco E. Strengths and weaknesses of MODIS hotspots to characterize global fire occurrence // Remote Sensing of Environment. 2013. V. 131 P. 152–159. DOI: 10.1016/j.rse.2012.12.004.
- Kaufman Y. J., Remer L. A. Detection of Forests Using Mid-IR Reflectance: An Application for Aerosol Studies // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 1994. V. 32. No. 3. P. 672–683. DOI: 10.1109/36.297984.
- Landsat 8-9 Collection 2 (C2) Level 2 Science Product (L2SP) Guide. Version 6.0, USGS, 2024. 37 p. https://d9-wret.s3.us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/s3fs-public/media/files/LSDS-1619_Landsat8-9-Collection2-Level2-Science-Product-Guide-v6.pdf.
- Liu P., Liu Y., Guo X. et al. Burned area detection and mapping using time series Sentinel-2 multispectral images // Remote Sensing of Environment. 2023. V. 296. Article 113753. DOI: 10.1016/j.rse.2023.113753.



Список литературы

- Loupian E., Burtsev M., Proshin A. et al. Usage Experience and Capabilities of the VEGA-Science System // Remote Sensing. 2022. V. 14. Iss. 1. Article 77. DOI: 10.3390/rs14010077.
- Melchiorre A., Boschetti L. Global Analysis of Burned Area Persistence Time with MODIS Data // Remote Sensing. V. 10. Article 750. DOI: 10.3390/rs10050750.
- Oliva P., Martín P., Chuvieco E. Burned area mapping with MERIS postfire image // International Journal of Remote Sensing. V. 32. Iss. 15. P. 4175–4201, DOI: 10.1080/01431161.2010.489062.
- Pereira J. M. C. A comparative evaluation of NOAA/AVHRR vegetation indexes for burned surface detection and mapping // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 1999. V. 37. P. 217–26.
- Pickens A. H., Hansen M. C., Hancher M. et al. Mapping and sampling to characterize global inland water dynamics from 1999 to 2018 with full Landsat time-series // Remote Sensing of Environment. 2020. V. 243. Article 111792. DOI: 10.1016/j.rse.2020.111792.
- Schroeder W., Olivia P., Giglio L. et al. Active fire detection using Landsat-8/OLI data // Remote Sensing of Environment. 2016. V. 185. P. 210–220. DOI: 10.1016/j.rse.2015.08.032.
- Schroeder W., Giglio L., Hall J., Collection 2 Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS) 375-m Active Fire Product User's Guide, Version 1.0., NASA, 2024, 16 p., https://lpdaac.usgs.gov/documents/427/VNP14_User_Guide_V1.pdf.
- Sen2Cor Configuration and User Manual. Issue 1. 61 p. <https://step.esa.int/thirdparties/sen2cor/2.10.0/docs/S2-PDGS-MPC-L2A-SUM-V2.10.0.pdf>.



Список литературы

- Stroppiana D., Sali M., Busetto L. et al., Sentinel-2 sampling design and reference fire perimeters to assess accuracy of Burned Area products over Sub-Saharan Africa for the year 2019 // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2022. V. 191. P. 223–234. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2022.07.015.
- 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 // International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation. 2021. V. 97. Article 102296. DOI: 10.1016/j.jag.2021.102296.
- Zanaga D., van de Kerchove R., Daems D. et al. ESA WorldCover 10 m 2021 v200. Zenodo. 2022. <https://zenodo.org/records/7254221>.