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.

Оценка точности спутниковых данных низкого пространственного разрешения при картографировании природных пожаров и определении объемов эмиссий климатически активных газов и аэрозолей на Дальнем Востоке России

Феоктистова Н.В., Воронова О.С., Зима А.Л., Чернова В.А.

Научно-исследовательский институт аэрокосмического мониторинга «АЭРОКОСМОС»

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

Введение

Природные пожары относятся к числу наиболее катастрофических стихийных бедствий, оказывающих масштабное воздействие на социально-экономические системы, здоровье людей, качество воздуха и глобальный углеродный баланс (Бондур, 2025; Гераськина и др., 2021; Доклад…, 2026, Bowd et al., 2021). Рост числа природных пожаров, связанных, в том числе, с изменением климатических условий, представляет собой растущую угрозу жизни, здоровью и имуществу человека. Помимо непосредственного уничтожения растительности и инфраструктуры, лесные пожары приводят к значительным выбросам парниковых газов, включая климатически значимые углеродсодержащие газы CO_2, CO, CH_4 и мелкодисперсные аэрозоли $PM_{2.5}$ (Бондур, Гинзбург, 2016; Liu et al., 2017, Andreae, 2019). Эти выбросы способствуют не только региональному и глобальному радиационному воздействию на климат, но и протеканию вторичных атмосферных процессов, ухудшают качество воздуха и повышают риски для здоровья даже после завершения активной фазы пожаров (Третий оценочный доклад, 2022; Метан и климатические изменения…,2022).

Оценки площадей природных пожаров, и вызываемых ими эмиссий климатически значимых газов, осуществляемые по спутниковым данным, могут значительно отличаться друг от друга (Бондур и др., 2024). Это связано с тем, что они зависят от используемых средств дистанционного зондирования, методов и алгоритмов оценки площадей выгоравших участков, надежности информации о типах растительного покрова, и др. (Швиденко, Щепащенко, 2013; Бондур, Гордо, 2018).

Глобальные информационные продукты о гарях, связанных с природными пожарами, основанные на использовании спутниковых данных, имеют большой охват и низкое пространственное разрешение. Это приводит к пропуску малых выгоревших площадей и недооценке площадей природных пожаров с неоднородной структурой, обусловленной сложными режимами горения (Laris, 2005; Boschetti et al., 2016, Матвеев, Барталев, 2025). Проблема ошибок, вызванных низким пространственным разрешением таких информационных продуктов, имеют решающее значение для картирования выгоревших территорий и при оценке объемов эмиссий климатически активных газов.

В настоящей работе приводятся результаты сопоставления спутниковых данных низкого (500 м) и среднего (30 м) пространственного разрешения. Получены средние абсолютные ошибки определения площадей выгоревших участков для наиболее распространенных типов растительности Дальневосточного региона России. Получены коэффициенты, корректирующие ошибки, связанные с низким пространственным разрешением глобальных спутниковых информационных продуктов и рассчитаны объемы пожарных эмиссий климатически активных газов с 2020 по 2026 гг. с использованием модифицированной формулы Сейлера-Крутцена.

Ключевые слова: природные пожары, гари, дистанционное зондирование Земли, спутниковые данные, информационные продукты, эмиссии углеродсодержащих газов и аэрозолей.

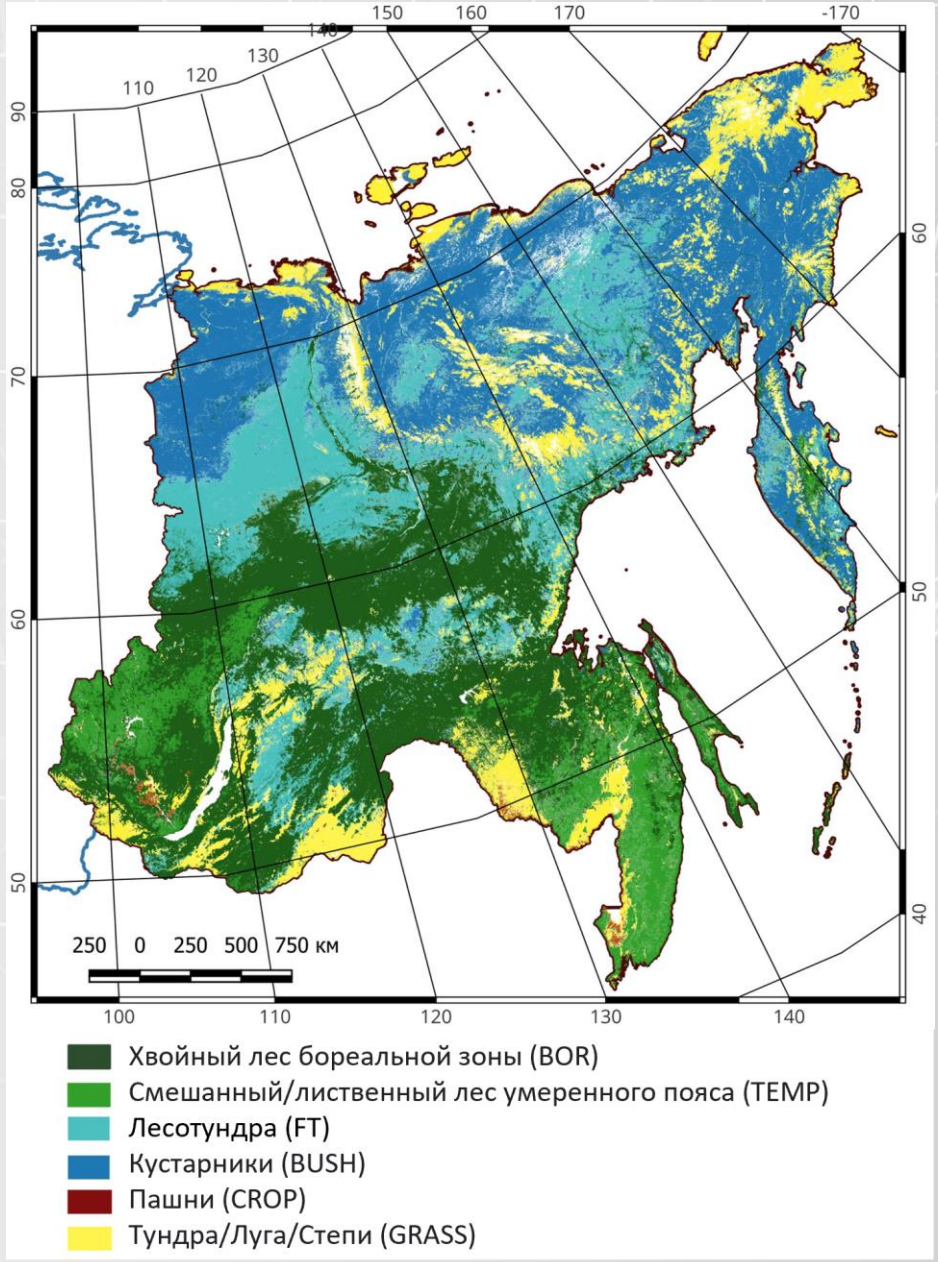
Территория исследования

Анализ итогов пожароопасных сезонов 2024 и 2025 гг. на территории Российской Федерации показал, что до 90% площадей лесных пожаров приходились на пять ее субъектов (https://rosleshoz.gov.ru): Республика Саха (Якутия); Забайкальский край; Амурская область; Республика Бурятия; Хабаровский край. Все они относятся к территории Дальневосточного федерального округа (ДФО) России.

Леса этого региона отличаются высокой степенью пожарной опасности и горимостью по сравнению с другими регионами Российской Федерации (Матвеева, 2021). Значительную часть территории этого региона занимают бореальные леса, играющие важнейшую роль в сохранении углеродного баланса в атмосфере и в смягчении глобальных климатических изменений (Филипчук и др., 2020).

Из-за отсутствия наземной транспортной инфраструктуры существенная доля территории Дальнего Востока России относится к зоне контроля лесных пожаров, установленной Федеральным агентством лесного хозяйства. В этой зоне тушение лесных пожаров не проводится, поскольку оно экономически нецелесообразно из-за отсутствия угрозы населению. На всей территории Российской Федерации площадь зон контроля лесных пожаров составляет 466.920 млн. га, а на территории Дальневосточного федерального округа она составляет более 284.4 млн. га (https://rosleshoz.gov.ru).

Это приводит к тому, что природные пожары в этом регионе могут продолжаться несколько месяцев и приводить к выгоранию особо крупных участков территорий (Бондур и др., 2025). При этом экологический ущерб от природных пожаров, происходящих на этих территориях, в стоимостном выражении может в несколько раз превышать прямой ущерб от таких пожаров в других регионах (Зиновьева, 2012).



Территория исследования

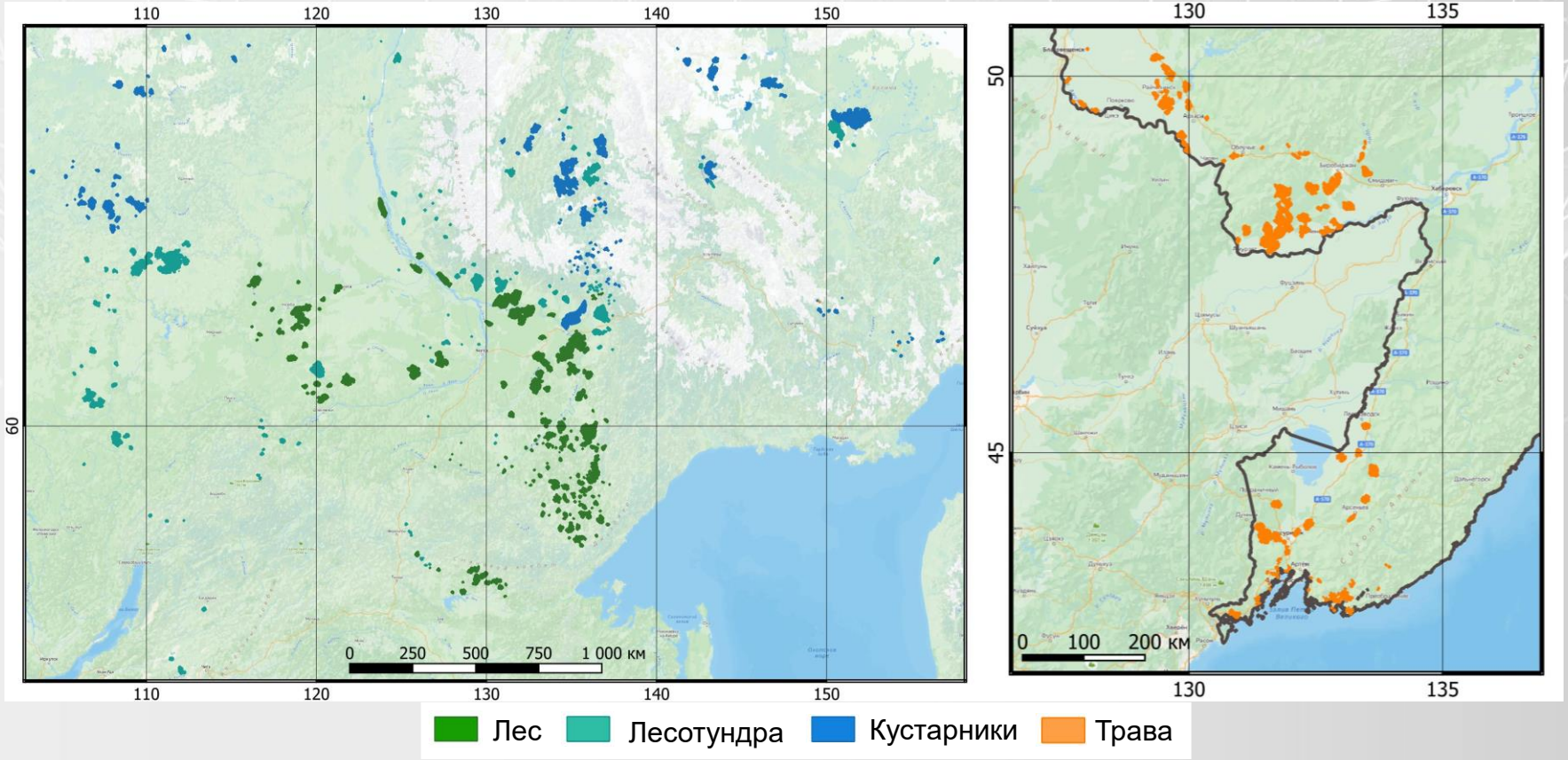
Для проведения исследований нами были выбраны тестовые участки на территории ДФО России с преобладающими **4** типами растительности, которые наиболее часто подвергаются горению в исследуемом регионе: **лесная** растительность (хвойные леса бореальной зоны и леса умеренного пояса); **лесотундра** (разреженные леса с покрытием 10-30%); **кустарниковая и травянистая растительность**.

Всего на территории исследуемого региона было отобрано **539** тестовых участка за период с 2020 по 2024 гг. В качестве тестовых участков для травянистой растительности были отобраны участки гарей в Хабаровском крае и в Приморье, где преобладают луговые пожары в весенние и осенние периоды.

Площади таких выгоревших тестовых участков составили от 0.39 до 2555 км^2 (средняя площадь 126 км^2).

Были выявлены участки, где по данным спутниковой аппаратуры низкого разрешения не было обнаружено гарей, в том числе: 126 участков площадью до 200 км^2, не выявленных по данным аппаратуры MODIS и 109 участков площадью до 20 км^2, не выявленных по данным аппаратуры VIIRS.

Средняя площадь участков с пропущенными гарями по данным аппаратуры MODIS составляла 16.62 км^2, а по данным аппаратуры VIIRS - 8.1 км^2.



Методика проведения исследования и используемые данные

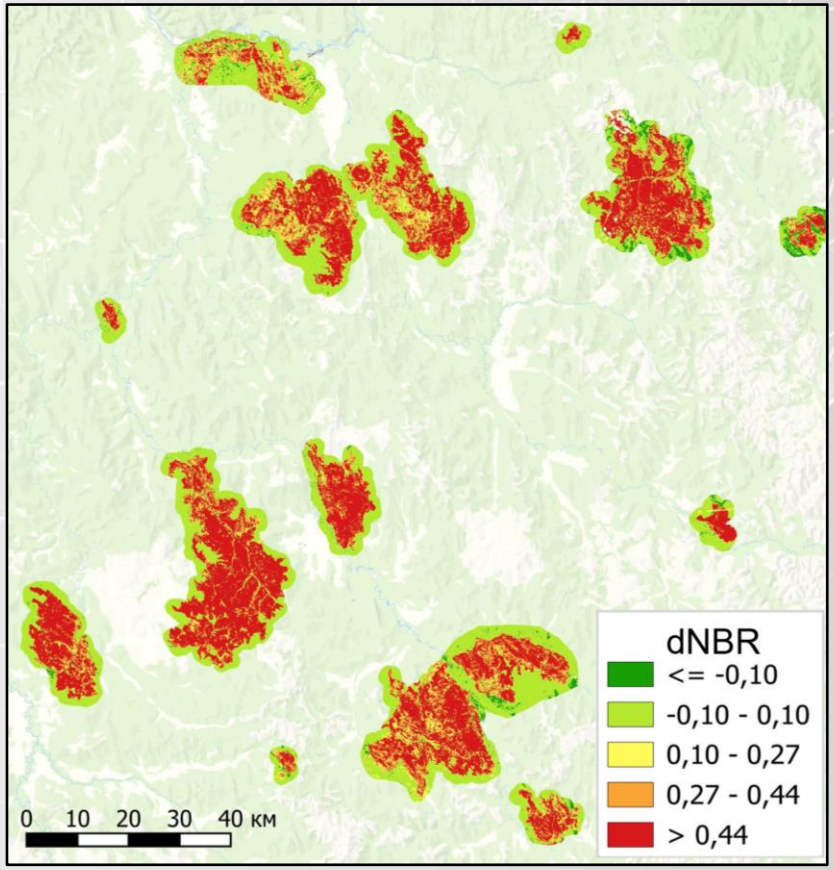
Информационный продукт/прибор	Краткое описание данных	Пространственное разрешение	Исследуемые объекты
MCD64A1/ MODIS	Ежемесячные данные MODIS о выгоревших площадях	500 м	Выгоревшие площади
VNP64A1/ VIIRS	Ежемесячные данные VIIRS о выгоревших площадях	500 м	Выгоревшие площади
Landsat 8/ OLI/TIRS	Данные Landsat 8 OLI/TIRS Уровень 2, скорректированная отражательная способность поверхности.	30 м	Разностный нормализованный индекс гарей dNBR, площади гарей
MCD12Q1/ MODIS	Тип землепользования по данным MODIS	500 м	Тип выгоревшей растительности
MCD14DL/ MODIS	Тепловые аномалии/пожары MODIS	1000 м	Выявленные участки горения, даты начала и окончания пожаров

1) Для получения опорных оценок площадей природных пожаров (гарей) на выбранных тестовых участках рассчитывались нормализованный индекс гарей (NBR) и разностный нормализованный индекс гарей (dNBR) по данным среднего пространственного разрешения, получаемым со спутника Landsat 8.

Расчеты проводились на платформе для научного анализа и визуализации геопространственных данных Google Earth Engine (https://earthengine.google.com/). При получении данных применялась фильтрация изображений по наличию облачности, а также производилось маскирование облаков и водных поверхностей. Далее были проведены процедуры векторизации и агрегации пикселей со значениями выше порогового уровня для гарей (dNBR > 0.10) (Keeley, 2009), в результате были получены контуры выгоревших участков и рассчитаны их площади.

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

$$dNBR = NBR_{\text{до_пожара}} - NBR_{\text{после_пожара}}$$



Пример выгоревших участков с рассчитанным разностным нормализованным индексом гарей dNBR

Методика проведения исследования

2) Для оценки точности определения площадей выгоревших участков с использованием спутниковых информационных продуктов MCD64A1 и VNP4A1 анализировалась средняя абсолютная процентная ошибка MAPE (Mean Absolute Percentage Error) (Calp and Kose, 2020):

$$MAPE = \frac{100\%}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|\frac{S_i^{\text{o}}-S_i^{\text{p}}}{S_i^{o}}\right|,$$

где S_i^{o}- опорные площади выгоревших участка, рассчитанные по данным спутника Landsat-8; S_i^{p}- оцениваемые площади участков, рассчитываемые по данным спутниковых приборов MODIS (информационный продукт MCD64A1) и VIIRS (информационный продукт VNP64A1); n – количество выгоревших участков.

3) Для получения корректирующей поправки k, были рассчитаны отношения опорных значений, полученных по данным спутника Landsat 8 к оцениваемым значениям, полученным по глобальным спутниковым информационным продуктам MCD64A1 и VNP64A1:

$$\text{k}i = \frac{S_i^{o}}{S_i^{p}}$$

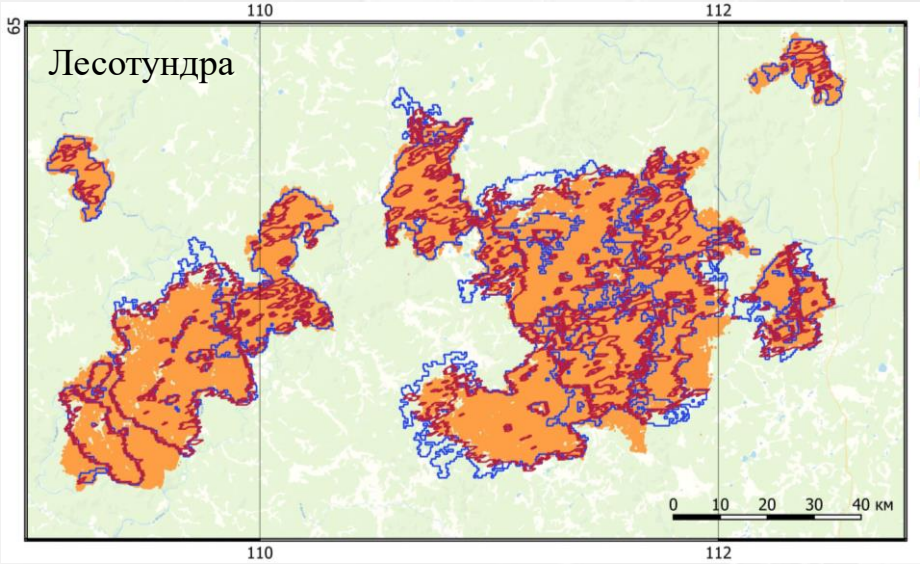
4) Для оценки объемов вызванных пожарами эмиссий применялась формула Сейлера–Крутцена (Seiler, Crutzen, 1980), модификация которой была предложена в работе (Бондур, Гордо, 2018):

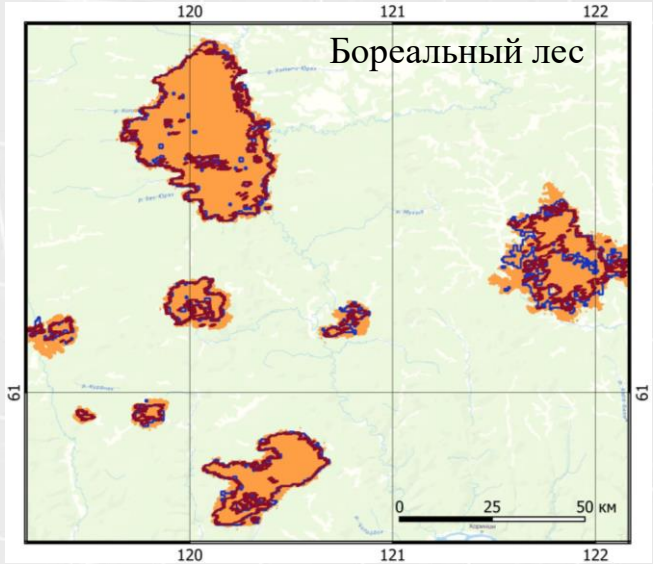
$$E = k \times A \times B \times C \times D,$$

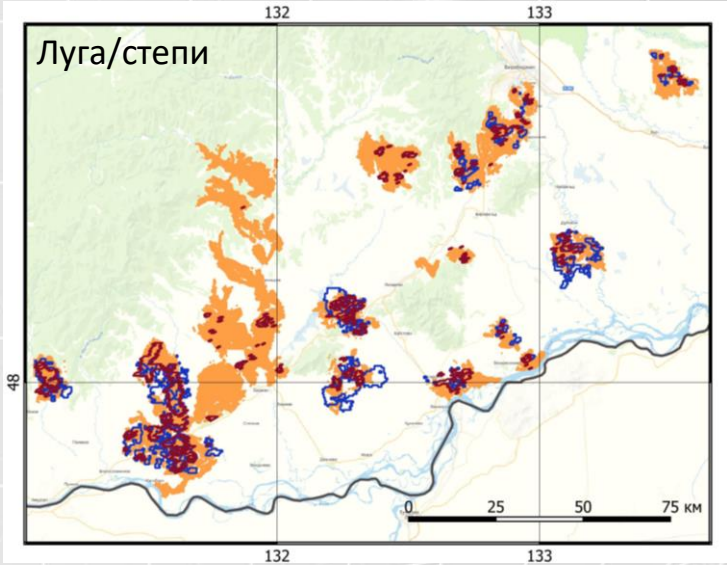
где E – общая масса вещества, выбрасываемого в атмосферу в результате пожара (г); k – корректирующий коэффициент для каждого типа растительности; A – площадь пожара (м^2); B – плотность биомассы на выгоревшей территории (кг/м^2); C – полнота сгорания биомассы (%); D – эмиссионные коэффициенты для каждого типа растительности и типа эмитируемых веществ (Wiedinmyer et al., 2011; Andreae, 2019).

Результаты исследования

Примеры совмещения данных MCD64A1 и VNP64A1 и опорных данных о выгоревших участках на основе Landsat 8





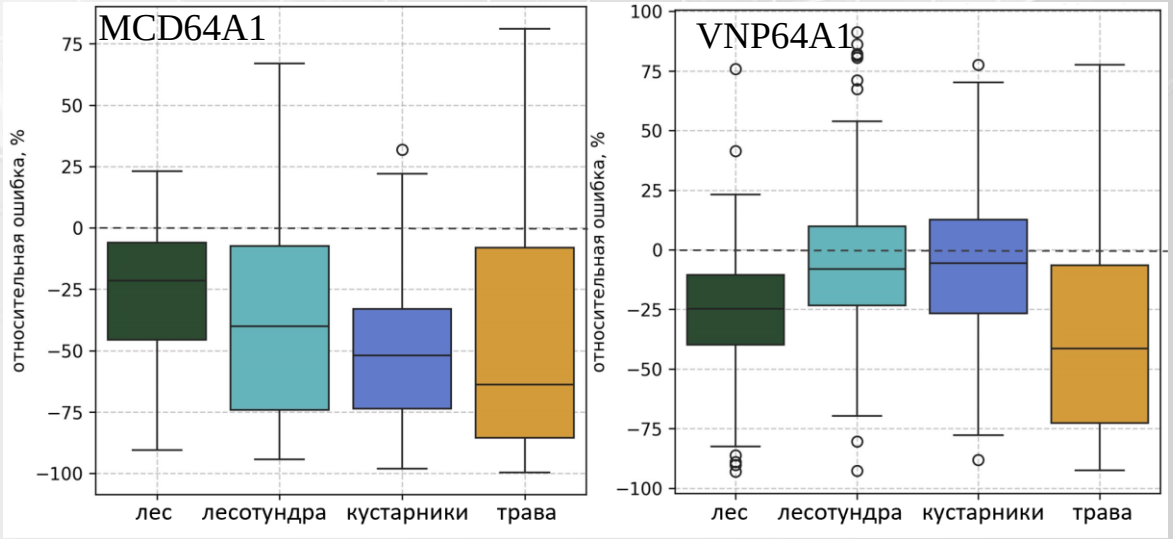


MCD64A1 VNP64A1 Landsat 8

Показатели точности информационных продуктов о выгоревших площадях MCD64A1 (MODIS) и VNP64A1 (VIIRS) для 4-х разных типов растительности

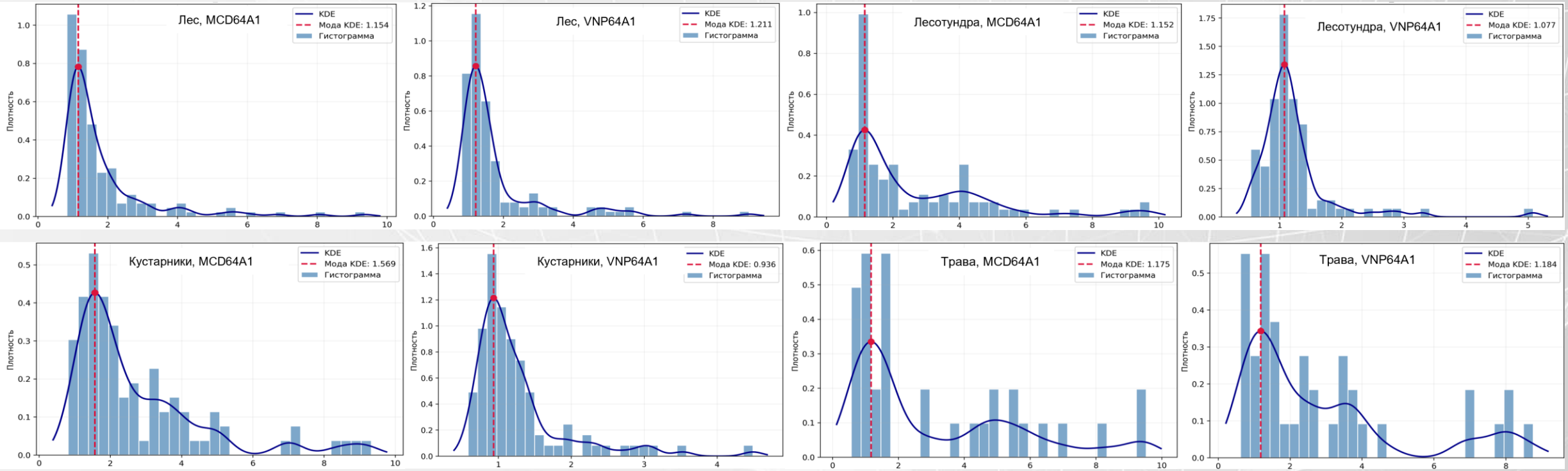
Тип растительности	Количество тестовых участков	Количество участков с пропущенными гарями		Пропущенные гари, % от площади		Средняя абсолютная ошибка MAPE, %	
		MODIS	VIIRS	MODIS	VIIRS	MODIS	VIIRS
Лес	173	15	26	4.6	0.33	31.68	31.45
Лесотундра	119	33	22	1.27	0.36	46.24	26.71
Кустарники	133	24	18	0.52	0.24	52.27	26.87
Трава	114	54	43	29.23	21.11	58.57	51.44

Распределение относительных ошибок определения площадей выгоревших участков для разных типов растительности



Результаты исследования

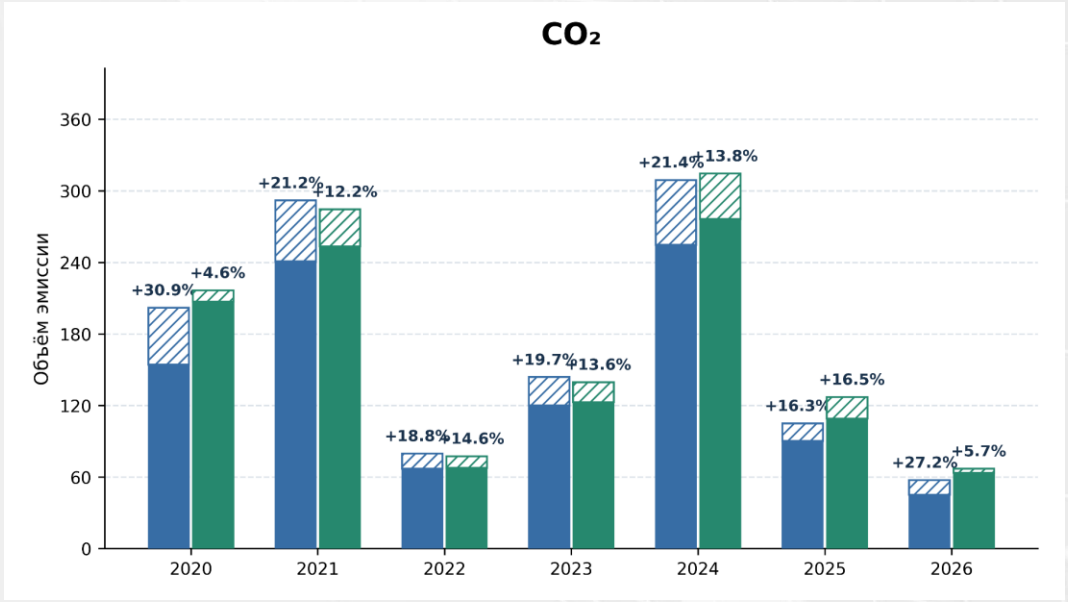
Для выбора наиболее типичного значения k при условии наличия длинного «хвоста» выбросов и недостаточно большого размера выборки использовалось самое частое значение - мода. Для непрерывных величин k_i мода определялась с использованием метода оценки плотности вероятности KDE (Kernel Density Estimation) как значение с наибольшей плотностью вероятности.

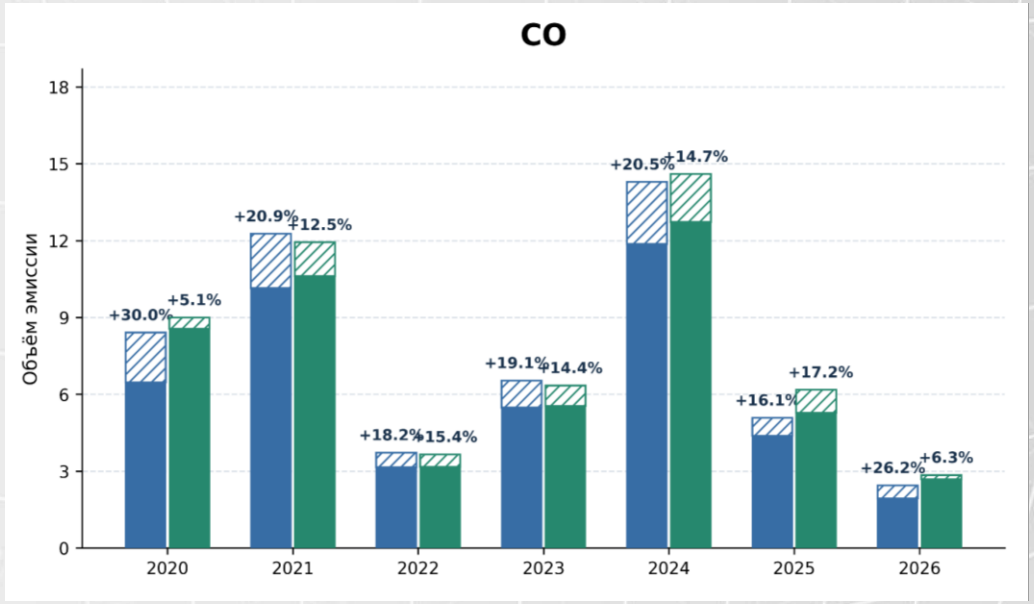


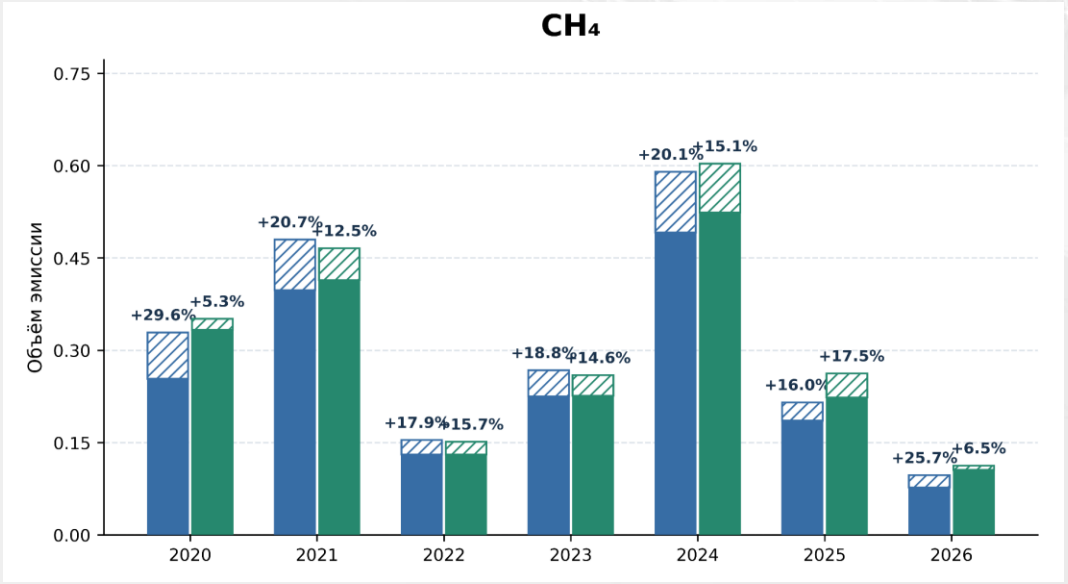
Полученные коэффициенты k были использованы для перерасчета площадей выгоревших участков из выборки, определяемых по спутниковым информационным продуктам MCD64A1 и VNP64A1, и рассчитаны скорректированные ошибки $MAPE_к$:

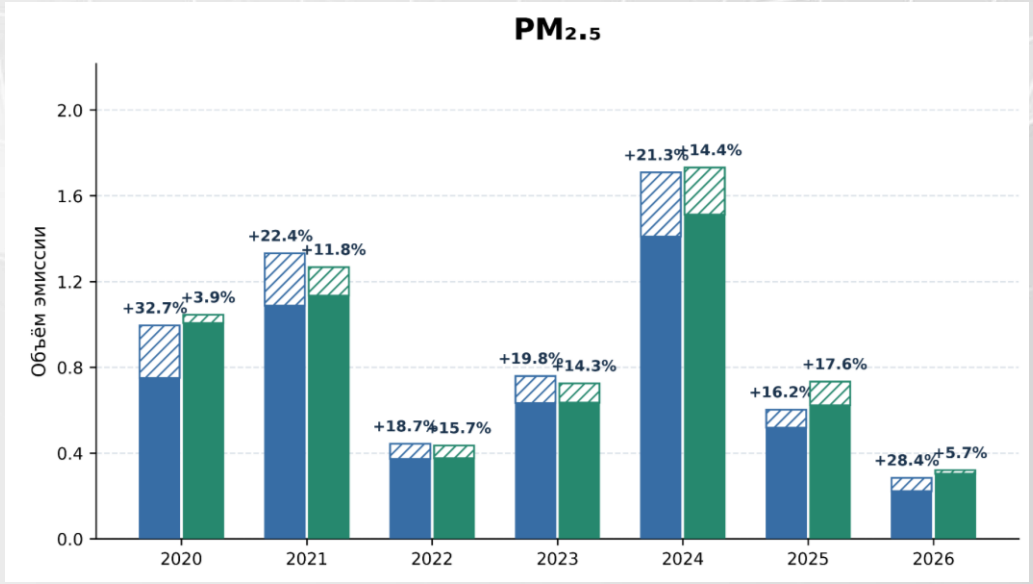
Тип растительности	Средняя абс. ошибка MAPE, %		Корректирующий коэффициент k		Скорректированная ошибка MAPEк, %		Разница MAPE - MAPEк, %	
	MODIS	VIIRS	MODIS	VIIRS	MODIS	VIIRS	MODIS	VIIRS
Лес	31.68	31.45	1.154	1.211	27.36	26.14	4.32	5.31
Лесотундра	46.24	26.71	1.152	1.077	42.13	25.61	4.11	1.1
Кустарники	52.27	26.87	1.569	0.936	40.72	25.51	11.55	1.36
Трава	58.57	51.44	1.175	1.184	51.58	48.45	6.99	2.99

Ежегодные объемы эмиссий углеродсодержащих газов CO_2, CO, CH_4 и мелкодисперсных аэрозолей $PM_{2.5}$ рассчитанные с учетом корректирующего коэффициента k (суммарно для всех типов растительности, млн тонн)









MCD64 — Объём эмиссий VNP64 — Объём эмиссий Относительные изменения (%)

Выводы

Установлено, что для данных, полученных с использованием спутникового информационного продукта MCD64A1, характерна большая недооценка площадей выгоравших территорий, особенно для лесотундры и кустарниковой растительности (средние абсолютные ошибки составляли 46.24% и 52.27% соответственно). Для данных, полученных с использованием информационного продукта VNP64A1, наоборот, для лесотундры и кустарниковой растительности недооценка была меньше, а точность определения площадей выгоревших участков исследуемой территории была выше (средние абсолютные ошибки составляли 26.71% и 26.87% соответственно).

Показано, что средняя площадь участков с пропущенными гарями по данным MCD64A1 в два раз больше, чем по данным продукта VNP64A1 (16.62 км^2 и 8.10 км^2 соответственно). Следовательно, использование информационного продукта VNP64A1 (аппаратура VIIRS) позволяло лучше выявлять выгоревшие участки малой площади и, соответственно, более точно определять неоднородные выгоревшие участки по сравнению с использованием информационного продукта MCD64A1 (аппаратура MODIS). Это связано с тем, что аппаратура VIIRS более чувствительна к небольшим очагам возгорания и очагам слабой интенсивности по сравнению с аппаратурой MODIS (Fu Y et al., 2020).

Применение полученных корректирующих коэффициентов позволило снизить абсолютную процентную ошибку определения площадей выгоревших участков на территории Дальнего Востока России по данным информационного продукта MCD64A1 (спутниковая аппаратура MODIS) на 4.11 – 11.55%, а по данным информационного продукта VNP64A1(спутниковая аппаратура VIIRS) на 1.1 – 5.31%.

С использованием модифицированной формулы Сейлера-Крутцена получены оценки ежегодных объемов эмиссий климатически значимых углеродсодержащих газов CO_2, CO, CH_4 и мелкодисперсных аэрозолей $PM_{2.5}$, вызванных природными пожарами за период с 2020 по 2026 гг. Полученные результаты показали, что ежегодные объемы пожарных климатически значимых эмиссий углеродсодержащих, полученных по данным спутникового информационного продукта MCD64A1 за период с 2020 по 2026 гг., после корректировки увеличились на 16.0 - 32.7 % в зависимости от типа эмиссий, а для данных VNP64A1 увеличение составило 3.9 – 17.6 %.

Исследование выполнено в НИИ «АЭРОКОСМОС» в рамках проекта №124021200003-1.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бондур В.Г. Космический мониторинг природных катастроф для их предупреждения и снижения последствий /В кн. Природные опасности и катастрофы: история, прогноз, защита / под ред. В.Г. Бондура, Г.И. Долгих, А.А. Родионова. СПб.: Изд-во СПбГЭУ, 2025. С. 11-26.
2. Гераськина А.П., Тебенькова Д.Н., Ершов Д.В., Ручинская Е.В., Сибирцева Н.В., Лукина Н.В. Пожары как фактор утраты биоразнообразия и функций лесных экосистем // Вопросы лесной науки. 2021. Т. 4, №. 2, 76 с. https://doi.org/10.7868/S3034540525050022
3. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2025 год. – Москва, 2026. – 129 стр.
4. Bowd E.J.; Blair D.P.; Lindenmayer D.B. Prior Disturbance Legacy Effects on Plant Recovery Post-High-Severity Wildfire // Ecosphere 2021, 12. https://doi.org/10.1002/ecs2.3480.
5. Бондур В.Г., Гинзбург А.С. Эмиссия углеродсодержащих газов и аэрозолей от природных пожаров на территории России по данным космического мониторинга // Доклады академии наук. 2016. Т. 466. № 4. С. 473–477. https://doi.org/10.7868/S0869565216040186
6. Liu W., Lu F., Luo Y. et al. Human influence on the temporal dynamics and spatial distribution of forest biomass carbon in China // Ecology Evolution. 2017. Vol.7 (16). P. 6220–6230. https://doi.org/10.1002/ece3.3188.
7. Andreae M.O. Emission of trace gases and aerosols from biomass burning – an updated assessment // Atmos. Chem. Phys. 2019. 19, P. 8523–8546. https://doi.org/10.5194/acp-19-8523-2019
8. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. – СПб.: Наукоемкие технологии, 2022. – 124 с.
9. Метан и климатические изменения: научные проблемы и технологические аспекты. Под ред. В.Г. Бондура, И.И. Мохова, А.А. Макоско. М.: РАН. 2022. 388 с.
10. Бондур В.Г., Зима А.Л., Феоктистова Н.В. Долговременный спутниковый мониторинг различных типов природных пожаров и эмиссий климатически - активных газов и аэрозолей от них на территории России и ее крупных регионов / Исследование Земли из космоса. 2024. № 5. С. 19–34. https://doi.org/10.31857/S0205961424050021.
11. Швиденко А.З., Щепащенко Д.Г. Климатические изменения и лесные пожары в России // Лесоведение. 2013. №5. С. 50–61.
12. Бондур В.Г., Гордо К.А. Космический мониторинг площадей, пройденных огнем, и объемов эмиссий вредных примесей при лесных и других природных пожарах на территории Российской Федерации // Исследование Земли из космоса. 2018. № 3. С. 41–55. https://doi.org/10.7868/S020596141803003X.
13. Laris P. S. Spatiotemporal problems with detecting and mapping mosaic fire regimes with coarse-resolution satellite data in savanna environments // Remote Sensing of Environment, Volume 99, Issue 4. 2005. pp. 412-424, ISSN 0034-4257
14. Boschetti L., Stehman S.V., Roy D.P. A stratified random sampling design in space and time for regional to global scale burned area product validation // Remote Sens. Environ. 2016. 186. 465–478.
15. Матвеев А. М., Барталев С. А. Анализ пространственной точности продуктов спутникового картографирования гарей на территории России. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2025. Т. 22. №5. С. 178–194. https://doi.org/10.21046/2070-7401-2025-22-5-178-194
16. Матвеева А.Г. Динамика лесных пожаров на Дальнем Востоке России // Сибирский лесной журнал. 2021. № 6. С. 30–38. https://doi.org/10.15372/SJFS20210603.
17. Филипчук А.Н., Малышева Н.В., Золина Т.А., Югов А.Н. Бореальные леса России: возможности для смягчения изменения климата // Лесохозяйственная информация, 2020. №1 С. 92-113. https://doi.org/10.24419/LHI.2304-3083.2020.1.10.
18. Зиновьева И. С. Оценка ущерба от лесных пожаров // Вестник Московского университета. Сер. 6, Экономика. 2012. № 4. - С. 88-95.
19. Keeley J. E. Fire intensity, fire severity and burn severity: A brief review and suggested usage // International Journal of Wildland Fire. 2009. Vol. 18, no. 1. Pp. 116–126. https://doi.org/10.1071/WF07049
20. Fu Y., Li R., Wang X., Bergeron Y., Valeria O., Chavardès R. D., Wang Y., Hu J. Fire Detection and Fire Radiative Power in Forests and Low-Biomass Lands in Northeast Asia: MODIS versus VIIRS Fire Products // Remote Sensing, 12(18), 2870. 2020. https://doi.org/10.3390/rs12182870