

Валидация на территории России национальных и глобальных продуктов картографирования повреждённых пожарами ландшафтов по данным ДЗЗ

А. М. Матвеев, С. А. Барталев, В. А. Егоров,
И. А. Сайгин, Ф. В. Стыщенко, С. С. Шинкаренко

*Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия
E-mail: matveevhwre@gmail.com*

Представлены результаты оценки точности картографирования пройденной пожарами территории России по данным национального продукта ДЗЗ SRBA (*англ.* Surface Reflectance Burnt Area), разработанного в Институте космических исследований РАН, и глобальных продуктов CGLS Burned Area 300m 3.1 NTC (CGLS BA 3.1), FireCCI51, FireCCIS311, GABAM, MCD64A1 C6 и VNP64A1 C2. Используемые опорные выборки охватывают всю территорию страны и включают в себя более 1 млн км² повреждённых огнём участков, выявленных по данным ДЗЗ пространственного разрешения 10–30 м. Полученные оценки свидетельствуют о высокой точности картографирования лесных гарей всеми представленными продуктами в летний период при использовании критерия F1-score, или индекса Сёренсена–Дайса ($DC = 0,65–0,8$), с наиболее высокими показателями у продукта SRBA ($DC = 0,83$). В весенний период преобладания лесных пожаров низкой летальности и малой площади точность оценок значительно снижается ($DC = 0,25–0,6$; $DC = 0,4$ для продукта SRBA). Наиболее высокая точность выделения травяных (лугово-степных) гарей характерна для продуктов CGLS BA 3.1, FireCCI51 и FireCCIS311 ($DC = 0,55–0,7$), тогда как для продукта SRBA наблюдается низкая точность ($DC = 0,33$). Все рассмотренные продукты ДЗЗ отличаются низкой точностью картографирования сельхозпалов ($DC < 0,3$). При учёте всех площадей в различных типах ландшафтов продукт SRBA отличается средним показателем точности ($DC = 0,5$). Наиболее высокие результаты точности наблюдаются у продуктов FireCCI51 и FireCCIS311 ($DC \approx 0,6$). Продукты GABAM, MCD64A1 C6 и VNP64A1 C2 характеризуются высокой долей пропущенных повреждённых огнём участков (около 60–70 %). Для большинства продуктов свойственна систематическая недооценка пройденной огнём площади на 20–50 %. Исключение составляет продукт CGLS BA 3.1, для которого характерна высокая доля ложно выявленных повреждённых пожарами участков в летне-осенний период в лесной зоне.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, повреждённые пожарами территории, точность оценки площади пожара, валидация

Одобрена к печати: 15.05.2025
DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-3-9-30

Введение

По данным дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), ежегодно миллионы гектаров лесных и нелесных земель России подвергаются воздействию пожаров (Барталев и др., 2012; Лупян и др., 2024; Bondur et al., 2023). В дополнение к оперативному мониторингу и оценке пройденной огнём площади, данные ДЗЗ позволяют охарактеризовать параметры лесных пожаров (Барталев и др., 2015; Лупян и др., 2022; Хвостиков, Барталев, 2022; Rogers et al., 2015; Wooster, Zhang, 2004) или оценить объёмы пирогенной эмиссии продуктов горения (Бондур и др., 2022; Хвостиков, Барталев, 2021; Ponomarev et al., 2023; van der Werf et al., 2017). На травяные пожары приходится около трети пирогенной эмиссии углерода на территории России (Бондур и др., 2022; Матвеев, Барталев, 2024; Shvidenko et al., 2011; Vivchar et al., 2010), вследствие чего необходим полноценный учёт пройденной огнём площади в различных типах лесных и нелесных наземных экосистем России.

Существует две основные группы дистанционных методов определения пройденной огнём площади: 1) выявление очагов горения (высокотемпературных аномалий, «горячих точек», «хотспотов») (Martín et al., 1999; Wooster et al., 2021) и 2) картографирование

пройденных огнём территорий на основе изменения их спектрально-отражательных характеристик (Chuviesco et al., 2019; Neil, Pettinari, 2021; Kurbanov et al., 2022; Pereira et al., 1999; Tansey et al., 2002). В рамках настоящей работы рассматриваются только продукты второй группы, т.е. полученные методами картографирования пройденных огнём территорий (гарей) по данным ДЗЗ.

Метод картографирования гарей (*англ.* burned area) предполагает разделение пикселей на два класса, а именно на повреждённую (гари) и неповреждённую (не гари) пожаром территории (The 2022 GCOS..., 2022). Преимущество метода картографирования гарей на основе изменения спектральных признаков заключается в присутствии фиксируемого изменения в течение некоторого периода после пожара, часто более месяца (Melchiorre, Boschetti, 2018; Pereira et al., 1999). Недостатком данного подхода становится необходимость разделения гарей и иных явлений, имеющих схожие спектральные признаки (Pereira et al., 1999; Tansey et al., 2002). Необходимость обработки значительного объёма данных и высокое требуемое временное разрешение обуславливают использование данных пространственного разрешения ~250–1000 м при картографировании гарей в глобальном масштабе, что приводит к пропуску малых гарей и ошибке в определении пройденной огнём площади (ошибка низкого пространственного разрешения, *англ.* low-resolution bias) (Boschetti et al., 2004, 2010). Данные съёмки пространственного разрешения ~10–30 м часто применяются в региональных исследованиях (Chuviesco et al., 2022; Glushkov et al., 2021; Hawbaker et al., 2020; Liu et al., 2023; Stroppiana et al., 2022; Talucci et al., 2022), для уточнения оценок пройденной огнём площади по данным более низкого пространственного разрешения (Барталев и др., 2012, 2014; Пономарев, Шевцов, 2015) и в глобальном продукте картографирования гарей GABAM (*англ.* Global Annual Burned Area Map) (Long et al., 2019).

В случае методик ДЗЗ валидацией называется процесс оценки точности продукта с применением независимой выборки, не являющейся данными другого аналогичного продукта (Justice et al., 2000). При валидации продуктов картографирования гарей рекомендуется использовать данные более высокого пространственного разрешения с применением систематической разновременной выборки, описывающей все представленные биомы (Boschetti et al., 2010). Согласно требованиям Всемирной метеорологической организации (ВМО), допустимая доля ошибок (ложно выявленных и пропущенных повреждённых участков) для продуктов картографирования гарей составляет 25 % (The 2022 GCOS..., 2022, § 9.4.1).

В последние годы было опубликовано несколько работ, посвящённых валидации глобальных продуктов картографирования гарей по данным ДЗЗ в масштабе планеты (Boschetti et al., 2019; Franquesa et al., 2022; Padilla, Ramo, 2024). На территории России в 2020 г. была проведена обширная работа по экспертному дешифрированию гарей по данным Sentinel-2 MSI (*англ.* Multi-Spectral Instrument) (Glushkov et al., 2021). В цитируемой работе выполнена оценка точности стандартного продукта MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) MCD64A1 C6 (*англ.* Collection 6 — C6) за весенний период. Для территории России валидация методов и продуктов ДЗЗ картографирования гарей на локальном и региональном уровне была представлена в работах (Барталев и др., 2005; Медведева и др., 2020; Рыков, Дубинин, 2011; García-Lázaro et al., 2018; Kurbanov et al., 2024; Loboda, Csiszar, 2005; Soja et al., 2019; Zhu et al., 2017).

Основная задача проведённого в настоящей статье исследования заключается в валидации продуктов спутникового картографирования гарей для территории России с учётом типов растительного покрова. Особый интерес, в частности, представляют результаты валидации разработанного в ИКИ РАН продукта SRBA (*англ.* Spectral Reflectance Burned Area) (Барталев и др., 2012, п. 2.2) в сопоставлении с результатами глобальных продуктов ДЗЗ.

Использованные данные и методика валидации

Использованные данные

В качестве основного региона интереса в настоящей работе выступает территория России; в качестве одного из источников опорных выборок также использовались данные по трём областям на северо-западе Республики Казахстан. Применённые в исследовании опорные выборки включают в себя следующие наборы данных:

1. Выборка (Glushkov et al., 2021), содержащая пройденную огнём площадь на всей территории России за 2020 г.; подразделена на весенний и летне-осенний сезоны.
2. Выборка гарей после интенсивных лесных пожаров в Республике Саха (Якутия) в 2021 г.
3. Выборка гарей аридных ландшафтов Прикаспийской низменности за период 2001–2020 гг.

Таблица 1. Характеристики включённых в исследование продуктов спутникового картографирования гарей (по состоянию на начало 2025 г.)

Продукт	Сенсор	Период	Разрешение		Публикация	Ссылка на данные
			Пространственное	Временное		
GABAM (GBA_30)	Landsat TM/ETM+/OLI ¹	1985–2021 гг.	0,00025° (~30 м)	Год	(Long et al., 2019)	ftp://124.16.184.141/GABAM
MCD64A1 C6 ²	MODIS	11.2000 – наст. время	463 м	День	(Giglio et al., 2018)	sftp://fuoco.geog.umd.edu (логин: fire; пароль: burnt)
VNP64A1 C2	VIIRS ³	03.2012 – наст. время	463 м	День	(Giglio et al., 2024)	
FireCCI51	MODIS	2001–2022 гг.	0,00225° (~250 м)	День	(Lizundia-Loiola et al., 2020)	https://data.ceda.ac.uk/neodc/esacci/fire/data/burned_area/MODIS/pixel/v5.1/compressed
FireCCIS311	OLCI/SLSTR ⁴	2019–2022 гг.	0,00278° (~300 м)	День	(Lizundia-Loiola et al., 2022)	https://data.ceda.ac.uk/neodc/esacci/fire/data/burned_area/Sentinel3_SYN/pixel/v1.1
CGLS BA 3.1 (NTC) ⁵	OLCI/SLSTR	2019 г. – наст. время	0,00298° (~333 м)	День	(Padilla et al., 2024)	https://globalland.vito.be/download/manifest/ba_300m_v3_monthly_netcdf/manifest_clms_global_ba_300m_v3_monthly_netcdf_latest.txt
SRBA ²	MODIS	2006–2024 гг.	232 м	День	(Барталев и др., 2012, п. 2.2)	http://sci-vega.ru/maps/ (доступен по запросу)

Примечания: ¹ TM (англ. Thematic Mapper), ETM+ (англ. Enhanced Thematic Mapper Plus), OLI (англ. Operational Land Imager); ² Данные продуктов MCD64A1 C6 и SRBA доступны для северных широт южнее 70°; ³ VIIRS (англ. Visible Infrared Imaging Radiometer Suite); ⁴ OLCI (англ. Ocean and Land Colour Instrument), SLSTR (англ. Sea and Land Surface Temperature Radiometer); ⁵ CGLS BA (англ. Copernicus Global Land Service Burned Area), NTC (англ. non-time critical).

Основные характеристики информационных продуктов спутникового картографирования гарей представлены в табл. 1. В работе были использованы продукты Д33, находившиеся в открытом доступе по состоянию на начало 2025 г. Следует отметить, что в открытом доступе

также находятся данные глобальных продуктов ДЗЗ FireCCI41 (*англ.* Climate Change Initiative; 2005–2011 гг.) (Chuviesco et al., 2016) и FireCCILT11 (1982–2018 гг.) (Otón et al., 2021), а также продукт ABBA v2 (*англ.* Arctic Boreal Burned Area; 2002–2022 гг.) (Loboda et al., 2024) и продукт (Talucci et al., 2022) (2001–2020), содержащие информацию о гаях на значительной части территории России. Оценки пройденной огнём площади по данным большинства из рассмотренных продуктов ДЗЗ в бореальной зоне России представлены в работе (Clelland et al., 2024).

Для выборок (1) и (2) классификация типов наземных экосистем проводилась на основе карты растительного покрова России RLC v5.7 (*англ.* Russian Land Cover; 230 м, использовались данные за 2019–2020 гг.) (Барталев и др., 2016). Для выборки (3), частично охватывающей территорию Казахстана, применялась карта типов земного покрова ESA CCI LC 300m v2.0.7–2.1.1 (ESA — *англ.* European Space Agency, Европейское космическое агентство; LC — *англ.* Land Cover, типы наземных экосистем; 1992–2022 гг.) (Santoro et al., 2017).

Временное распределение включённых в исследование данных представлено на *рис. 1*.

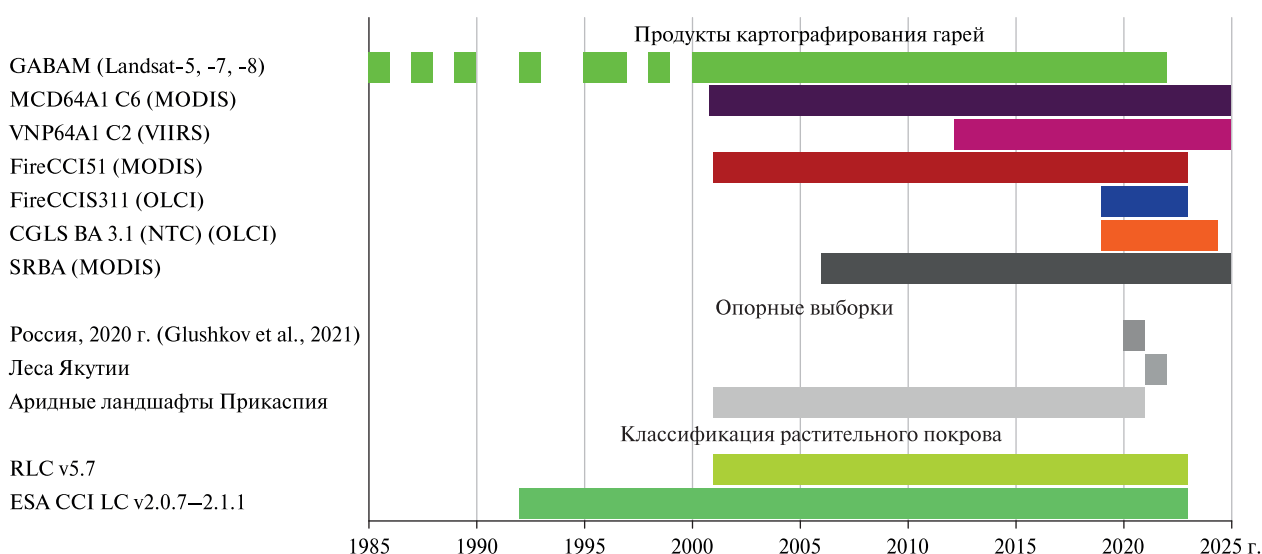


Рис. 1. Временное распределение включённых в исследование данных

Опорные выборки

Для оценки точности выделения пройденной огнём площади использовались три опорные выборки:

1. *Выборка* (Glushkov et al., 2021) представляет собой гари на всей территории России, выявленные за весь 2020 г. по серии разновременных снимков Sentinel-2 MSI (пространственное разрешение 10–20 м). Выборка разделена на весеннюю (до 15 мая 2020 г., общая площадь гаяей 134,8 тыс. км²) и летне-осеннюю (123,6 тыс. км²). Цитируемая работа описывает только весеннюю выборку. В выделении гаяей принимали участие волонтеры с последующей валидацией результатов экспертами. В данном исследовании использовались все доступные контуры гаяей.

2. *Выборка леса Якутии* содержит гари, выявленные на месте лесных пожаров в Республике Саха в 2021 г. (72,7 тыс. км²). Изначально выборка создана для оценки степени повреждения лесного покрова на основе характеристики средневзвешенной категории состояния (СКС) (Сайгин и др., 2023; Стыценко и др., 2013). Для выделения гаяей использовались безоблачные пары снимков Sentinel-2 MSI или Landsat-8 OLI (10–30 м), полученные из системы «Вега-Лес» (Lourian et al., 2022). В качестве предпоярного выбирался предшествующий выявлению гаяей снимок со сходными условиями вегетации (в том числе за предыдущие годы при отсутствии подходящего снимка за текущий год). В качестве постпоярного — ближайший снимок после дня выявления гаяей. Поиск пирогенных нарушений выполнялся по кон-

турам гарей продукта SRBA с буфером в 5 пикселей MODIS (~1,1 км). Минимальная площадь картографируемых гарей составила 1000 га (10 км²). В настоящей работе были использованы все пиксели с показателем СКС ≥ 1 .

3. *Выборка аридных ландшафтов* представляет собой гари на территории Прикаспийской низменности за период 2001–2020 гг. (около 53 тыс. км² в год). Выборка охватывает следующие регионы: юг европейской части России (Волгоградская и Астраханская области, Республика Калмыкия, частично Саратовская область, Ставропольский край, Республики Дагестан и Чечня) и северо-запад Казахстана (Актюбинская, Атырауская и Западно-Казахстанская области). Выделение выгоревших площадей осуществлялось на основе экспертного дешифрирования спутниковых изображений Landsat TM/ETM+/OLI и Sentinel-2 MSI. Использовалась комбинация каналов с включением диапазонов SWIR (*англ.* Short Wave InfraRed) (2,2 мкм) и NIR (*англ.* Near InfraRed) (0,87 мкм). Дополнительно применялись данные продукта детектирования активного горения MCD14ML C6 (Giglio et al., 2020) и продуктов картографирования гарей FireCCI51, MCD45A1 C5 (Boschetti et al., 2009), MCD64A1 C6, GABAM. Даты спутниковых изображений подбирались максимально близкими к датам до начала и после окончания пожаров согласно атрибутивной информации указанных продуктов. Отдельные сельхозпалы, если они не распространялись на природные ландшафты, не выделялись. Более подробно особенности картографирования гарей при формировании выборки (3) описаны в ряде отдельных публикаций (Шинкаренко и др., 2022а, б; Shinkarenko et al., 2023).

Пространственное распределение использованных выборок опорных данных о гарях представлено на *рис. 2*.

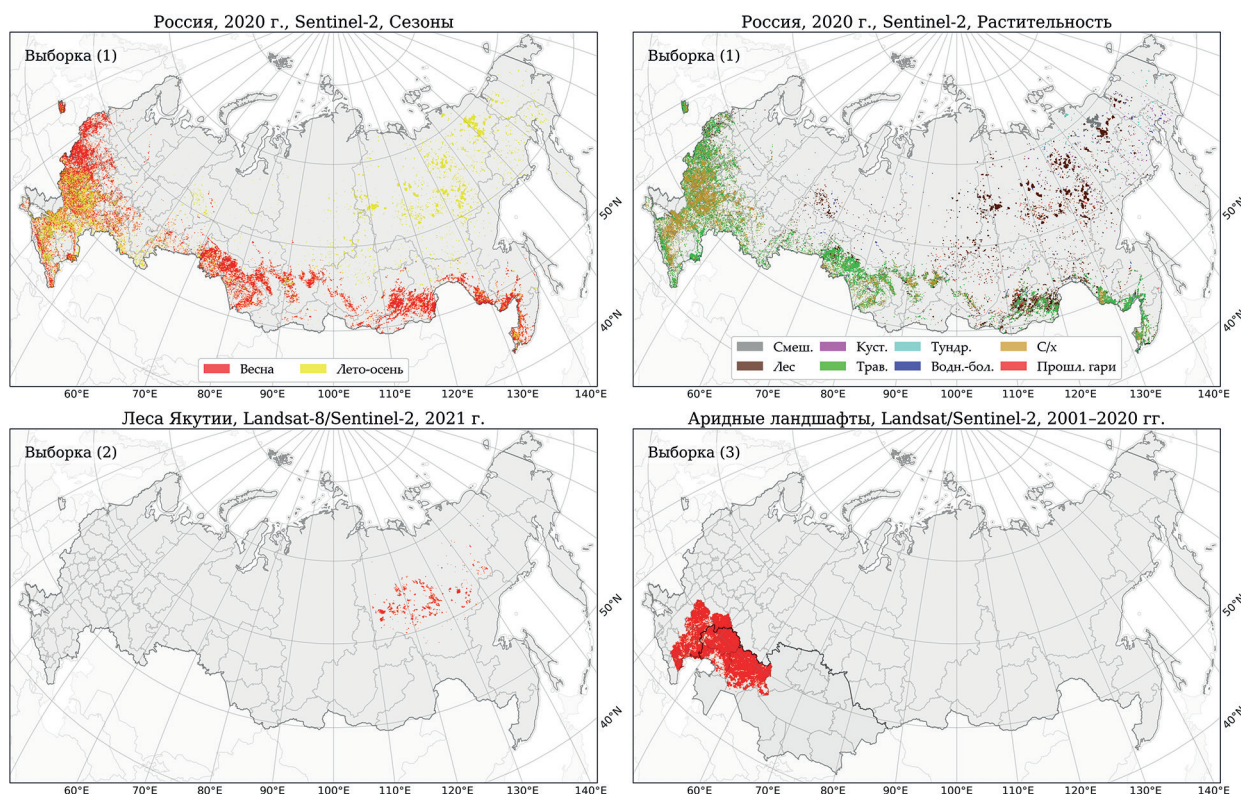


Рис. 2. Пространственное распределение использованных для исследования выборок опорных данных о гарях

Методика валидации

Исходные данные опорных выборок, продуктов картографирования гарей и карт типов растительного покрова преобразовывались в проекцию UTM (*англ.* Universal Transverse Mercator). В случае выборок (1) и (2), основанных на данных сенсоров Sentinel-2 MSI, при

растеризации использовалось пространственное разрешение 20 м; в случае выборки (3), основанной преимущественно на данных спутников серии Landsat, — разрешение 30 м. В случае векторного представления данных (опорные выборки (1) и (3)) растеризовывались все пиксели, содержащие контуры пройденных огнём участков. Применение растеризованного представления данных связано с необходимостью учёта типов растительного покрова.

В выборке (1) разделение на весенний и летне-осенний сезоны было проведено по дате фиксации гари продуктом ДЗЗ 15.05.2020. Исключая это деление, для опорных выборок и продуктов спутникового картографирования гарей пиксель учитывался как гарь только один раз за год. Учитывались пиксели гарей со всеми значениями параметра confidence в случае продуктов ESA FireCCI или флага QA (*англ.* Quality Assurance) продуктов MCD64A1 C6 и VNP64A1 C2.

В случае выборки (2) (леса Якутии) использовались данные только в административных границах Республики Саха. В случае выборки (3) и продукта картографирования гарей SRBA при проведении исследования рассматривались только данные за 2006, 2011 и 2012 гг.

Классификация типов наземных экосистем проводилась по данным карт растительного покрова на год, предшествующий году пожара. Типы растительного покрова были агрегированы в семь классов: лесные, травяные, кустарниковые, тундровые, гари на водно-болотных угодьях (ВБУ), сельхозпалы и гари предыдущих лет.

Таблица 2. Матрица перепутывания при валидации продуктов картографирования гарей

	Площадь	Опорная выборка		Всего, продукт ДЗЗ
		Пройденная огнём	Непройденная огнём	
Продукт ДЗЗ	Пройденная огнём	A_{bMatch}	A_{Comm}	A_{bProd}
	Непройденная огнём	A_{Om}	$A_{ubMatch}$	A_{ubProd}
	Всего, опорная выборка	A_{bValid}	$A_{ubValid}$	A_{total}

Таблица 3. Метрики точности продуктов картографирования гарей

Метрика	Формула
Ложно выявленные участки, %	$C_e = A_{Comm} / A_{bProd}$
Пропущенные участки, %	$O_e = A_{Om} / A_{bValid}$
Систематическое отклонение, %	$relB = (A_{Comm} - A_{Om}) / A_{bValid}$
F1-score (индекс Сёренсена – Дайса)	$DC = 2A_{bMatch} / (2A_{bMatch} + A_{Comm} + A_{Om})$

Ежегодно для каждого тайла UTM рассчитывались представленные в *табл. 2* параметры матрицы перепутывания отдельно по обобщённым типам растительного покрова. Результаты по всем тайлам UTM суммировались. В случае выборки (3) (2001–2020) параметры из *табл. 2* усреднялись за временной промежуток доступных наблюдений продукта картографирования гарей. На основе полученных данных по формулам из *табл. 3* были рассчитаны следующие метрики: доли ложно выявленных и пропущенных повреждённых огнём площадей C_e и O_e (*англ.* commission и omission error), систематическое отклонение relB (*англ.* relative bias) оценки пройденной огнём площади и характеристика F1-score (индекс Сёренсена – Дайса, *англ.* Dice Coefficient — DC). Показатели доли площади ложно выявленных и пропущенных повреждённых участков являются обратными для метрик «точность производителя» (*англ.* Producer's Accuracy) и «точность пользователя» (*англ.* User's Accuracy) соответственно.

Результаты

Все типы растительного покрова

В табл. 4 представлены результаты валидации рассмотренных продуктов картографирования гарей на территории России. Общая точность этих продуктов по показателю F1-score (DC) составляет $DC \approx 0,4–0,6$. Наиболее высокая точность наблюдается для продуктов ESA FireCCI, что может быть связано с использованием локально-адаптивных порогов при детектировании гарей.

Таблица 4. Точность выделения гарей (все типы растительного покрова) по выборке (1) (Glushkov et al., 2021)

Продукт	Ложно выявленные участки (C_e), %	Пропущенные участки (O_e), %	Систематическое отклонение (relB), %	F1-score (DC)
GABAM	25,2	66,3	–54,9	0,46
MCD64A1 C6	33,4	72,6	–58,8	0,39
VNP64A1 C2	20,4	63,2	–54,3	0,49
FireCCI51	27,4	47,1	–27,0	0,61
FireCCIS311	22,0	47,8	–33,2	0,63
CGLS BA 3.1	44,0	42,1	+3,4	0,57
SRBA	42,4	53,7	–19,6	0,51

Примечание: Полужирным начертанием выделены результаты продуктов с наилучшим показателем точности по данному показателю.

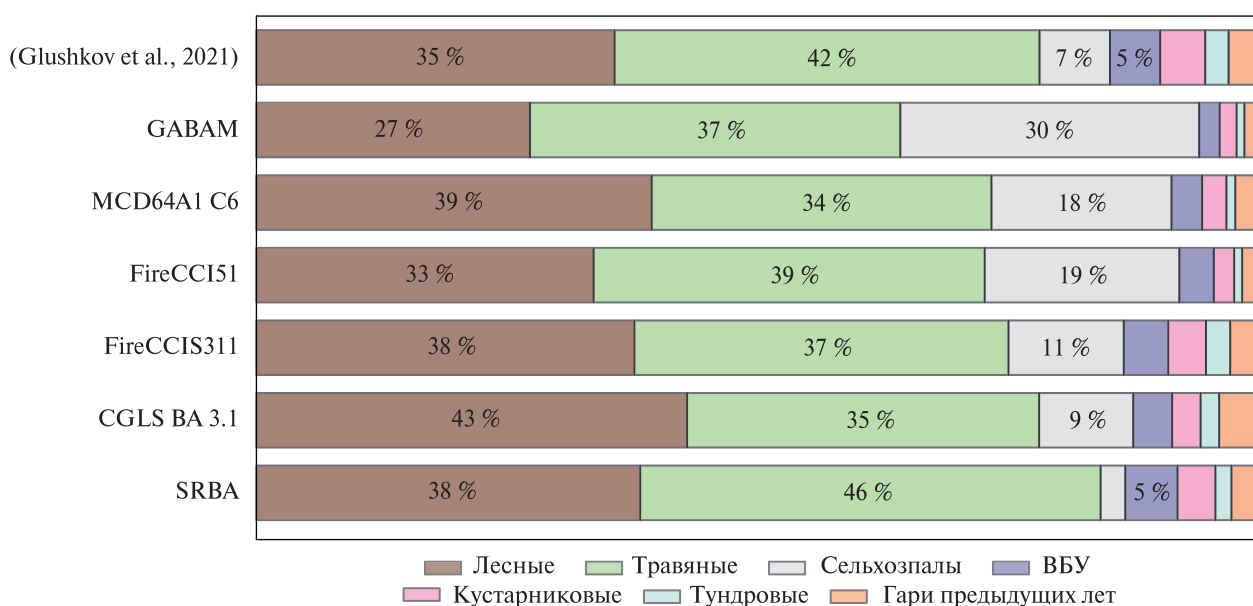


Рис. 3. Среднегодовое распределение пройденной огнём площади по карте типов наземного покрова RLC v5.7 на территории России. Для сельхозпалов характерна низкая точность автоматического выявления методиками ДЗЗ (серые области)

Для большинства продуктов, исключая CGLS BA 3.1, характерна систематическая недооценка пройденной огнём площади. Для GABAM и стандартных продуктов NASA (англ. National Aeronautics and Space Administration, Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства) MCD64A1 C6 и VNP64A1 C2 недооценка превышает 50 %. В случае продуктов NASA это может быть связано с использованием данных

более низкого пространственного разрешения (463 м). При этом средняя точность продукта VIIRS VNP64A1 C2 выше показателя продукта MODIS MCD64A1 C6 ($DC \approx 0,5$ и $DC \approx 0,4$), несмотря на применение исходных данных более низкого изначального пространственного разрешения — номинально 750 м в надире (VIIRS, каналы M8 и M11) против 500 м (MODIS, каналы b05 и b07).

Высокая доля пропущенных гарей у продукта GABAM может объясняться использованием высоких пороговых критериев при их выделении; в свою очередь это приводит к низкой доле ложно выделенных повреждённых огнём участков, особенно в случае лесных гарей. Другим недостатком продукта GABAM являются артефакты, характерные для некоторых тайлов за период до 2013 г. (т. е. до перехода на данные Landsat-8 OLI) (Clelland et al., 2024).

Согласно среднемноголетним данным рассмотренных продуктов спутникового картографирования гарей и выборки (1) (рис. 3, см. с. 15), примерно по 30–40 % от всей пройденной огнём площади на территории России приходится на лесные и травяные (лугово-степные) пожары. В силу этого далее рассмотрены подробные результаты только по этим типам наземного покрова.

Лесные гары

На рис. 4 представлены результаты валидации продуктов картографирования гарей в лесной зоне. Для всех рассмотренных продуктов характерны более высокие показатели точности выделения лесных гарей в сравнении с общим показателем по территории России (ср. табл. 4): $DC \approx 0,6–0,7$ в случае выборки (1) (вся Россия) и $DC \approx 0,8$ в случае выборки (2) (Якутия, 2021 г.). Причина различия результатов по двум выборкам заключается в характере пожаров: в случае выборки (1) представлены лесные пожары на всей территории России за весь год; в случае выборки (2) — крупные пожары с высокой степенью гибели лесов. Рост доли ошибочно выделенных гарей по результатам выборки (2) связан с отсутствием в опорной выборке гарей с площадью менее 1000 га.

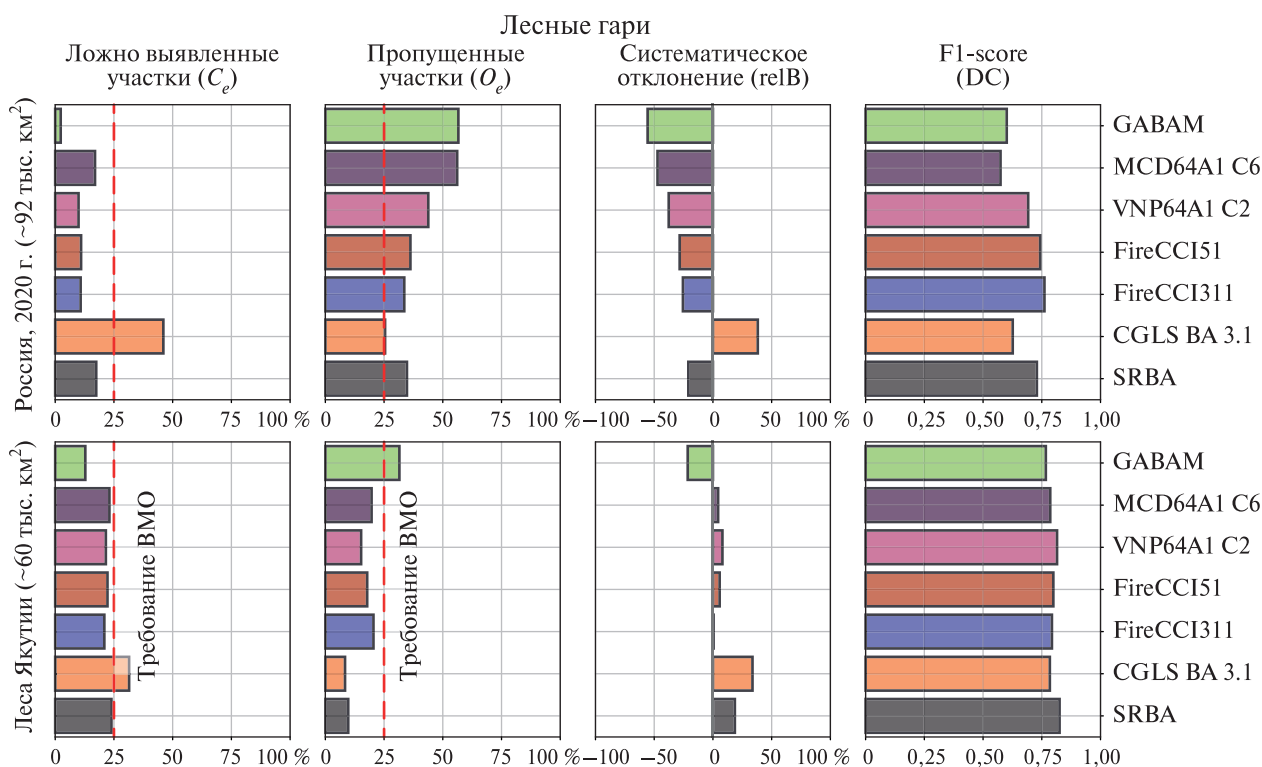


Рис. 4. Результаты валидации продуктов спутникового картографирования: лесные гары, весь период наблюдений. Здесь и далее красным пунктиром отмечено требование ВМО по точности картографирования гарей

Для рассмотренных продуктов, исключая CGLS BA 3.1, характерна недооценка площади лесных пожаров (20–50 % по выборке (1)). По результатам, полученным с помощью выборки (1), все рассмотренные продукты не удовлетворяют требованию ВМО: максимум 25 % площади ложно выделенных и пропущенных повреждённых огнём участков (The 2022 GCOS..., 2022, § 9.4.1).

Для лесных пожаров на территории России отмечается различный сезонный характер: преимущественно низовые пожары с низкой степенью летальности в весенний период и верховые пожары с высокой степенью гибели лесов в летний период (Барталев, Стыценко, 2021; Лупян и др., 2024). На *рис. 5* представлено сравнение точности выделения лесных гарей в весенний и летне-осенний период по результатам выборки (1).

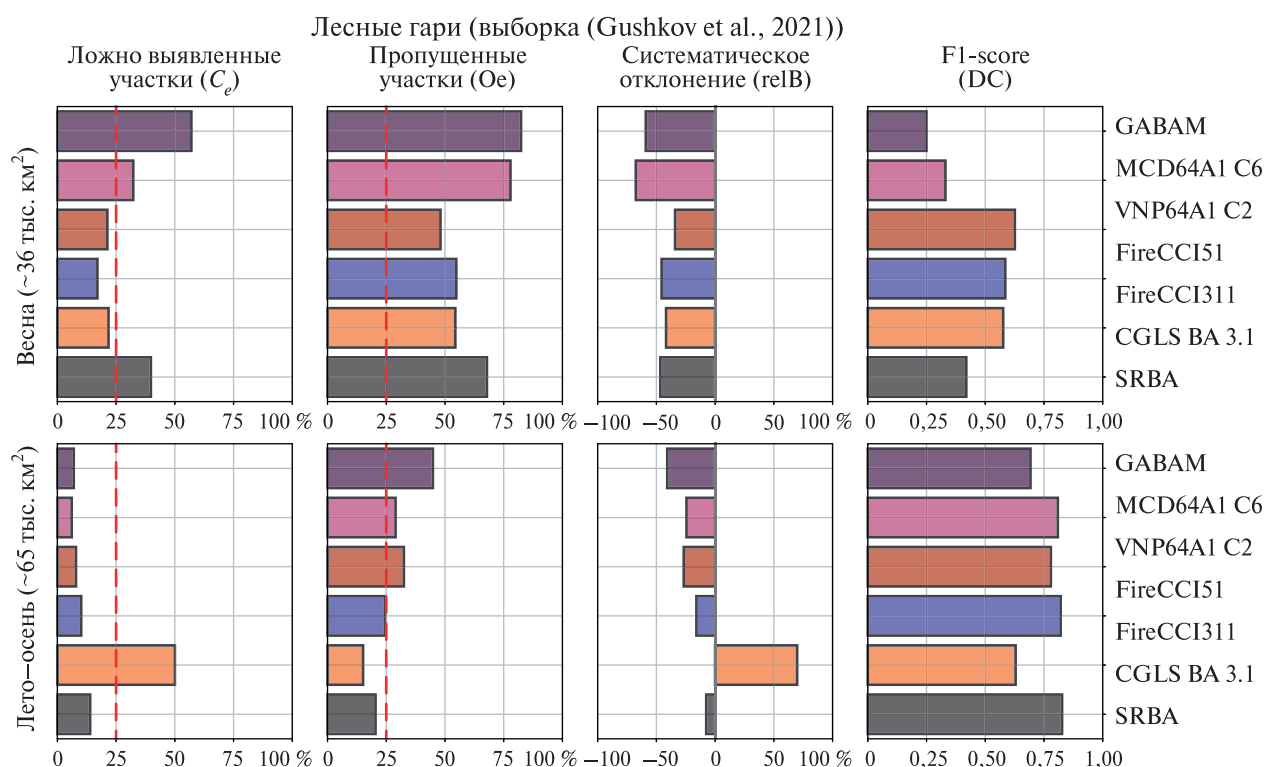


Рис. 5. Результаты валидации продуктов спутникового картографирования: лесные гары по сезонам на основе выборки (1)

Из *рис. 5* видно, что в весенний период точность картографирования гарей значительно снижается ($DC \approx 0,4–0,6$; $DC = 0,42$ для продукта SRBA). В летне-осенний период для большинства продуктов, включая продукт SRBA, характерна высокая точность $DC \approx 0,7–0,8$. В случае продукта CGLS BA 3.1 в летне-осенний период наблюдается более низкая точность в силу высокой доли ложно выделяемых повреждённых огнём участков (около 50 %). Авторами продукта CGLS BA 3.1 наблюдаемый феномен объясняется влиянием фенологических изменений на альбедо в осенний период (Padilla, Ramo, 2024).

Травяные гары

На *рис. 6* (см. с. 18) представлены результаты валидации данных спутникового картографирования травяных (лугово-степных) гарей. В случае использования выборки (1) наибольшая точность характерна для продуктов CGLS BA 3.1, FireCCIS311 и FireCCI151 ($DC \approx 0,55–0,6$). В случае продукта SRBA наблюдается довольно низкая точность выделения травяных гарей ($DC \approx 0,3$) по результатам применения обеих выборок опорных данных. Вероятно, подобный

результат вызван принципом фиксации гарей в алгоритме продукта SRBA на основе сравнения текущего периода с предшествующими пожару усреднёнными многолетними наблюдениями, характеризующими так называемую фенологическую норму (Барталев и др., 2012, п. 2.2). Для травяных ландшафтов (особенно в аридной зоне) характерны изменчивые условия увлажнения и высокая повторяемость пожаров, что не позволяет сформировать фенологическую норму наблюдений, достоверно отображающую сезонную динамику спектрально-отражательных характеристик растительного покрова.

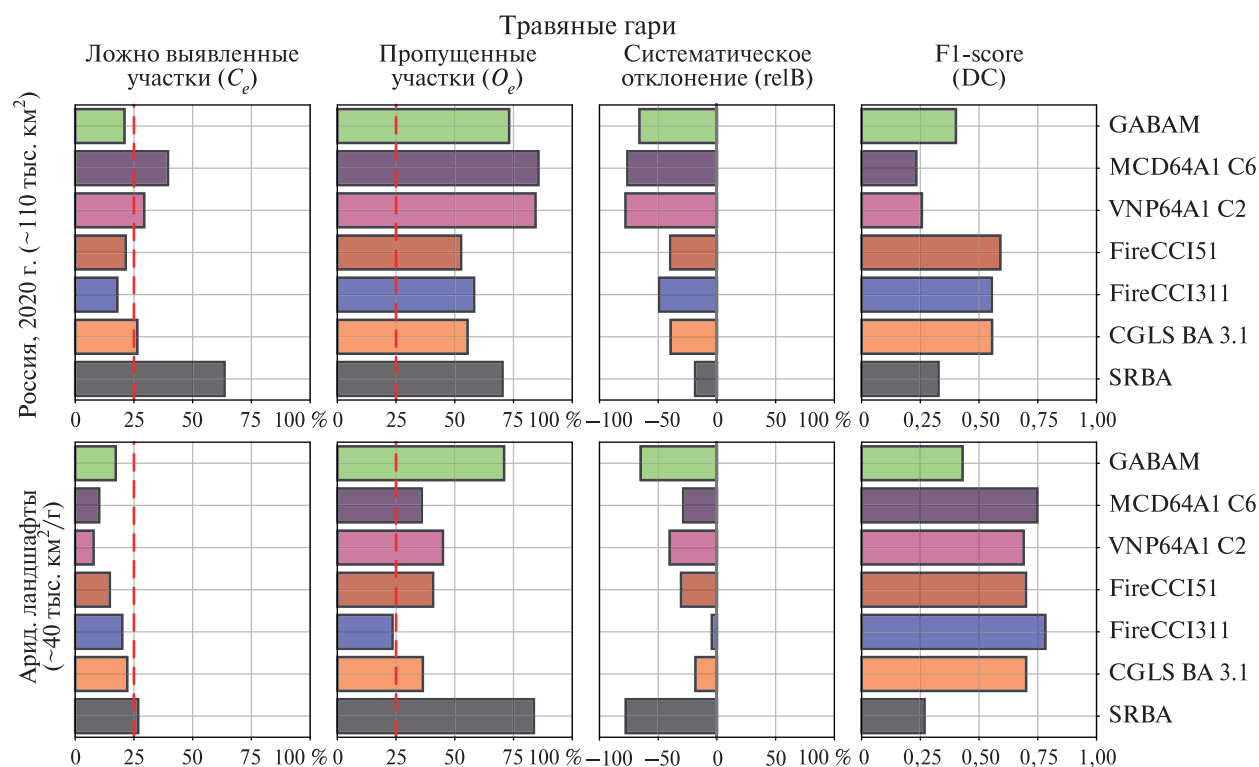


Рис. 6. Результаты валидации продуктов спутникового картографирования: травяные гары, весь период

В случае аридных ландшафтов (выборка (3)) наблюдаются более высокие показатели точности для большинства продуктов. Особенно заметен контраст точности стандартных продуктов NASA (MCD64A1 C6 и VNP64A1 C2): показатель DC повышается с 0,25 до 0,65–0,7. Высокий показатель точности выделения гарей в аридных ландшафтах (*англ.* arid and xeric) по данным стандартных продуктов NASA был также отмечен в работе (Franquesa et al., 2022).

В алгоритмах стандартных продуктов NASA для фиксации повреждённых участков используется нормализованный разностный вегетационный индекс VI (*англ.* Vegetation Index) на основе наблюдений в каналах 1,2 и 2,1–2,2 мкм (Giglio et al., 2018, 2024). По данным MODIS, в спектральном диапазоне 1,2 мкм наблюдается высокая разделимость горевших и не затронутых пожарами участков травянистой растительности в засушливых условиях; напротив, для канала 2,1 мкм характерна их низкая разделимость (Roy et al., 2002, Fig. 3). В силу контрастного изменения спектральных характеристик в каналах 0,8; 1,2; 1,6 мкм и 2,1–2,2 мкм, для индексов на основе их комбинации (например, 1,2 и 2,1 мкм) характерна высокая спектральная разделимость горевших и негоревших участков в аридных ландшафтах (Franquesa et al., 2022; Liu et al., 2023, Fig. 3). Таким образом, использование индекса VI может быть одной из причин более высокой точности стандартных продуктов NASA в аридных ландшафтах. Другой причиной является высокая доля крупных по площади гарей в выборке (3) по сравнению с остальной территорией России (Shinkarenko et al., 2023), благодаря чему ошибка низкого пространственного разрешения, более характерная для продуктов

NASA (463 м) в сравнении с другими рассмотренными продуктами, вносит меньший вклад в общую погрешность оконтуривания гарей.

Другие ландшафты

Результаты по сельхозпалам рассмотрены в разделе «Обсуждение результатов». В случае тундровых, кустарниковых гарей и гарей на ВБУ для продукта SRBA характерен самый высокий показатель точности выделения гарей ($DC \approx 0,75-0,8$).

Обсуждение результатов

Точность выделения гарей по данным пространственного разрешения 10–30 м

Для данных пространственного разрешения 10–30 м (опорные выборки и продукт GABAM в настоящей работе) характерна собственная ошибка точности картографирования гарей. Её источником служит более низкое временное разрешение, а также отсутствие учёта изрезанности периметра гари и наличия невыгоревших участков растительности или водных объектов внутри контуров гарей (Барталев и др., 2005; Kolden et al., 2012; Sparks et al., 2015). В использованных наборах опорных данных только в выборке (2) (леса Якутии) систематически учитывается фактор наличия невыгоревших участков в контуре гари. Выделение невыгоревших «островков» также характерно для продукта GABAM, что приводит к завышенной оценке доли пропущенных участков при валидации данного продукта по данным опорных выборок (1) или (3).

В литературе доступны результаты валидации продуктов ДЗЗ пространственного разрешения 10–30 м по данным более высокого разрешения (1–5 м) или полевых исследований (Hawbaker et al., 2020; Kurbanov et al., 2024; Stroppiana et al., 2022). Согласно цитируемым работам, для картографирования гарей с применением данных пространственного разрешения 10–30 м свойственна ошибка пропусков и ложного выделения около 15–20 % от всей пройденной огнём площади.

Репрезентативность и проблемы использованных опорных выборок

На рис. 7 (см. с. 20) показана сезонная динамика горимости в 2020 г. лесных и травяных экосистем на территории России — год выборки (1) (Glushkov et al., 2021) — по данным продуктов картографирования гарей (MCD64A1 C6, SRBA) и продуктов фиксации активных очагов горения (хотспотов) (MCD14ML C6 (Giglio et al., 2020), VNP14IMGML C2 (Schroeder et al., 2024)). Из графика видно, что для пожарного режима 2020 г. не характерны значительные аномалии. В этот год период весенних пожаров начался и закончился раньше многолетней нормы, а для лесных пожаров был характерен дополнительный пик в осенний период.

Для опорной выборки (1) показатель площади ложно выделенных и пропущенных повреждённых огнём площадей согласно авторам набора данных оценивается в 8 и 15 % соответственно (Glushkov et al., 2021). Другой особенностью выборки (1) является возможность возврата пожара в летне-осенний период — в данной работе такие площади учитываются только один раз за год. На подобные случаи приходится 1,3 тыс. км² (0,5 % от всей площади выборки).

Выборки (1) и (3) изначально представлены в векторном виде. При растеризации в выбранном разрешении и перепроецировании в систему координат UTM неизбежны потери точности. Так, годовая площадь всех гарей по исходной выборке (1) составляет 258,4 тыс. км² в векторном виде (равновеликая проекция Альберса) и 266,8 тыс. км² в растеризованном виде (растеризованное представление в UTM; +3,2 %).

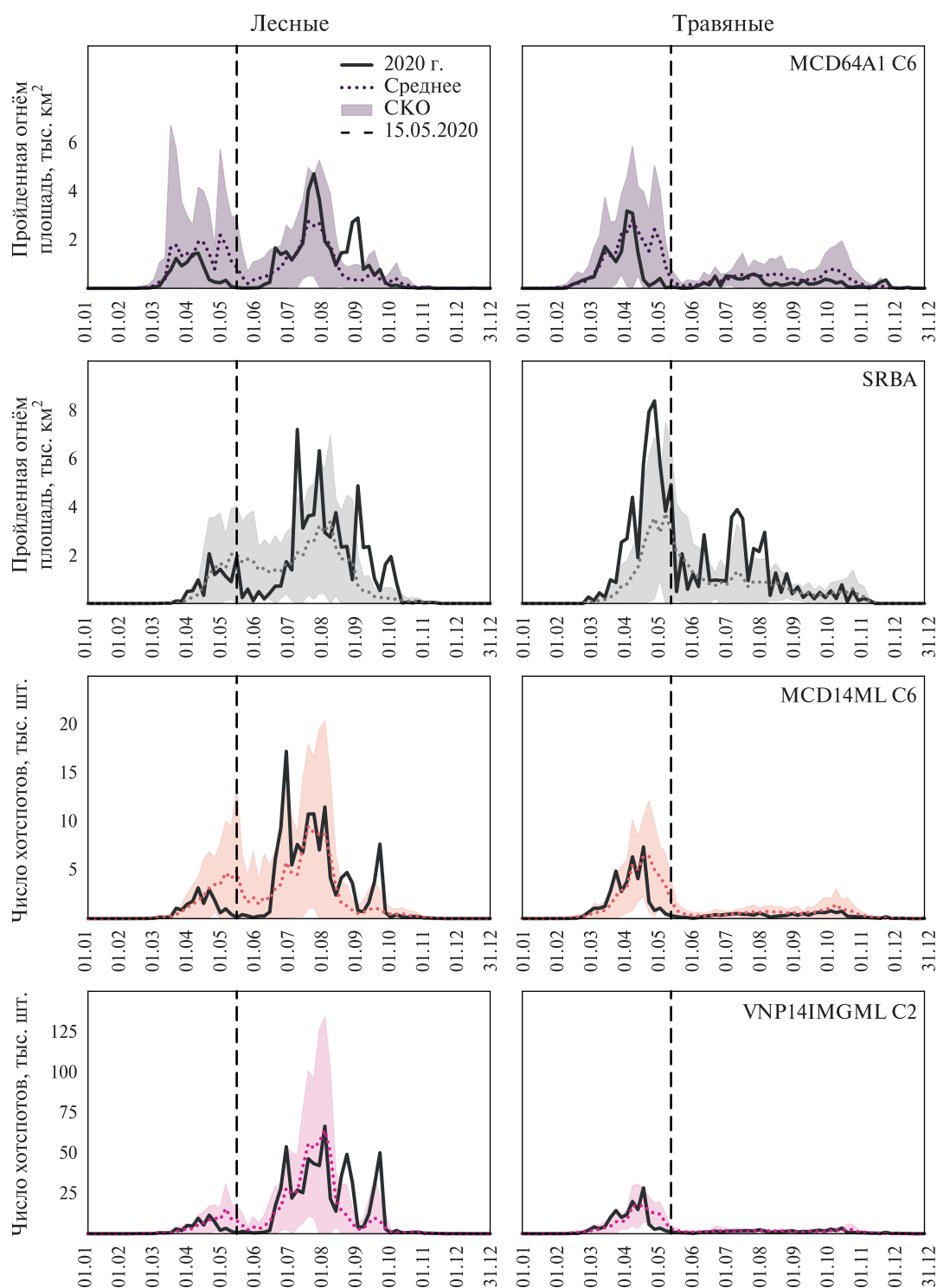


Рис. 7. Временной ряд горимости в 2020 г. на территории России в сравнении со среднемноголетней нормой. Значения усреднены за пять дней. Весенние и летне-осенние данные разделены пунктиром по дате 15.05.2020. СКО — среднеквадратичное отклонение. Многолетние данные усреднены за доступный для продукта период наблюдений

Сравнение с результатами глобальных валидационных исследований

Прямое сопоставление результатов настоящей работы (см. табл. 4) и глобальных валидационных исследований (Boschetti et al., 2019; Franquesa et al., 2022; Padilla, Ramo, 2024) по всем биомам некорректно: в глобальном масштабе основной вклад (около 60 %) в пройденную

огнём площадь вносят пожары в тропических саваннах, в то время как доля гарей наиболее типичных для территории России биомов (бореальные леса, лесные и травяные ландшафты умеренного пояса) составляет около 6 % (Chen et al., 2023). В глобальных исследованиях результаты представлены по биомам, в то время как в данной работе валидация проводилась по типам растительного покрова. В силу этого сравнение результатов носит оценочный характер.

Точность картографирования гарей в бореальных лесах по результатам выборки (2) в настоящей работе сопоставима с результатами глобальных исследований ($DC \geq 0,7$ для всех продуктов); в случае выборки (1) точность выделения гарей оказывается ниже результатов цитируемых работ. Последнее объясняется присутствием в глобальных исследованиях бореальных лесов Северной Америки, для которых характерна большая доля верховых пожаров высокой степени летальности, более полно фиксируемых методиками ДЗЗ (Kharuk et al., 2021; Rogers et al., 2015; Wooster, Zhang, 2004).

Оценка точности выделения травяных гарей по результатам глобальных исследований соответствует среднему между результатами выборок (1) и (3) в данной статье ($DC \approx 0,55...0,65$). Результаты проведённой работы и глобальных исследований фиксируют низкую долю ложно выделенных и высокую долю пропущенных повреждённых огнём участков в травяных ландшафтах, что приводит к систематическому занижению пройденной огнём площади в них на 40–50 %.

Проблема картографирования сельхозпалов

Сельхозугодья выступают третьим по пройденной огнём площади типом наземного покрова России (см. *рис. 3*). Однако в специализированных исследованиях по сельхозпалам на территории России и ближнего зарубежья отмечается низкая точность их выделения (пропускается до 80–90 % площади) при использовании продуктов FireCCI51 или MCD64A1 C6 (Hall et al., 2016, 2021; McCarty et al., 2017; Zhu et al., 2017). Сходная низкая точность выделения сельхозпалов для рассмотренных продуктов ДЗЗ была получена в настоящей работе при сопоставлении с опорной выборкой (1) ($DC < 0,3$).

Вероятными причинами низкой точности являются малая площадь и скоротечность сельхозпалов, что приводит к их пропускам, а также присутствие сходных с последствиями пожаров изменений спектральных характеристик, вызванных распашкой или уборкой урожая, что становится причиной ложного срабатывания алгоритмов картографирования гарей.

Пропуск гарей севернее 70° с. ш.

В случае продуктов MCD64A1 C6 и SRBA не обрабатываются тайлы MODIS севернее 70° с. ш. В *табл. 5* представлена оценка площади гарей севернее 70° с. ш. в 2020 г. в сравнении с общей площадью опорной выборки (1). Этот год характеризовался аномально высокой пирогенной активностью в субарктических ландшафтах Сибири (Conard, Ponomarev, 2020).

Таблица 5. Доля гарей севернее 70° с. ш. на территории России, 2020 г.

Регион	Источник оценки	Площадь гарей выше 70° с. ш., тыс. км ²	Доля гарей выше 70° с. ш., %
Россия	(Glushkov et al., 2021)	1,9	0,70
Россия, бореальные леса и тундры	(Loboda et al., 2024)	1,6	1,50
Сибирь	(Conard, Ponomarev, 2020)	~2,1	0,85
Восточная Сибирь	(Talucci et al., 2022)	2,8	1,80

По данным из *табл. 5*, на северные широты выше 70° приходится около 1–2 % площади всех гарей на территории России или 25–50 % от всех тундровых гарей на территории страны. Несмотря на это, для продукта SRBA характерно высокое значение точности картографирования тундровых гарей по результатам выборки (1) ($DC = 0,73$, 34 % пропущенной площади гарей) в силу высокой точности выделения тундровых гарей в более южных широтах.

Выводы

Результаты проведенного исследования свидетельствуют о сопоставимой точности спутникового картографирования гарей по данным продукта SRBA, разработанного в ИКИ РАН, и глобальных продуктов ДЗЗ на территории России. Исключением представляются травяные ландшафты, где точность выделения гарей SRBA уступает большинству глобальных продуктов. В случае лесных пожаров для продукта SRBA характерна наиболее высокая точность выделения гарей в летний период (пожары с высокой долей гибели лесов), но довольно низкий показатель точности в весенний период.

Среди глобальных продуктов ДЗЗ наиболее высокой точностью картографирования гарей на территории России отличаются ESA FireCCI51 и FireCCIS311, что вызвано наиболее полным выделением лугово-степных гарей. Для продуктов MCD64A1 C6, VNP64A1 C2 и GABAM отмечено значительное число пропущенных выгоревших площадей. При использовании продукта CGLS BA 3.1 необходимо учитывать существенную долю артефактов, характерную для лесной зоны в осенний период. В других случаях результаты продукта Copernicus сопоставимы с продуктами ESA FireCCI.

Для рассмотренных продуктов, исключая CGLS BA 3.1, характерна систематическая недооценка пройденной огнем площади на территории России (около 20–50 %). Похожая недооценка в глобальном масштабе наблюдается по результатам глобальных валидационных исследований. Для всех продуктов ДЗЗ характерна низкая точность определения площади сельхозпалов. Все рассмотренные продукты достигают требуемой ВМО точности (максимум 25 % ложно выявленных и пропущенных поврежденных участков) только в случае выборки лесных пожаров с высокой степенью летальности.

Работа выполняется при поддержке Минобрнауки РФ (тема «Мониторинг», госрегистрация № 122042500031-8) с использованием возможностей Центра коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг».

Литература

1. Барталев С. А., Стыценко Ф. В. Спутниковая оценка гибели древостоев от пожаров по данным о сезонном распределении пройденной огнем площади // Лесоведение. 2021. № 2. С. 115–122. DOI: 10.31857/S0024114821020029.
2. Барталев С. А., Беляев А. И., Егоров В. А., Еришов Д. В., Коровин Г. Н., Коришунов Н. А., Котельников Р. В., Луян Е. А. Валидация результатов выявления и оценки площадей поврежденных пожарами лесов по данным спутникового мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2005. Вып. 2. Т. 2. С. 343–353.
3. Барталев С. А., Егоров В. А., Ефремов В. Ю., Луян Е. А., Стыценко 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.
4. Барталев С. А., Луян Е. А., Стыценко Ф. В., Панова О. Ю., Ефремов В. Ю. Экспресс-картографирование повреждений лесов России пожарами по спутниковым данным Landsat // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 1. С. 9–20.
5. Барталев С. А., Стыценко Ф. В., Егоров В. А., Луян Е. А. Спутниковая оценка гибели лесов России от пожаров // Лесоведение. 2015. № 2. С. 83–94.
6. Барталев С. А., Егоров В. А., Жарко В. О., Луян Е. А., Плотников Д. Е., Хвостиков С. А., Шабанов Н. В. Спутниковое картографирование растительного покрова России. М.: ИКИ РАН, 2016. 208 с.

7. Бондур В. Г., Гордо К. А., Зима А. Л. Исследование из космоса последствий природных пожаров на территории России для разных типов растительного покрова // Исслед. Земли из космоса. 2022. № 6. С. 74–86. DOI: 10.31857/S0205961422060033.
8. Луян Е. А., Лозин Д. В., Балашов И. В. и др. 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. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-217-232.
9. Луян Е. А., Лозин Д. В., Барталев С. А. и др. Оценка повреждений российских лесов пожарами в XXI веке на основе анализа интенсивности горения по данным прибора MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 6. С. 233–249. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-6-233-249.
10. Матвеев А. М., Барталев С. А. Сравнительный анализ оценок эмиссии углерода от природных пожаров на территории России на основании глобальных продуктов ДЗЗ // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 4. С. 141–161. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-4-141-161.
11. Медведева М. А., Макаров Д. А., Сиринов А. А. Применимость различных спектральных индексов на основе спутниковых данных для оценки площадей торфяных пожаров // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 5. С. 157–166. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-5-157-166.
12. Пономарев Е. И., Швецов Е. Г. Спутниковое детектирование лесных пожаров и геоинформационные методы калибровки результатов // Исслед. Земли из космоса. 2015. № 1. С. 84–91. DOI: 10.7868/s0205961415010054.
13. Рыков Д., Дубинин М. Данные о сгоревших площадях MCD45: описание и получение // <https://gis-lab.info/>. 11.03.2011. <https://gis-lab.info/qa/mcd45.html>.
14. Сайгин И. А., Барталев С. А., Стыценко Ф. В. Оценка точности выявления погибших от пожаров лесов на основе спутниковых данных дистанционного зондирования // Материалы 21-й Международ. конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». М.: ИКИ РАН, 2023. С. 400. DOI: 10.21046/21DZZconf-2023a.
15. Стыценко Ф. В., Барталев С. А., Егоров В. А., Луян Е. А. Метод оценки степени повреждения лесов пожарами на основе спутниковых данных MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 1. С. 254–266.
16. Хвостиков С. А., Барталев С. А. Оценка потенциальной эмиссии углерода от лесных пожаров на основе данных ДЗЗ и результатов моделирования // Материалы 19-й Международ. конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». М.: ИКИ РАН, 2021. С. 387. DOI: 10.21046/19DZZconf-2021a.
17. Хвостиков С. А., Барталев С. А. Метод уточнения положения фронта пожара на основе ассимиляции данных спутникового мониторинга в модель распространения огня // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 5. С. 9–18. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-5-9-18.
18. Шинкаренко С. С., Барталев С. А., Берденгалиева А. Н., Иванов Н. М. (2022a) Пространственно-временной анализ горимости пойменных ландшафтов Нижней Волги // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 1. С. 143–157. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-1-143-157.
19. Шинкаренко С. С., Дорошенко В. В., Берденгалиева А. Н. (2022b) Динамика площади гарей в зональных ландшафтах юго-востока европейской части России // Изв. РАН. Сер. геогр. 2022. Т. 86. № 1. С. 122–133. DOI: 10.31857/S2587556622010113.
20. Bondur V. G., Gordo K. A., Voronova O. S. et al. Intense wildfires in Russia over a 22-year period according to satellite data // Fire. 2023. V. 6. Iss. 3. Article 99. DOI: 10.3390/fire6030099.
21. Boschetti L., Flasse S. P., Brivio P. A. Analysis of the conflict between omission and commission in low spatial resolution dichotomic thematic products: The Pareto Boundary // Remote Sensing of Environment. 2004. V. 91. Iss. 3–4. P. 280–292. DOI: 10.1016/j.rse.2004.02.015.
22. Boschetti L., Roy D. P., Hoffmann A. A. MODIS Collection 5 Burned Area product — MCD45. User's Guide Version 2.0. 2009. 35 p.
23. Boschetti L., Roy D. P., Justice C. O. International Global Burned Area Satellite Product Validation Protocol. Part I — production and standardization of validation reference data. Maryland, USA: Committee on Earth Observation Satellites, 2010. 11 p.
24. Boschetti L., Roy D. P., Giglio L. et al. Global validation of the collection 6 MODIS burned area product // Remote Sensing of Environment. 2019. V. 235. Article 111490. DOI: 10.1016/j.rse.2019.111490.
25. Chen Y., Hall J., van Wees D. et al. Multi-decadal trends and variability in burned area from the fifth version of the Global Fire Emissions Database (GFED5) // Earth System Science Data. 2023. V. 15. Iss. 11. P. 5227–5259. DOI: 10.5194/essd-15-5227-2023.

26. Chuvieco E., Yue C., Heil A. et al. A new global burned area product for climate assessment of fire impacts // *Global Ecology and Biogeography*. 2016. V. 25. Iss. 5. P. 619–629. DOI: 10.1111/geb.12440.
27. Chuvieco E., Mouillot F., van der Werf G. R. et al. Historical background and current developments for mapping burned area from satellite Earth observation // *Remote Sensing of Environment*. 2019. V. 225. P. 45–64. DOI: 10.1016/j.rse.2019.02.013.
28. Chuvieco E., Roteta E., Sali M. et al. Building a small fire database for Sub-Saharan Africa from Sentinel-2 high-resolution images // *Science of the Total Environment*. 2022. V. 845. Article 157139. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.157139.
29. Clelland A. A., Marshall G. J., Baster R. et al. Annual and seasonal patterns of burned area products in Arctic-boreal North America and Russia for 2001–2020 // *Remote Sensing*. 2024. V. 16. Iss. 17. Article 3306. DOI: 10.3390/rs16173306.
30. Conard S. G., Ponomarev E. I. Fire in the North: The 2020 Siberian fire season // *Intern. J. Wildland Fire*. 2020. V. 29. P. 26–32.
31. Franquesa M., Lizundia-Loiola J., Stehman S. V., Chuvieco E. Using long temporal reference units to assess the spatial accuracy of global satellite-derived burned area products // *Remote Sensing of Environment*. 2022. V. 269. Article 112823. DOI: 10.1016/j.rse.2021.112823.
32. García-Lázaro J. R., Moreno-Ruiz J. A., Riaño D., Arbelo M. Estimation of Burned Area in the Northeastern Siberian boreal forest from a Long-Term Data Record (LTDR) 1982–2015 time series // *Remote Sensing*. 2018. V. 10. Iss. 6. Article 940. DOI: 10.3390/rs10060940.
33. Giglio L., Boschetti L., Roy D. P. et al. 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.
34. Giglio L., Schroeder W., Hall J. V., Justice C. O. MODIS Collection 6 Active Fire Product User's Guide. Revision C. NASA, 2020. 63 p.
35. Giglio L., Hall J. V., Humber M., Argueta F., Boschetti L., Roy D. P. Collection 2 VIIRS Burned Area Product User's Guide. Version 1.1. NASA, 2024. 32 p.
36. 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.
37. Hall J. V., Loboda T. V., Giglio L., McCarty G. W. A MODIS-based burned area assessment for Russian croplands: Mapping requirements and challenges // *Remote Sensing of Environment*. 2016. V. 184. P. 506–521. DOI: 10.1016/j.rse.2016.07.022.
38. Hall J. V., Argueta F., Giglio L. Validation of MCD64A1 and FireCCI51 cropland burned area mapping in Ukraine // *Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2021. V. 102. Article 102443. DOI: 10.1016/j.jag.2021.102443.
39. Hawbaker T. J., Vanderhoof M. K., Schmidt G. L. et al. The Landsat Burned Area algorithm and products for the conterminous United States // *Remote Sensing of Environment*. 2020. V. 244. Article 111801. DOI: 10.1016/j.rse.2020.111801.
40. Heil A., Pettinari M. L. ESA Climate Change Initiative — Fire_cci: D1.1 User Requirements Document (URD). Version 7.2. 2021. 66 p.
41. Justice C., Belward A., Morisette J. et al. Developments in the “validation” of satellite sensor products for the study of the land surface // *Intern. J. Remote Sensing*. 2000. V. 21. Iss. 17. P. 3383–3390. DOI: 10.1080/014311600750020000.
42. Kharuk V. I., Ponomarev E. I., Ivanova G. A. et al. Wildfires in the Siberian taiga // *Ambio*. 2021. V. 50. Iss. 11. P. 1953–1974. DOI: 10.1007/s13280-020-01490-x.
43. Kolden C. A., Lutz J. A., Key C. H. et al. Mapped versus actual burned area within wildfire perimeters: Characterizing the unburned // *Forest Ecology and Management*. 2012. V. 286. P. 38–47. DOI: 10.1016/j.foreco.2012.08.020.
44. Kurbanov E., Vorobev O., Lezhnin S. et al. Remote sensing of forest burnt area, burn severity, and post-fire recovery: A review // *Remote Sensing*. 2022. V. 14. Iss. 19. Article 4714. DOI: 10.3390/rs14194714.
45. Kurbanov E., Vorobev O., Lezhnin S. et al. Temporal and spatial analyses of forest burnt area in the Middle Volga region based on satellite imagery and climatic factors // *Climate*. 2024. V. 12. Iss. 3. Article 45. DOI: 10.3390/cli12030045.
46. Liu P., Liu Y., Guo X. et al. Burned area detection and mapping using time series Sentinel-2 multi-spectral images // *Remote Sensing of Environment*. 2023. V. 296. Article 113753. DOI: 10.1016/j.rse.2023.113753.
47. 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.
48. 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.

49. Loboda T. V., Csiszar I. A. Estimating burned area from AVHRR and MODIS: Validation results and sources of error // Contemporary Earth Remote Sensing from Space. 2005. V. 2. P. 415–421.
50. Loboda T. V., Hall J. V., Chen D. et al. Arctic Boreal Annual Burned Area, Circumpolar Boreal Forest and Tundra, V2, 2002–2022. Oak Ridge, Tennessee, USA: ORNL DAAC, 2024. DOI: 10.3334/ORNLDAAC/2328.
51. 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.
52. 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.
53. Martín M. P., Ceccato P., Flasse S., Downey I. Fire detection and fire growth monitoring using satellite data // Remote Sensing of Large Wildfires in the European Mediterranean Basin. Berlin; Heidelberg: Springer, 1999. P. 101–122. DOI: 10.1007/978-3-642-60164-4_6.
54. McCarty J. L., Krylov A., Prishchepov A. V. et al. Agricultural fires in European Russia, Belarus, and Lithuania and their impact on air quality, 2002–2012 // Land-Cover and Land-Use Changes in Eastern Europe after the Collapse of the Soviet Union in 1991. Springer Intern. Publ., 2017. P. 193–221. DOI: 10.1007/978-3-319-42638-9_9.
55. Melchiorre A., Boschetti L. Global analysis of burned area persistence time with MODIS data // Remote Sensing. 2018. V. 10. Iss. 5. Article 750. DOI: 10.3390/rs10050750.
56. Otón G., Lizundia-Loiola J., Pettinari M. L., Chuvieco E. Development of a consistent global long-term burned area product (1982–2018) based on AVHRR-LTDR data // Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation. 2021. V. 103. Article 102473. DOI: 10.1016/j.jag.2021.102473.
57. Padilla M., Ramo R. Copernicus Global Land operations “Vegetation and Energy”. “CGLOPS-1”. Burned Area Collection 300M, version 3.1. Quality assessment report. Iss. 11.10. Copernicus, 2024. 61 p.
58. Padilla M., Ramo R., Sierra S. Copernicus Global Land operations. “Vegetation and Energy”. “CGLOPS-1”. Burned Area Collection 300M, version 3.1. Algorithm theoretical basis document. Iss. 12.10. Copernicus, 2024. 53 p.
59. Pereira J. M. C., Sa A. C. L., Sousa A. M. O. et al. Spectral characterisation and discrimination of burnt areas // Remote Sensing of Large Wildfires in the European Mediterranean Basin. Berlin; Heidelberg: Springer, 1999. P. 123–138. DOI: 10.1007/978-3-642-60164-4_7.
60. Ponomarev E. I., Zabrodin A. N., Shvetsov E. G., Ponomareva T. V. Wildfire intensity and fire emissions in Siberia // Fire. 2023. V. 6. Iss. 7. Article 246. DOI: 10.3390/fire6070246.
61. Rogers B. M., Soja A. J., Goulden M. L., Randerson J. T. Influence of tree species on continental differences in boreal fires and climate feedbacks // Nature Geoscience. 2015. V. 8. Iss. 3. P. 228–234. DOI: 10.1038/ngeo2352.
62. Roy D. P., Lewis P. E., Justice C. O. Burned area mapping using multi-temporal moderate spatial resolution data — a bi-directional reflectance model-based expectation approach // Remote Sensing of Environment. 2002. V. 83. Iss. 1–2. P. 263–286. DOI: 10.1016/S0034-4257(02)00077-9.
63. Santoro M., Kirches G., Wevers J., Boettcher M., Brockmann C., Lamarche C., Defourny P. Land Cover CCI — Product User Guide. Version 1.1. UCL-Geomatics, Belgium, 2017. 52 p.
64. 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. 17 p.
65. Shinkarenko S. S., Berdengalieva A. N., Doroshenko V. V., Naichuk Ya. A. An analysis of the dynamics of areas affected by steppe fires in Western Kazakhstan on the basis of Earth remote sensing data // Arid Ecosystems. 2023. V. 13. Iss. 1. P. 29–38. DOI: 10.1134/S2079096123010122.
66. Shvidenko A., Schepaschenko D., Sukhinin A., McCallum I., Maksyutov S. Carbon emissions from forest fires in boreal Eurasia between 1998–2010 // Proc. 5th Intern. Wildland Fire Conf. 2011. 11 p.
67. Soja A., Stocks B., Cahoon D. R., Jr., Potter S., Rogers B., Jurko N., Conard S., Gargulinski E., de Groot W., ‘Bill’. New Product! Historic AVHRR-derived Burned Area product and validation for Siberia (1979–2000) // American Geophysical Union, Fall Meeting 2019. 2019. Article GC24C-07, 17 p.
68. Sparks A. M., Boschetti L., Smith A. M. S. et al. An accuracy assessment of the MTBS burned area product for shrub–steppe fires in the northern Great Basin, United States // Intern. J. Wildland Fire. 2015. V. 24. P. 70–78. DOI: 10.1071/WF14131.
69. 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 J. Photogrammetry and Remote Sensing. 2022. V. 191. P. 223–234. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2022.07.015.
70. Talucci A. C., Loranty M. M., Alexander H. D. Siberian taiga and tundra fire regimes from 2001–2020 // Environmental Research Letters. 2022. V. 17. Iss. 2. Article 025001. DOI: 10.1088/1748-9326/ac3f07.
71. Tansey K. J., Binaghi E., Boschetti L., Brivio P. A., Cabral A., Ershov D., Flasse S., Fraser R., Gallo I., Graetz D., Grégoire J.-M., Maggi M., Peduzzi P., Pereira J. M., Sà A., Silva J., Sousa A., Stroppiana D., Vasconcelos M. J. P. Implementation of Regional Burnt Area Algorithms for the GBA2000 Initiative. European Communities, 2002. 169 p.

72. The 2022 GCOS ECVs Requirements / World Meteorological Organization (WMO). Geneva, Switzerland, 2022. 261 p. https://oceanrep.geomar.de/id/eprint/57694/1/GCOS-245_2022_GCOS_ECVs_Requirements.pdf.
73. van der Werf G. R., Randerson J. T., Giglio L. et al. Global fire emissions estimates during 1997–2016 // Earth System Science Data. 2017. V. 9. Iss. 2. P. 697–720. DOI: 10.5194/essd-9-697-2017.
74. Vivchar A. V., Moiseenko K. B., Pankratova N. V. Estimates of carbon monoxide emissions from wildfires in Northern Eurasia for air quality assessment and climate modeling // Izvestiya, Atmospheric Oceanic Physics. 2010. V. 46. Iss. 3. P. 281–293. DOI: 10.1134/S0001433810030023.
75. Wooster M. J., Zhang Y. H. Boreal forest fires burn less intensely in Russia than in North America // Geophysical Research Letters. 2004. V. 31. Iss. 20. Article L20505. DOI: 10.1029/2004GL020805.
76. Wooster M. J., Roberts G. J., Giglio L. et al. Satellite remote sensing of active fires: History and current status, applications and future requirements // Remote Sensing of Environment. 2021. V. 267. Article 112694. DOI: 10.1016/j.rse.2021.112694.
77. Zhu C., Kobayashi H., Kanaya Y., Saito M. Size-dependent validation of MODIS MCD64A1 burned area over six vegetation types in boreal Eurasia: Large underestimation in croplands // Scientific Reports. 2017. V. 7. Iss. 1. Article 4181. DOI: 10.1038/s41598-017-03739-0.

Validation of national and global satellite-derived burned area products in Russia

A. M. Matveev, S. A. Bartalev, V. A. Egorov,
I. A. Saigin, F. V. Stytsenko, S. S. Shinkarenko

*Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia
E-mail: matveevhwre@gmail.com*

The paper presents spatial accuracy assessment of SRBA (Surface Reflectance Burnt Area), a national product developed at Space Research Institute RAS, CGLS Burned Area 300m 3.1 NTC (CGLS BA 3.1), FireCCI51, FireCCIS311, GABAM, MCD64A1 C6, and VNP64A1 C2 global remote sensing burned area products for the territory of Russia. Validation datasets used in this study (with spatial resolution 10–30 m) span over the territory of Russia and cover more than 10^6 km² fire-affected area. In forests in the summer period, the considered products show high accuracy, by the F1-score or the Dice coefficient (DC), of fire-affected area mapping (DC of 0.65–0.8), with the highest result for SRBA (DC = 0.83). In the spring period, characterized by smaller area and low lethality of surface fires in Russian forests, the observed accuracy drops significantly (DC of 0.25–0.6, for SRBA DC = 0.4). In grasslands, CGLS BA 3.1, FireCCI51, and FireCCIS311 show the highest accuracy (DC of 0.55–0.7), while SRBA has the lowest result (DC = 0.33). All satellite-derived products show low accuracy in cropland burning mapping (DC < 0.3). Overall accuracy assessment shows a moderate result for SRBA (DC = 0.5) with higher accuracy for FireCCI51 and FireCCIS311 products (DC ≈ 0.6). GABAM, MCD64A1 C6, and VNP64A1 C2 omit c. 60–70 % fire-affected area. Most reviewed products tend to underestimate burned area by 20–50 %, with the exception of CGLS BA 3.1 due to its high commission error for summer-autumn forest fires.

Keywords: remote sensing, burned area, burned area accuracy assessment, validation

Accepted: 15.05.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-3-9-30

References

1. Bartalev S. A., Stytsenko F. V., An assessment of the forest stands destruction by fires based on the remote sensing data on a seasonal distribution of burnt areas, *Lesovedenie*, 2021, No. 2, pp. 115–122 (in Russian), DOI: 10.31857/S0024114821020029.

2. Bartalev S. A., Belyaev A. I., Egorov V. A., Ershov D. V., Korovin G. N., Korshunov N. A., Kotelnikov R. V., Loupian E. A., Validation of forest burnt area detection and area estimates derived from satellite remote sensing data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2005, Iss. 2, V. 2, pp. 343–353 (in Russian).
3. Bartalev S. A., Egorov V. A., Efremov V. Yu., Loupian E. A., Stytsenko F. V., Flitman E. V., Integrated burnt area assessment based on combine use of multi-resolution MODIS and Landsat-TM/ETM+ satellite data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, V. 9, No. 2, pp. 9–26 (in Russian).
4. Bartalev S. A., Loupian E. A., Stytsenko F. V., Panova O. Y., Efremov V. Yu., Rapid mapping of forest burnt areas over Russia using Landsat data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, V. 11, No. 1, pp. 9–20 (in Russian).
5. Bartalev S. A., Stytsenko F. V., Egorov V. A., Loupian E. A., Satellite-based assessment of Russian forest fire mortality, *Lesovedenie*, 2015, No. 2, pp. 83–94 (in Russian).
6. Bartalev S. A., Egorov V. A., Zharko V. O., Loupian E. A., Plotnikov D. E., Khvostikov S. A., Shabanov N. V., *Sputnikovoe kartografirovanie rastitel'nogo pokrova Rossii* (Land cover mapping over Russia using Earth observation data), Moscow: IKI RAN, 2016, 208 p. (in Russian).
7. Bondur V. G., Gordo K. A., Zima A. L., Satellite research of the effects of wildfires on the territory of Russia for various types of vegetation cover, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2022, No. 6, pp. 74–86 (in Russian), DOI: 10.31857/S0205961422060033.
8. Loupian E. A., Lozin D. V., Balashov I. V. et al., Study of the dependence of forest fire damage degree on burning intensity based on satellite monitoring data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, V. 19, No. 3, pp. 217–232 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-217-232.
9. Loupian E. A., Lozin D. V., Bartalev S. A. et al., Assessment of damage to Russian forests by fires in the XXI century based on analysis of fire intensity using MODIS instrument, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2024, V. 21, No. 6, pp. 233–249 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-6-233-249.
10. Matveev A. M., Bartalev S. A., A comparative analysis of wildfire carbon emissions estimates in Russia according to global inventories, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2024, V. 21, No. 4, pp. 141–161 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-4-141-161.
11. Medvedeva M. A., Makarov D. A., Sirin A. A., Applicability of different spectral indexes based on satellite data for peat fire area estimation, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, V. 17, No. 5, pp. 157–166 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-5-157-166.
12. Ponomarev E. I., Shvetsov E. G., Satellite detection of forest fires and geoinformation methods for calibrating of the result, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, No. 1, pp. 84–91 (in Russian), DOI: 10.7868/s0205961415010054.
13. Rykov D., Dubinin M., Data on burned areas MCD45: description and obtaining, <https://gis-lab.info/>, 11.03.2011, <https://gis-lab.info/qa/mcd45.html>.
14. Saigin I. A., Bartalev S. A., Stytsenko F. V., Accuracy assessment of satellite-based forest fire mortality detection, *Materialy 21-i Mezhdunarodnoi konferentsii "Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa"* (Proc. 21st Intern. Conf. "Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space"), Moscow: IKI RAS, 2023, p. 400 (in Russian), DOI: 10.21046/21DZZconf-2023a.
15. Stytsenko F. V., Bartalev S. A., Egorov V. A., Loupian E. A., Post-fire forest tree mortality assessment method using MODIS satellite data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2013, V. 10, No. 1, pp. 254–266 (in Russian).
16. Khvostikov S. A., Bartalev S. A., An assessment of forest fires potential carbon emissions based on remote sensing and modelling data, *Materialy 19-i Mezhdunarodnoi konferentsii "Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa"* (Proc. 19th Intern. Conf. "Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space"), Moscow: IKI RAS, 2021, p. 387 (in Russian), DOI: 10.21046/19DZZconf-2021a.
17. Khvostikov S. A., Bartalev S. A., Using remote sensing data assimilation into wildfire model to evaluate fire front position, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, V. 19, No. 5, pp. 9–18 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-5-9-18.
18. Shinkarenko S. S., Bartalev S. A., Berdengalieva A. N., Ivanov N. M., Spatio-temporal analysis of burnt area in the Lower Volga floodplain (2022a), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, V. 19, No. 1, pp. 143–157 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-1-143-157.
19. Shinkarenko S. S., Doroshenko V. V., Berdengalieva A. N. (2022b), Burned areas dynamics in zonal landscapes of the south-east of the European part of Russia, *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Ser. geograficheskaya*, 2022, V. 86, No. 1, pp. 122–133 (in Russian), DOI: 10.31857/S2587556622010113.
20. Bondur V. G., Gordo K. A., Voronova O. S. et al., Intense wildfires in Russia over a 22-year period according to satellite data, *Fire*, 2023, V. 6, Iss. 3, Article 99, DOI: 10.3390/fire6030099.

21. Boschetti L., Flasse S. P., Brivio P. A., Analysis of the conflict between omission and commission in low spatial resolution dichotomic thematic products: The Pareto Boundary, *Remote Sensing of Environment*, 2004, V. 91, Iss. 3–4, pp. 280–292, DOI: 10.1016/j.rse.2004.02.015.
22. Boschetti L., Roy D. P., Hoffmann A. A., *MODIS Collection 5 Burned Area product — MCD45. User's Guide Version 2.0*, 2009, 35 p.
23. Boschetti L., Roy D. P., Justice C. O., *International Global Burned Area Satellite Product Validation Protocol. Part I — production and standardization of validation reference data*, Maryland, USA: Committee on Earth Observation Satellites, 2010, 11 p.
24. Boschetti L., Roy D. P., Giglio L. et al., Global validation of the collection 6 MODIS burned area product, *Remote Sensing of Environment*, 2019, V. 235, Article 111490, DOI: 10.1016/j.rse.2019.111490.
25. Chen Y., Hall J., van Wees D. et al., Multi-decadal trends and variability in burned area from the fifth version of the Global Fire Emissions Database (GFED5), *Earth System Science Data*, 2023, V. 15, Iss. 11, pp. 5227–5259, DOI: 10.5194/essd-15-5227-2023.
26. Chuvieco E., Yue C., Heil A. et al., A new global burned area product for climate assessment of fire impacts, *Global Ecology and Biogeography*, 2016, V. 25, Iss. 5, pp. 619–629, DOI: 10.1111/geb.12440.
27. Chuvieco E., Mouillot F., van der Werf G. R. et al., Historical background and current developments for mapping burned area from satellite Earth observation, *Remote Sensing of Environment*, 2019, V. 225, pp. 45–64, DOI: 10.1016/j.rse.2019.02.013.
28. Chuvieco E., Roteta E., Sali M. et al., Building a small fire database for Sub-Saharan Africa from Sentinel-2 high-resolution images, *Science of the Total Environment*, 2022, V. 845, Article 157139, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.157139.
29. Clelland A. A., Marshall G. J., Baster R. et al., Annual and seasonal patterns of burned area products in Arctic-boreal North America and Russia for 2001–2020, *Remote Sensing*, 2024, V. 16, Iss. 17, Article 3306, DOI: 10.3390/rs16173306.
30. Conard S. G., Ponomarev E. I., Fire in the North: The 2020 Siberian Fire Season, *Intern. J. Wildland Fire*, 2020, V. 29, pp. 26–32.
31. Franquesa M., Lizundia-Loiola J., Stehman S. V., Chuvieco E., Using long temporal reference units to assess the spatial accuracy of global satellite-derived burned area products, *Remote Sensing of Environment*, 2022, V. 269, Article 112823, DOI: 10.1016/j.rse.2021.112823.
32. García-Lázaro J. R., Moreno-Ruiz J. A., Riaño D., Arbelo M., Estimation of Burned Area in the Northeastern Siberian boreal forest from a Long-Term Data Record (LTDR) 1982–2015 time series, *Remote Sensing*, 2018, V. 10, Iss. 6, Article 940, DOI: 10.3390/rs10060940.
33. Giglio L., Boschetti L., Roy D. P. et al., The Collection 6 MODIS burned area mapping algorithm and product, *Remote Sensing of Environment*, 2018, V. 217, pp. 72–85, DOI: 10.1016/j.rse.2018.08.005.
34. Giglio L., Schroeder W., Hall J. V., Justice C. O., *MODIS Collection 6 Active Fire Product User's Guide. Revision C*, NASA, 2020, 63 p.
35. Giglio L., Hall J. V., Humber M., Argueta F., Boschetti L., Roy D. P., *Collection 2 VIIRS Burned Area Product User's Guide. Version 1.1*, NASA, 2024, 32 p.
36. 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.
37. Hall J. V., Loboda T. V., Giglio L., McCarty G. W., A MODIS-based burned area assessment for Russian croplands: Mapping requirements and challenges, *Remote Sensing of Environment*, 2016, V. 184, pp. 506–521, DOI: 10.1016/j.rse.2016.07.022.
38. Hall J. V., Argueta F., Giglio L., Validation of MCD64A1 and FireCCI51 cropland burned area mapping in Ukraine, *Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2021, V. 102, Article 102443, DOI: 10.1016/j.jag.2021.102443.
39. Hawbaker T. J., Vanderhoof M. K., Schmidt G. L. et al., The Landsat Burned Area algorithm and products for the conterminous United States, *Remote Sensing of Environment*, 2020, V. 244, Article 111801, DOI: 10.1016/j.rse.2020.111801.
40. Heil A., Pettinari M. L., *ESA Climate Change Initiative — Fire_cci: D1.1 User Requirements Document (URD), Version 7.2*, 2021, 66 p.
41. Justice C., Belward A., Morisette J. et al., Developments in the “validation” of satellite sensor products for the study of the land surface, *Intern. J. Remote Sensing*, 2000, V. 21, Iss. 17, pp. 3383–3390, DOI: 10.1080/014311600750020000.
42. Kharuk V. I., Ponomarev E. I., Ivanova G. A. et al., Wildfires in the Siberian taiga, *Ambio*, 2021, V. 50, Iss. 11, pp. 1953–1974, DOI: 10.1007/s13280-020-01490-x.
43. Kolden C. A., Lutz J. A., Key C. H. et al., Mapped versus actual burned area within wildfire perimeters: Characterizing the unburned, *Forest Ecology and Management*, 2012, V. 286, pp. 38–47, DOI: 10.1016/j.foreco.2012.08.020.

44. Kurbanov E., Vorobev O., Lezhnin S. et al., Remote sensing of forest burnt area, burn severity, and post-fire recovery: A review, *Remote Sensing*, 2022, V. 14, Iss. 19, Article 4714, DOI: 10.3390/rs14194714.
45. Kurbanov E., Vorobev O., Lezhnin S. et al., Temporal and spatial analyses of forest burnt area in the Middle Volga region based on satellite imagery and climatic factors, *Climate*, 2024, V. 12, Iss. 3, Article 45, DOI: 10.3390/cli12030045.
46. 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.
47. 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.
48. 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.
49. Loboda T.V., Csiszar I.A., Estimating burned area from AVHRR and MODIS: Validation results and sources of error, *Contemporary Earth Remote Sensing from Space*, 2005, V. 2, pp. 415–421.
50. Loboda T.V., Hall J.V., Chen D. et al., *Arctic Boreal Annual Burned Area, Circumpolar Boreal Forest and Tundra, V2, 2002–2022*, Oak Ridge, Tennessee, USA: ORNL DAAC, 2024, DOI: 10.3334/ORNLDAAC/2328.
51. 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.
52. 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.
53. Martín M. P., Ceccato P., Flasse S., Downey I., Fire detection and fire growth monitoring using satellite data, In: *Remote Sensing of Large Wildfires in the European Mediterranean Basin*, Berlin; Heidelberg: Springer, 1999, pp. 101–122, DOI: 10.1007/978-3-642-60164-4_6.
54. McCarty J. L., Krylov A., Prishchepov A. V. et al., Agricultural fires in European Russia, Belarus, and Lithuania and their impact on air quality, 2002–2012, In: *Land-Cover and Land-Use Changes in Eastern Europe after the Collapse of the Soviet Union in 1991*, Springer Intern. Publishing, 2017, pp. 193–221, DOI: 10.1007/978-3-319-42638-9_9.
55. Melchiorre A., Boschetti L., Global analysis of burned area persistence time with MODIS data, *Remote Sensing*, 2018, V. 10, Iss. 5, Article 750, DOI: 10.3390/rs10050750.
56. Otón G., Lizundia-Loiola J., Pettinari M. L., Chuvieco E., Development of a consistent global long-term burned area product (1982–2018) based on AVHRR-LTDR data, *Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2021, V. 103, Article 102473, DOI: 10.1016/j.jag.2021.102473.
57. Padilla M., Ramo R., *Copernicus Global Land operations/ “Vegetation and Energy”. “CGLOPS-1”. Burned Area Collection 300M, version 3.1. Quality assessment report*, Iss. 11.10, Copernicus, 2024, 61 p.
58. Padilla M., Ramo R., Sierra S., *Copernicus Global Land operations. “Vegetation and Energy”. “CGLOPS-1”. Burned Area Collection 300M, version 3.1. Algorithm theoretical basis document*, Iss. 12.10, Copernicus, 2024, 53 p.
59. Pereira J.M.C., Sa A.C.L., Sousa A.M.O. et al., Spectral characterisation and discrimination of burnt areas, In: *Remote Sensing of Large Wildfires in the European Mediterranean Basin*, Berlin; Heidelberg: Springer, 1999, pp. 123–138, DOI: 10.1007/978-3-642-60164-4_7.
60. Ponomarev E. I., Zabrodin A. N., Shvetsov E. G., Ponomareva T. V., Wildfire intensity and fire emissions in Siberia, *Fire*, 2023, V. 6, Iss. 7, Article 246, DOI: 10.3390/fire6070246.
61. Rogers B. M., Soja A. J., Goulden M. L., Randerson J. T., Influence of tree species on continental differences in boreal fires and climate feedbacks, *Nature Geoscience*, 2015, V. 8, Iss. 3, pp. 228–234, DOI: 10.1038/ngeo2352.
62. Roy D. P., Lewis P. E., Justice C. O., Burned area mapping using multi-temporal moderate spatial resolution data — a bi-directional reflectance model-based expectation approach, *Remote Sensing of Environment*, 2002, V. 83, Iss. 1–2, pp. 263–286, DOI: 10.1016/S0034-4257(02)00077-9.
63. Santoro M., Kirches G., Wevers J., Boettcher M., Brockmann C., Lamarche C., Defourny P., *Land Cover CCI — Product User Guide. Version 1.1*, UCL-Geomatics, Belgium, 2017, 52 p.
64. 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, 17 p.
65. Shinkarenko S. S., Berdengalieva A. N., Doroshenko V. V., Naichuk Ya. A., An analysis of the dynamics of areas affected by steppe fires in Western Kazakhstan on the basis of Earth remote sensing data, *Arid Ecosystems*, 2023, V. 13, Iss. 1, pp. 29–38, DOI: 10.1134/S2079096123010122.
66. Shvidenko A., Schepaschenko D., Sukhinin A., McCallum I., Maksyutov S., Carbon emissions from forest fires in boreal Eurasia between 1998–2010, *Proc. 5th Intern. Wildland Fire Conf.*, 2011, 11 p.

67. Soja A., Stocks B., Cahoon D. R., Jr., Potter S., Rogers B., Jurko N., Conard S., Gargulinski E., de Groot W., 'Bill', *New Product! Historic AVHRR-derived Burned Area product and validation for Siberia (1979–2000)*, American Geophysical Union, Fall Meeting 2019, 2019, Article GC24C-07, 17 p.
68. Sparks A. M., Boschetti L., Smith A. M. S. et al., An accuracy assessment of the MTBS burned area product for shrub–steppe fires in the northern Great Basin, United States, *Intern. J. Wildland Fire*, 2015, V. 24, pp. 70–78, DOI: 10.1071/WF14131.
69. 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 J. Photogrammetry and Remote Sensing*, 2022, V. 191, pp. 223–234, DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2022.07.015.
70. Talucci A. C., Loranty M. M., Alexander H. D., Siberian taiga and tundra fire regimes from 2001–2020, *Environmental Research Letters*, 2022, V. 17, Iss. 2, Article 025001, DOI: 10.1088/1748-9326/ac3f07.
71. Tansey K. J., Binaghi E., Boschetti L., Brivio P. A., Cabral A., Ershov D., Flasse S., Fraser R., Gallo I., Graetz D., Grégoire J.-M., Maggi M., Peduzzi P., Pereira J. M., Sà A., Silva J., Sousa A., Stroppiana D., Vasconcelos M. J. P., *Implementation of Regional Burnt Area Algorithms for the GBA2000 Initiative*, European Communities, 2002, 169 p.
72. *The 2022 GCOS ECVs Requirements*, World Meteorological Organization (WMO), Geneva, Switzerland, 2022, 261 p., https://oceanrep.geomar.de/id/eprint/57694/1/GCOS-245_2022_GCOS_ECVs_Requirements.pdf.
73. van der Werf G. R., Randerson J. T., Giglio L. et al., Global fire emissions estimates during 1997–2016, *Earth System Science Data*, 2017, V. 9, Iss. 2, pp. 697–720, DOI: 10.5194/essd-9-697-2017.
74. Vivchar A. V., Moiseenko K. B., Pankratova N. V., Estimates of carbon monoxide emissions from wildfires in Northern Eurasia for air quality assessment and climate modeling, *Izvestiya, Atmospheric Oceanic Physics*, 2010, V. 46, Iss. 3, pp. 281–293, DOI: 10.1134/S0001433810030023.
75. Wooster M. J., Zhang Y. H., Boreal forest fires burn less intensely in Russia than in North America, *Geophysical Research Letters*, 2004, V. 31, Iss. 20, Article L20505, DOI: 10.1029/2004GL020805.
76. Wooster M. J., Roberts G. J., Giglio L. et al., Satellite remote sensing of active fires: History and current status, applications and future requirements, *Remote Sensing of Environment*, 2021, V. 267, Article 112694, DOI: 10.1016/j.rse.2021.112694.
77. Zhu C., Kobayashi H., Kanaya Y., Saito M., Size-dependent validation of MODIS MCD64A1 burned area over six vegetation types in boreal Eurasia: Large underestimation in croplands, *Scientific Reports*, 2017, V. 7, Iss. 1, Article 4181, DOI: 10.1038/s41598-017-03739-0.