

Д. Г. Груммо

*Институт экспериментальной ботаники имени В. Ф. Купревича Национальной академии наук Беларуси,  
Минск, Беларусь, e-mail: zm.hrumo@gmail.com***РЕТРОСПЕКТИВНЫЙ АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ПРИРОДНЫХ ПОЖАРОВ  
НА ТЕРРИТОРИИ БЕЛАРУСИ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ  
ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ**

**Аннотация.** Приводятся результаты анализа многолетней серии данных дистанционного зондирования (ежемесячный продукт MCD64A1) как для оценки площадей, подвергшихся воздействию природных пожаров всей территории Беларуси, так и ее отдельных районов. Установлено, что в период с 2001 по 2020 г. по стране за год выгорало от 17,1 до 184,46 тыс. га. Выявлены сезонные пики пожарной активности, закономерности пространственного распределения очагов пожаров в пределах Беларуси и основные типы выгоревшей растительности для отдельных модельных территорий. Оценена точность определения площадей, поврежденных пожарами по данным низкого пространственного разрешения (500 м) с использованием данных среднего пространственного разрешения (30 м), которая составила в среднем 81,7 %. Однако вместе с тем показано, что площади пожаров менее 250 га фиксируются со значительной погрешностью (точность в среднем 19,6 %), что ограничивает возможность использования продукта MCD64A1 для локального и регионального мониторинга при незначительных площадях повреждения пожарами.

**Ключевые слова:** дистанционное зондирование Земли, спутниковый мониторинг, геоинформатика, растительный покров, природные пожары, продукт MCD64A1, Ельня, Ольманские болот

D. G. Grummo

*V. F. Kuprevich Institute of Experimental Botany of the National Academy of Science of Belarus, Minsk, Belarus,  
e-mail: zm.hrumo@gmail.com***RETROSPECTIVE ANALYSIS OF THE NATURAL FIRES DYNAMICS ON THE TERRITORY  
OF BELARUS BASED ON REMOTE SENSING DATA**

**Abstract.** The results of the analysis of a long-term series of remote sensing data (monthly product MCD64A1) are presented to estimate the areas affected by wildfires both for the territory of Belarus as a whole and for its regions. It has been established that in the period from 2001 to 2020, from 17.1 to 184.46 thousand hectares burned out across the country per year. Seasonal peaks of fire activity, patterns of spatial distribution of fire spots within Belarus and the main types of burnt vegetation for some areas have been identified. The accuracy of determining burnt areas using low (500 m) and medium (30 m) spatial resolution data was estimated at an average of 81.7%. However, at the same time, it has been shown that burnt areas of less than 250 hectares are recorded with a significant error (an average accuracy of 19.6 %). This is a limitation of the ability to use the MCD64A1 for local and regional monitoring with small areas of fire damage.

**Keywords:** Earth remote sensing, satellite monitoring, geoinformatics, vegetation cover, natural fires, burnt areas, MCD64A1 product, Yelnya, Olmany mire

Дз. Г. Грумо

*Інстытут эксперыментальнай батанікі імя В. Ф. Курпэвіча Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі,  
Мінск, Беларусь, e-mail: zm.hrumo@gmail.com***РЕТРАСПЕКТЫЎНЫ АНАЛІЗ ДЫНАМІКІ ПРЫРОДНЫХ ПАЖАРАЎ НА ТЭРЫТОРЫІ БЕЛАРУСІ  
ПА ДАДЗЕННЫХ ДЫСТАНЦЫЙНАГА ЗАНДЗІРАВАННЯ**

**Анотацыя.** Прыводзяцца вынікі аналізу шматгадовай серыі дадзеных дыстанцыйнага зандзіравання (штомесячны прадукт MCD64A1), як для ацэнкі плошчаў, якія падвяргаліся ўздзеянню прыродных пажараў на ўсёй тэрыторыі Беларусі, так і асобных раёнаў. Устаноўлена, што за перыяд з 2001 па 2020 г. па краіне за год выгарала ад 17,1 да 184,46 тыс. га. Выяўлены сезонныя пікі пажарнай актыўнасці, заканамернасці прасторавага размеркавання ачагоў пажараў у межах Беларусі і асноўныя тыпы гарэлай расліннасці для асобных мадэльных тэрыторый. Ацэнена дакладнасць вызначэння плошчаў, пашкоджаных пажарамі па дадзеных нізкага прасторавага дазволу (500 м) з выкарыстаннем дадзеных сярэдняга прасторавага дазволу (30 м), якая склала ў сярэднім 81,7 %. Аднак разам з тым паказана, што плошчы пашкоджання пажарамі менш за 250 га фіксуюцца са значнай хібнасцю (дакладнасць у сярэднім 19,6 %), што абмяжоўвае магчымасць выкарыстання прадукта MCD64A1 для лакальнага і рэгіянальнага маніторынгу пры незначных плошчах пашкоджання пажарамі.

**Ключавыя словы:** дыстанцыйнае зандзіраванне Зямлі, спадарожнікавы маніторынг, геаінфарматыка, расліннае покрыва, прыродныя пажары, пашкоджанні пажарамі, прадукт MCD64A1, Ельня, Альманскія балоты

**Введение.** Пожары являются одним из факторов, оказывающим негативное влияние на состояние природных экосистем [1–3]. Причиной большинства природных пожаров является деятельность человека (79 %), из них сельскохозяйственные палы, сжигание порубочных остатков,

пожары от транспортных систем составляют лишь 9,1 % и около 70 % пожаров – неосторожное обращение человека с огнем [4–6].

Стоит признать, что в настоящее время обеспеченность объективной и регулярно обновляемой информации о частоте и площади повреждения пожарами является недостаточной и не отвечает современным экономическим и экологическим требованиям. Разрозненные данные отдельных ведомств и региональных административных органов зачастую не дают целостной картины об масштабах пожаров часто несопоставимы [1, 4, 5, 7–11].

В последние годы при решении задач обнаружения активных пожаров, определения выгораемых при этом площадей, оценки влияния природных пожаров на хозяйственную деятельность человека и их экологических последствий все более широкое применение находит космический мониторинг [5, 6–9, 11–17].

Современные системы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и методы обработки спутниковых изображений позволяют не только получать оперативную информацию, но и строить непрерывные временные ряды исследуемого параметра с возможностями выделения тренда на основе статистического анализа, что дает возможность решать задачи долгосрочного моделирования и прогнозирования пожароопасных ситуаций [6, 8, 13, 18–26].

Для выявления и оценки площадей выгоревших территорий по данным ДЗЗ используется несколько подходов: анализ активных очагов горения (Hotpoint), определяемых по тепловым каналам ДЗЗ [5–9, 11, 27]; анализ выгоревших площадей (Burned Area), определяемых по спектрально-отражательным характеристикам растительного покрова в ближней инфракрасной (ИК) области спектра [11, 28]; комбинированное использования первого и второго подходов [11, 29].

Расчет площадей выгоревших территорий в результате различных видов природных пожаров проводится по спутниковым данным низкого (TERRA, AQUA, NOAA, SuomiNPP, Метеор-М, FY-3 и др.), среднего и высокого (Landsat, IRS, Канопус и др.) пространственного разрешения в зависимости от масштабов исследования [6]. Наряду с возможностью обрабатывать отдельные спутниковые изображения пользователям доступны долговременные серии информационных продуктов по выгоревшим территориям на глобальном и региональном уровне с различным пространственным разрешением, в том числе: 1 км – L3JRC и EKA GLOBCARBON SPOT-ENVISAT; 500 м – MODIS Burned Area MCD45, MCD64; 300 м – Copernicus PROBA-V Burnt Area и Fire\_cci v4.1 MERIS; 250 м – Fire\_cci v5.0 MERIS/MODIS [29] и др. [3, 6, 30].

Согласно исследованию [31], в котором сравнивались продукты MCD64A1, MCD45A1, Copernicus Burnt Area и Fire CCI, наилучшие результаты по обнаружению выгоревших площадей продемонстрировали продукты MCD64A1 и Fire CCI. Вместе с тем в продукте Fire CCI были выявлены крупные артефакты по краям изображений, что иногда приводило к возникновению необоснованно больших площадей горения [31]. Следует отметить также, что в отличие от 5-й коллекции, данные MCD64A1 6-й коллекции менее чувствительны к облачности и аэрозольному загрязнению. Это позволяет выявить на 25 % больше выгоревших территорий, включая участки с площадью менее 1 км<sup>2</sup> [6, 29, 31].

В настоящей публикации анализируется динамика природных пожаров на территории Беларуси за период 2001–2020 гг. Исследования включали решения следующих задач: 1) выполнить анализ истории пожаров за 20-летний цикл; 2) выделить основные проблемные территории в разрезе административного районирования, а также среди особо охраняемых природных территорий (ООПТ); 3) оценить сезонную изменчивость частоты и площади повреждения пожарами; 4) на примере модельных территорий провести анализ выгоревших площадей с различным типом растительности; 5) провести оценку точности определения площадей выгоревших территорий.

**Материалы, методы и объекты исследования.** Количественные оценки пожаров за 20-летний цикл исследований проводили для всей территории Беларуси. Логическая схема последовательности научно-исследовательских работ состоит из 5 этапов.

1. *Подготовка производных спутниковых, тематических и картографических продуктов.* Для выявления пространственно-временных вариаций площадей участков, выгораемых в ре-

зультате природных пожаров на территории Беларуси, был выбран ежемесячный продукт MCD64A1 «Burned Area» 6-й коллекции (аппаратура MODIS, спутники Terra/Aqua). В этом продукте применяется гибридный алгоритм, работающий на совместном использовании данных тепловых аномалий и измерений отражательной способности в ближних ИК-каналах [29]. Алгоритм определяет дату пожара для 500-метровых ячеек сетки в каждом отдельном тайле MODIS [29].

Следует отметить, что продукт MODIS не всегда подходит для надежного мониторинга на региональном и локальном уровнях и точного расчета площадей палов сельскохозяйственных земель, которые характеризуются небольшими площадями, скоротечностью пожаров и сложным мозаичным характером границ участков. Вместе с тем анализ этих данных в разрезе сезонных и многолетних циклических компонентов позволит выделить основные пожароопасные территории в пределах Беларуси, выявить сезонные пики пожарной активности, оценить масштабы природных пожаров на территории страны за последние 20 лет.

Для оценки повторяемости пожаров использован индекс (Fire Recurrence Index), который рассчитывается как количество событий (годы, когда были пожары), разделенный на продолжительность серии мониторинга (в данном случае составляет 20 лет). Значения горения, близкие к единице, означают по крайней мере одно горение каждый год, а значения 0,1 указывают на одно горение каждые 10 лет [32]. Тематический продукт, отражающий пространственное распределение значений Fire Recurrence Index (FRI), представлен на платформе облачных вычислений Google Earth Engine. Для обработки и анализа были выбраны не только данные на пожароопасный период (с апреля по октябрь), но и на весь год в целом. На основании анализа спутниковых продуктов для территории Беларуси создавалась база данных истории пожаров за период 2001–2020 гг., а также составлялись тематические карты (рис. 1, 2).

*2. Оценка точности определения площадей выгоревших территорий.* Существуют различные подходы к валидации результатов, получаемых при космическом мониторинге. Большинство из них основаны на сопоставлении с наземными данными. Однако такой подход требует значительных временных и трудовых затрат на получение и обработку информации, а получение наземных данных зачастую просто невозможно. При проведении работ по валидации результатов мониторинга на глобальном и региональном уровнях дополнительного решения требует вопрос сопоставления масштабов данных, так как наземные данные локальны, более детальны и дискретны, чем космические.

В настоящей работе для валидации использовали подход, при котором космические данные низкого пространственного разрешения (MCD64A1, 500 м) сравнивались с результатами, полученными на основе обработки данных спутников более высокого пространственного разрешения (спутников серии Landsat) с построением модели на основе динамики вегетационных индексов NDVI, NBR, BAI [33].

Модельными полигонами были выбраны 4 лесоболотных комплекса (ЛБК) в Миорском (ЛБК «Ельня», «Болото Мох»), Шарковщинском (ЛБК «Долбенишки») и Столинском (ЛБК «Ольманские болота») районах, поврежденных пожарами в 2002–2019 гг. [33, 34]. Преимуществом рассматриваемого подхода является общий/единый пространственно-временной охват и сопоставимый масштабный ряд сопоставляемых данных [6]. В пределах модельных территорий использовано 1000 контрольных точек (референсные значения). В результате сопоставления были получены значения точности и ошибки классификации по двум классам (выгоревшие участки, фон). Для подтверждения гарей для отдельных лесных территорий также был привлечен ежегодный продукт Global Forest Change 2000-2020 Data с пространственным разрешением 30 м, получаемый с аппаратуры спутников серии Landsat [35], а также цифровая карта растительности болот, отображающая в том числе и постпирогенные растительные сообщества [36].

*3. Выявление типов экосистем, подвергшихся воздействию природных пожаров.* Для этих целей использовалась серия крупномасштабных карт растительного покрова двух модельных полигонов общей площадью 92,93 тыс. км<sup>2</sup> (42,3 % площади страны) в пределах северной, центральной (тестовая территория № 1, площадь 87,18 тыс. км<sup>2</sup>) и южной (тестовая территория № 2, площадь 5,75 тыс. км<sup>2</sup>) частей страны.

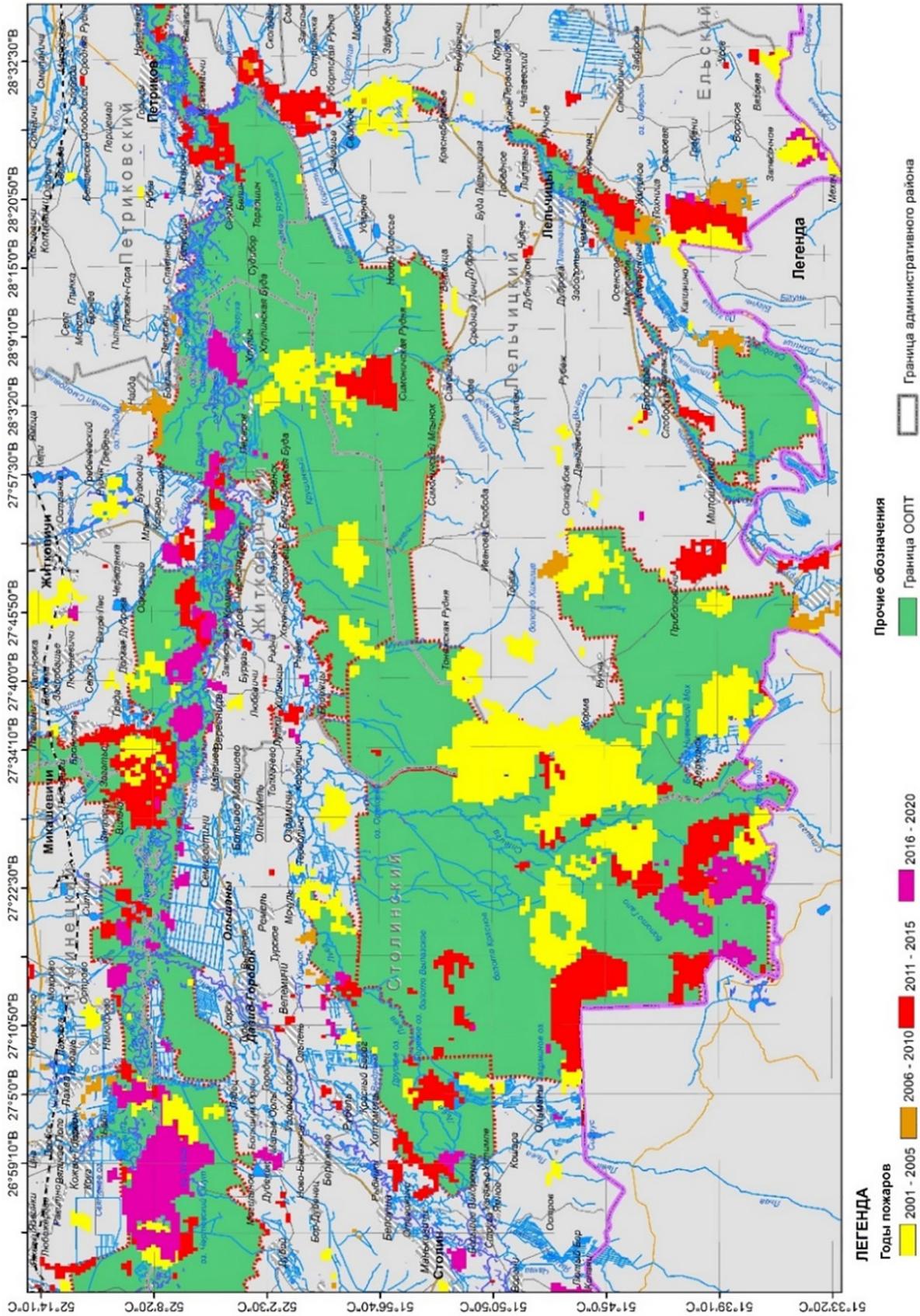


Рис. 1. Фрагмент карты пожаров (2001–2020 гг.) на территории Беларуси, составленной на основе данных MSD64A1 (районы Припятского Полесья)

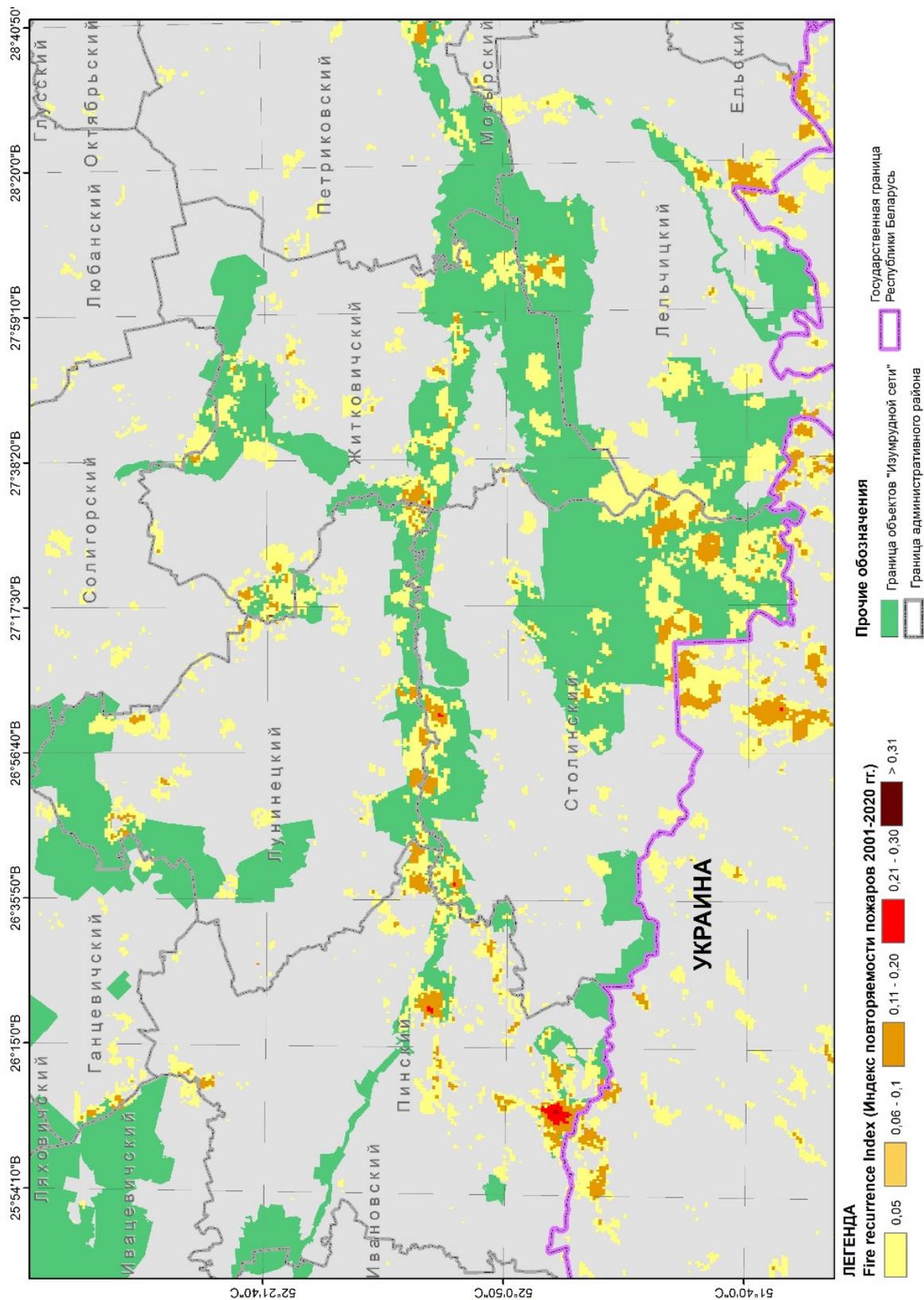


Рис. 2. Фрагмент карты пространственного распределения значений Fire Resurgence Index в пределах Республики Беларусь (районы Припятского Полесья и приграничные украинские территории)

Средствами геоинформационных систем (ГИС) картографические данные космического мониторинга пожаров сопоставлялись с картами растительности тестовых участков и рассчитывались выгоревшие площади для различных типов экосистем.

4. Увязка на панели ГИС производных картографических продуктов с опорными территориальными единицами анализа (административный район, особо охраняемая природная территория).

5. Комплексная пространственная и статистическая обработка спутниковых, тематических и картографических продуктов средствами ГИС. Для каждой опорной территориальной единицы анализа рассчитывались частота и площадь пожаров (по месяцам и годам), а также статистические показатели. Расчеты производились с помощью стандартных процедур пространственного и статистического анализа в среде ArcGIS 10.7 и MS Excel.

**Результаты и их обсуждение.** По данным MCD64A1 за период 2001–2020 гг. зафиксировано 10,5 тыс. природных пожаров на площади 888,9 тыс. га (4,3 % территории Беларуси). Наибольшее количество природных пожаров и выгоревших площадей выявлено в 2002 (1679 случаев – 184,8 тыс. га), 2003 (380 пожаров – 72,3 тыс. га), 2006 (673 пожара – 71,4 тыс. га), 2016 (116 эпизодов – 66,8 тыс. га), 2015 (1358 пожаров – 92,9 тыс. га) и 2020 гг. (505 случаев – 50,8 тыс. га). Средняя площадь пожара составила 148,0±5,4 га (табл. 1, рис. 3). Наиболее крупный по площади (23,7 тыс. га) природный пожар произошел в период с 24.03. по 31.03.2006 г. и охватывал территории трех смежных административных районов Гомельской области (Калинковичский, Хойникский, Речицкий).

Т а б л и ц а 1. Сведения о прохождении природных пожаров на территории Беларуси в 2001–2020 гг. (по данным MCD64A1)

Год	Количество пожаров	Общая выгоревшая площадь, га	Статистические параметры выгоревшей площади каждого эпизода пожара, га			
			среднее	стандартная ошибка	стандартное отклонение	максимум
2001	267	17081,3	97,4	9,9	161,7	1224,6
2002	1679	184791,0	177,9	17,6	719,8	14569,9
2003	380	72310,5	288,1	25,1	489,2	4434,6
2004	230	20160,6	138,1	11,4	173,4	1105,0
2005	451	40588,0	116,0	8,3	175,4	1070,1
2006	673	71384,4	115,0	36,8	954,3	23674,4
2007	277	20583,3	101,4	7,2	119,1	750,5
2008	585	41822,1	105,4	7,2	174,3	1562,8
2009	571	37266,5	82,1	5,2	124,6	1250,3
2010	244	13083,2	92,1	9,6	149,8	964,5
2011	117	5887,9	95,0	14,2	153,7	879,9
2012	633	43398,2	177,9	16,2	407,7	3309,5
2013	171	11327,4	169,1	20,0	260,9	1316,2
2014	1066	66807,7	172,2	10,5	342,9	3036,5
2015	1358	92867,4	158,2	14,9	549,3	10334,4
2016	116	7141,8	115,2	16,6	178,9	800,9
2017	110	6273,2	104,6	13,7	143,5	888,9
2018	345	50565,6	218,9	55,7	1034,0	14898,5
2019	756	34748,8	107,6	7,5	207,5	1966,5
2020	505	50821,4	249,1	29,4	659,7	7494,1
<b>За период</b>	<b>10 534</b>	<b>888 910,3</b>	<b>148,0</b>	<b>5,40</b>	<b>553,9</b>	<b>23 674,4</b>

В последнее десятилетие (2011–2020 гг.) выгоревшие от природных пожаров площади по сравнению с предыдущей декадой (2001–2010 гг.) сократились в 1,4 раза и составили 369,8 тыс. га. Эта тенденция является следствием эффективности проведения землепользователями комплекса противопожарных мероприятий, усиления системы оперативного мониторинга. Наболь-

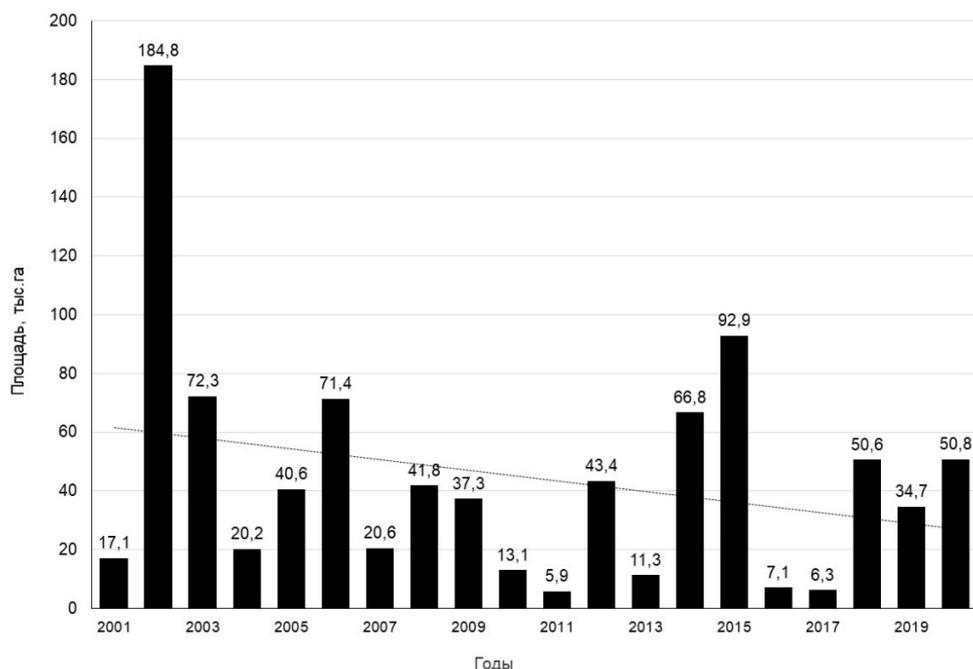


Рис. 3. Динамика выгоревших в результате природных пожаров площадей на территории Беларуси в 2001–2020 гг. (по данным MCD64A1)

шие площади территорий, выгоревших в результате пожаров последнего десятилетия, отмечены в Столинском (35,4 тыс. га), Пинском (33,4 тыс. га), Городокском (16,9 тыс. га), Лунинецком (14,0 тыс. га), Лельчицком (13,9 тыс. га) и Житковичском (13,1 тыс. га) районах.

В целом следует особо обратить внимание на южную часть Беларуси, где в результате осушительной мелиорации в сочетании с экстремальными погодными условиями сформировался пожароопасный пояс, который требует проведения комплекса мероприятий, прежде всего по восстановлению гидрологического режима в нарушенных экосистемах. Также весьма напряженная пирологическая обстановка сложилась в юго-восточных районах Беларуси, подверженных радиоактивному загрязнению после аварии на ЧАЭС (Брагинский, Хойникский, Костюковичский, Краснопольский). Пожары в этом регионе приводят к локальному вторичному радиоактивному загрязнению (рис. 4).

Анализ результатов исследований (рис. 5, 6) показал, что площадь ООПТ, пройденная пожарами за последние 20 лет, составляет 342,1 тыс. га (38,5 % от общей площади пожаров). Наибольшие площади поврежденных пожарами на объектах природно-заповедного фонда выявлены в 2002 (83,0 тыс. га), 2012 (21,4 тыс. га), 2014 (25,1 тыс. га), 2015 (35,3 тыс. га) и 2020 гг. (28,9 тыс. га). Рейтинг наиболее пожароопасных территорий возглавляют республиканские заказники (РЗ) «Средняя Припять» (сумма площадей за 2001–2020 гг. – 42,8 тыс. га), «Ольманские болота» (33,8 тыс. га), «Ельня» (14,3 тыс. га), «Простырь» (13,1 тыс. га), Национальный парк «Припятский» (11,8 тыс. га).

Наиболее крупные пожары в последние 20 лет были отмечены на территории РЗ «Ельня» (05.09–26.09.2002 г.) – 14,0 тыс. га, Полесского государственного радиационно-экологического заповедника (10.06–22.06.2015 г.) – 10,3 тыс. га, РЗ «Ольманские болота» (1–13.09.2015 г.) – 8,8 тыс. га. Анализ табл. 2 показал, что за 20-летний период наблюдений большая часть выгоревших площадей (91,6 %) подверглась воздействию природных пожаров один раз; 8,2 % выгорела 2–4 раза. Менее 0,2 % подвергались выгоранию до 7 раз.

Наиболее высокие значения индекса повторяемости пожаров характерны (рис. 7) для Пинского (FRI = 0,0692), Ивановского (0,065), Речицкого (0,0619), Оршанского (0,0609) и Мозырского (0,0608) административных районов.

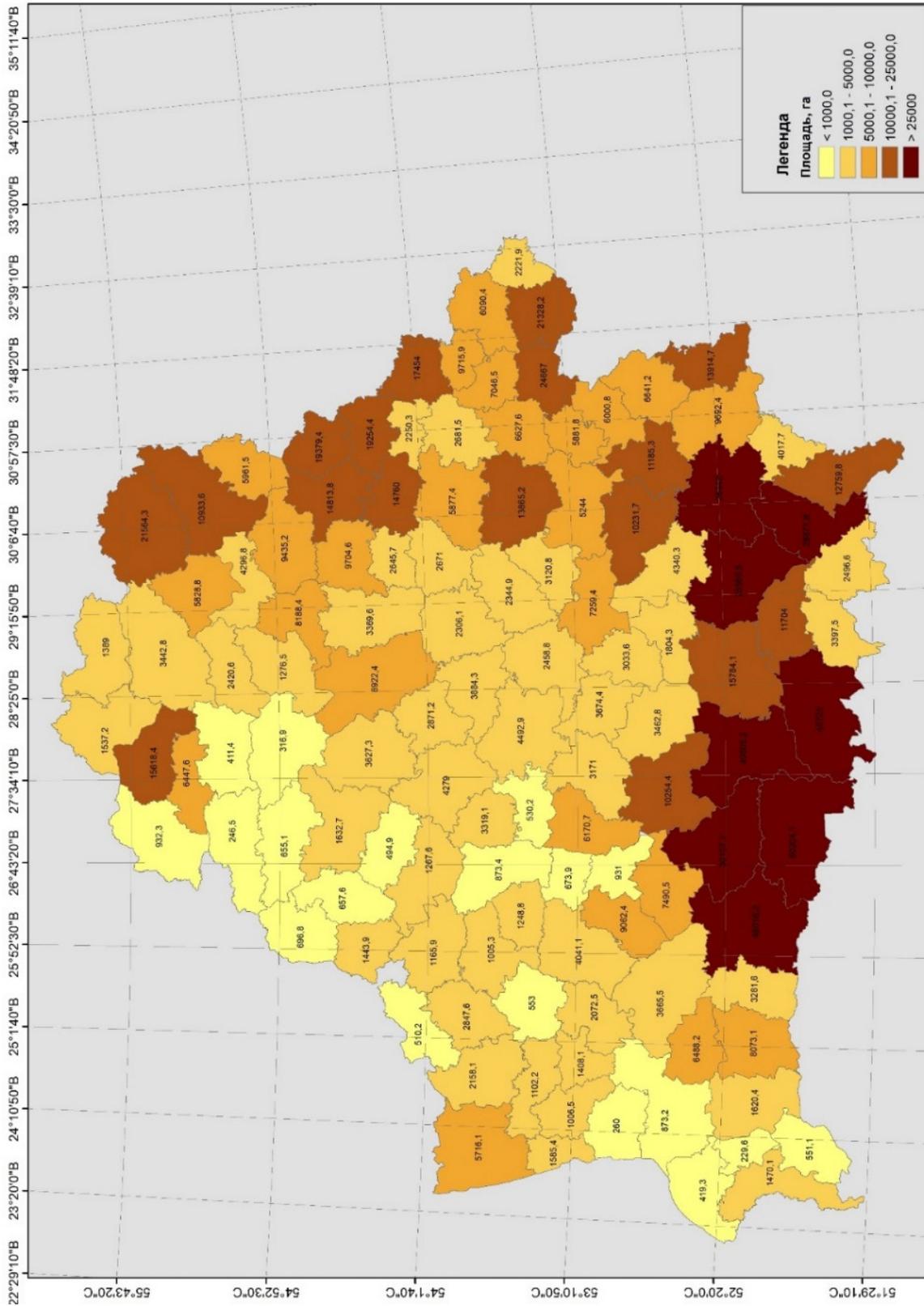


Рис. 4. Распределение площадей экосистем, поврежденных пожарами в 2001–2020 гг. по административным районам Беларуси (по данным МСД64А1)

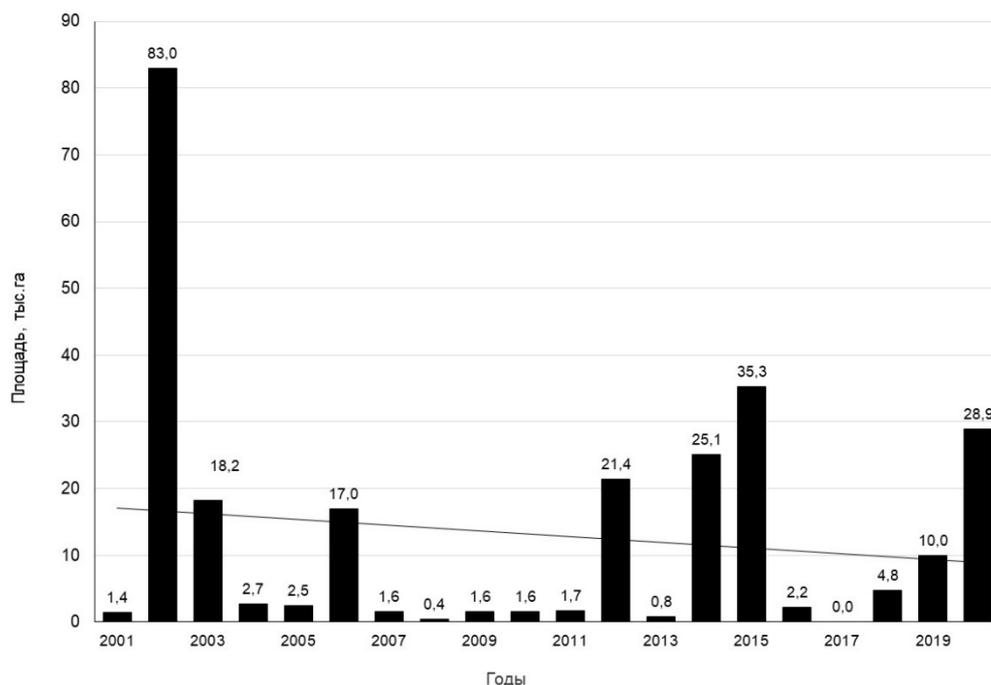


Рис. 5. Динамика пожаров на особо охраняемых природных территориях Беларуси за период 2001–2020 гг. (по данным MCD64A1)

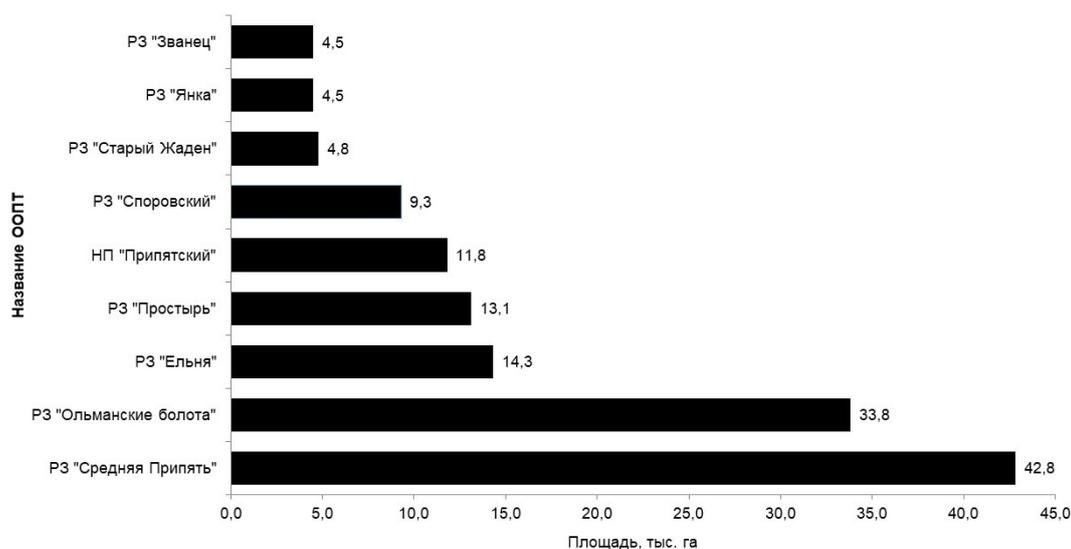


Рис. 6. Распределение выгоревших площадей на особо охраняемых природных территориях (приводится для наиболее пострадавших от природных пожаров ООПТ) за период 2001–2020 гг. (по данным MCD64A1)

Т а б л и ц а 2. Распределение площадей выгоревших участков по частоте возгораний в 2001–2020 гг. (по данным карты распределения значений Fire Recurrence Index)

Частота возгораний за 2001–2020 гг.	Площадь	
	га	%
1	814 291,8	91,6
2–3	72 953,5	8,2
4–6	1616,5	0,2
>6	48,5	<0,1
<b>Всего</b>	<b>888 910,3</b>	<b>100,0</b>

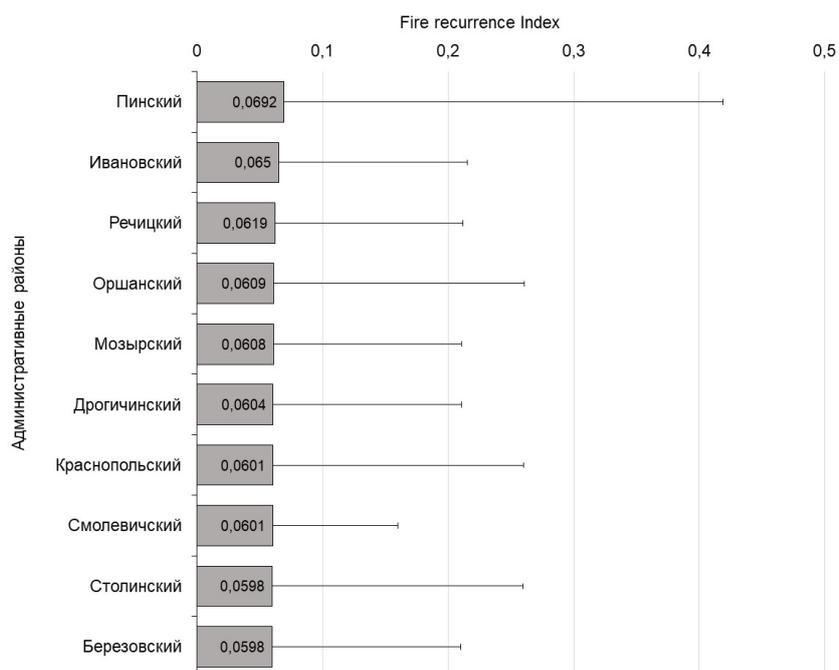


Рис. 7. Вариабельность (среднее и максимальное значения) Fire recurrence Index в разрезе административных районов (приводится для 10 районов с наиболее высоким значением индекса)

Сезонная изменчивость площадей выгоревших территорий за период представлена в табл. 3 и на рис. 8, 9. Наиболее пожароопасные месяцы за цикл наблюдений – март (31,9 % от общей площади выгоревших территорий), апрель (33,9 %), сентябрь (9,1 %). Анализ по отдельным десятилетним периодам показал:

в последнее десятилетие (2011–2020 гг.) резко сократилась площадь летних пожаров: в 2001–2010 гг. их доля составляла в среднем 20,8 % в общей площади пожаров, а в 2011–2020 гг. только 5,5 %;

отмечается существенное снижение доли «осенних» пожаров (сентябрь–ноябрь): с 26,2 (2001–2010 гг.) до 13,8 % (2011–2020 гг.);

возрастающий тренд характерен для «весенних» пожаров, пик которых сместился с марта на апрель: от 51,1 (2001–2010 гг.) до 72,9 % (2011–2020 гг.);

Т а б л и ц а 3. Распределение площадей выгоревших территорий, поврежденных пожарами по месяцам и временным периодам (по данным МСД64А1)

Месяц	Доля от общей площади выгоревших территорий по временным периодам, %		
	2001–2010 гг.	2011–2020 гг.	2001–2021 гг.
Январь	–	0,1	–
Февраль	0,2	7,3	4,9
Март	34,1	30,8	31,9
Апрель	17,0	42,1	33,9
Май	1,7	0,4	0,9
Июнь	1,2	2,3	1,9
Июль	8,9	1,1	3,7
Август	10,7	2,1	4,9
Сентябрь	21	3,2	9,1
Октябрь	5,1	10	8,4
Ноябрь	0,1	0,6	0,4
<b>Общая площадь выгоревших территорий, тыс. га</b>	<b>519,1</b>	<b>369,8</b>	<b>888,9</b>

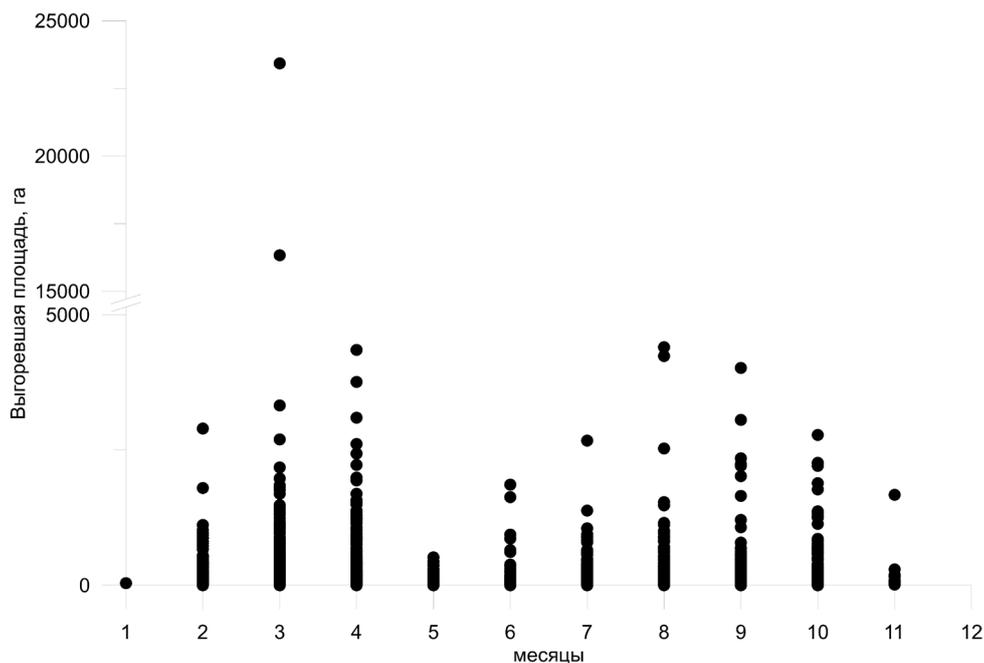


Рис. 8. Сезонная изменчивость площадей выгоревших территорий за период 2000–2020 гг. (по данным MCD64A1)

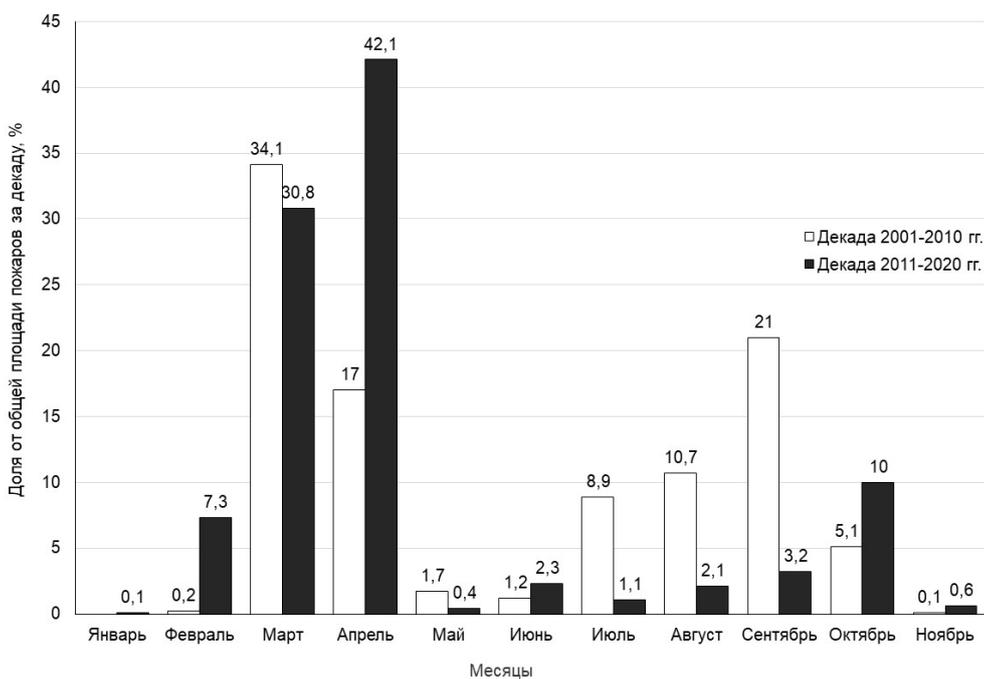


Рис. 9. Распределение площадей, выгоревших от пожаров по месяцам и десятилетним циклам (по данным MCD64A1)

климатические аномалии (малоснежные зимы) объясняют стремительный рост площадей пожаров в зимний период: в декаде 2011–2020 гг. доля пожаров в январе–феврале составила 7,4 %, что существенно выше, чем в предыдущей декаде (2001–2010 гг.), где аналогичный показатель составил 0,2 %.

Результаты совместного анализа данных спутникового мониторинга на основе продукта MCD64A1 и карт растительности тестовых участков позволил сопоставить выгоревшие площа-

ди и преобладающие типы экосистем (табл. 4). Следует отметить, что тенденции по различным секторам Беларуси не являются одинаковыми, что, на наш взгляд, связано с практикой землепользования, а также особенностями структуры растительного покрова.

В северном (Витебская, частично Могилевская области) центральном (частично Минская область) секторах Беларуси основная доля возгораний характерна для агроэкосистем (52,4 %) и лесов (32,6 %). На долю болот и производных внепойменных лугов приходится соответственно 5,5 и 4,7 % выгоревших площадей. В южном тестовом участке (Столинский район Брестской области, Житковичский, Лельчицкий, Петриковский районы Гомельской области) наиболее значительные площади выгорания приходятся на лесные (36,3 %) и болотные экосистемы (32,9 %). На долю пахотных земель приходится 11,9 % выгоревших площадей, кустарниковых зарослей – 7,5 %, пойменных лугов – 6,4 %, нарушенных торфяников – 3,7 %.

Т а б л и ц а 4. Суммарные значения выгоревших площадей с различным типом растительности и доля от общей выгоревшей площади по тестовым территориям за период с 2001 по 2020 г.

Экосистемы	Тестовая территория № 1 (северный и центральный секторы Беларуси)		Тестовая территория № 2 (южный сектор Беларуси)	
	га	%	га	%
<b>Леса</b>	<b>96 408,6</b>	<b>32,6</b>	<b>30 793,3</b>	<b>36,3</b>
Леса недостаточного и неустойчивого увлажнения	4 316,8	1,5	4604,6	5,4
Леса нормального увлажнения	30 793,2	10,4	2877,9	3,4
Леса повышенного увлажнения	50 362,7	17,0	11 223,7	13,2
Леса на торфяных болотах	8 058,0	2,7	11 511,5	13,6
Леса на торфяных болотах (осушенные)	2 877,9	1,0	575,6	0,7
<b>Болота</b>	<b>16 691,6</b>	<b>5,5</b>	<b>27 915,2</b>	<b>32,9</b>
Болота кустарничково-сфагновые верховые	5 467,9	1,8	16 979,4	20,0
Грядово-мочажинные верховые болота	4 604,6	1,5	1 151,1	1,4
Топи на верховых и переходных болотах, низинные болота	4 892,4	1,6	3 741,2	4,4
Осоково-сфагновые переходные	1 726,7	0,6	6 043,5	7,1
<b>Кустарники</b>	<b>6 331,3</b>	<b>2,1</b>	<b>6 331,3</b>	<b>7,5</b>
Кустарники	6 331,3	2,1	6 331,3	7,5
<b>Пойменные луга</b>	<b>3 453,4</b>	<b>1,2</b>	<b>5 468,0</b>	<b>6,4</b>
Настоящие пойменные луга	2 302,3	0,8	5 180,2	6,1
Сырые и болотистые пойменные луга	1 151,1	0,4	287,8	0,3
<b>Внепойменные луга</b>	<b>13 813,7</b>	<b>4,7</b>	<b>1 151,2</b>	<b>1,3</b>
Настоящие внепойменные луга	12 087,0	4,1	863,4	1,0
Сырые и болотистые внепойменные луга	1 726,7	0,6	287,8	0,3
<b>Антропогенно-нарушенные земли</b>	<b>159 433,9</b>	<b>53,9</b>	<b>13 238,2</b>	<b>15,6</b>
Нарушенные торфяники	4 316,8	1,5	3 165,7	3,7
Агроэкосистемы (пахотные земли)	155 117,1	52,4	10 072,5	11,9

Т а б л и ц а 5. Площади выгоревших участков тестовых территорий, рассчитанные по различным продуктам на основе данных космического мониторинга 2001–2020 гг. (по данным MCD64A1)

Тестовая территория	Сравнение определения площадей выгоревших в 2001–2020 гг. участков по различным спутниковым продуктам, га		Общая точность определения выгоревших территорий, %		
	модель на основе динамики индексов NDVI, NBR, BAI, рассчитанные по данным спутника Landsat [33]	продукт MCD64A1	число контрольных точек	число точно определивших	общая точность
ЛБК «Ольманские болота»	30 967,5	34 504,2	531	424	79,8
ЛБК «Ельня»	12 629,1	14 093,5	330	278	84,2
ЛБК «Болото Мох»	786,8	847,9	19	19	100,0
ЛБК «Долбенишки»	3 884,9	4 408,8	120	96	80,0
<b>Итого</b>	<b>48 268,3</b>	<b>52 676,9</b>	<b>1000</b>	<b>817</b>	<b>81,7</b>

Оценка точностей определения площадей выгоревших участков по различным спутниковым продуктам представлена в табл. 5. Расчет площадей выгоревших территорий на основе динамики индексов NDVI, NBR, BAI и данных продукта MCD64A1 показал сходство моделей в сред-

нем на 91,6 % (пределы по тестовым участкам от 88,1 до 97,8 %). Точность классификации по двум классам (выгоревшая территория, фон) в сравнении с результатами, полученными на основе обработки данных спутников более высокого пространственного разрешения, составила в среднем 81,7 % (пределы 79,8–100 %). В целом площади пожаров <250 га фиксируются со значительной погрешностью (точность в среднем 19,6 %), что ограничивает возможность использования продукта MCD64A1 для локального и регионального мониторинга при незначительных площадях повреждения пожарами.

**Заключение.** Проанализированы ежегодные серии данных спутникового мониторинга, получаемые со спутников Terra/Aqua. На основании проведенного анализа выявлены пространственно-временные вариации выгораемых площадей, а также их статистические характеристики как для всей территории Беларуси, так и для всех административных районов страны.

Установлено, что наибольшие суммарные значения площадей, выгоревших в результате природных пожаров в 2001–2020 гг., были зафиксированы в 2002 (184,8 тыс. га), 2015 (92,9 тыс. га), 2003 (72,3 тыс. га), 2006 (71,4 тыс. га), 2016 (66,8 тыс. га) и 2020 гг. (50,8 тыс. га). В последнее десятилетие (2011–2020 гг.) площади пожаров по сравнению с предыдущей декадой (2001–2010 гг.) сократились в 1,4 раза. Для территории Беларуси были выделены сезонные пики пожарной активности. Наиболее пожароопасные месяцы за цикл наблюдений: март (31,9 % от общей площади выгоревших территорий), апрель (33,9 %), сентябрь (9,1 %). Анализ частоты горимости площадей на территории Беларуси показал, что за 20-летний период среди поврежденных пожарами территорий 8,4 % площади выгорало в 2 и более раз. В северном и центральном секторах Беларуси основная доля возгораний характерна для агроэкосистем (52,4 %) и лесов (32,6 %). В южном тестовом участке наиболее значительные площади выгорания приходятся на леса (36,3 %) и болота (32,9 %).

Установлено, что общая точность определения границ полностью выгоревших территорий (при минимальной выгоревшей площади в эпизоде пожара – 787 га) по данным MCD64A1 в среднем составляет 81,7 %. Показано, что площади пожаров менее 250 га фиксируются со значительной погрешностью (точность в среднем 19,6 %), что ограничивает возможность использования продукта MCD64A1 для локального и регионального мониторинга при незначительных площадях (<250 га) повреждения пожарами. Для этих целей мониторинг пожаров необходимо дополнять данными спутников более высокого пространственного разрешения.

Вместе с тем предложенные подходы позволяют получать качественное и экономически выгодное информационное обеспечение для систем принятия управленческих решений по уменьшению и предотвращению ущерба от природных пожаров на региональных уровнях на основе данных дистанционного зондирования.

### Список использованных источников

1. Приоритетные направления развития лесной науки как основы устойчивого управления лесами / Н. В. Лукина [и др.] // Лесоведение. – 2015. – № 4. – С. 243–254.
2. Ильина, В. Н. Пирогенное воздействие на растительный покров / В. Н. Ильина // Самарская Лука: проблемы региональной и глобальной экологии. – 2011. – Т. 20, № 2. – С. 4–30.
3. Chu, T. Remote Sensing Techniques in Monitoring Post-Fire Effects and Patterns of Forest Recovery in Boreal Forest Regions: A Review / T. Chu, X. Guo // Remote Sensing. – 2014. – N 6. – P. 470–520.
4. Воробьев, Ю. Л. Лесные пожары на территории России: Состояние и проблемы / Ю. Л. Воробьев, В. А. Акимов, Ю. И. Соколов; под общ. ред. Ю. Л. Воробьева. – МЧС России. – М.: ДЭКС-ПРЕСС, 2004. – 312 с.
5. Бондур, В. Г. Космический мониторинг природных пожаров в России в условиях аномальной жары 2010 г. / В. Г. Бондур // Исследование Земли из космоса. – 2011. – № 3. – С. 3–13.
6. Бондур, В. Г. Космический мониторинг воздействия природных пожаров на состояние различных типов растительного покрова в федеральных округах Российской Федерации / В. Г. Бондур, М. Н. Цидилина, Е. В. Черепанова // Исследование Земли из космоса. – 2019. – № 3. – С. 13–32.
7. Бондур, В. Г. Космический мониторинг эмиссий малых газовых компонент и аэрозолей при природных пожарах в России / В. Г. Бондур // Исследование Земли из космоса. – 2015. – № 6. – С. 21–35.
8. Бондур, В. Г. Пространственно-временные распределения площадей природных пожаров и эмиссий углеродсодержащих газов и аэрозолей на территории северной Евразии по данным космического мониторинга / В. Г. Бондур, К. А. Гордо, В. Л. Кладов // Исследование Земли из космоса. – 2016. – № 6. – С. 3–20.

9. Бондур, В. Г. Космический мониторинг площадей, пройденных огнем, и объемов эмиссий вредных примесей при лесных и других природных пожарах на территории Российской Федерации / В. Г. Бондур, К. А. Гордо // Исследование Земли из космоса. – 2018. – № 3. – С. 41–55.
10. Швиденко, А. З. Климатические изменения и лесные пожары в России / А. З. Швиденко, Д. Г. Щепаченко // Лесоведение. – 2013. – № 5. – С. 50–61.
11. Оценка площади пожаров на основе комплексирования спутниковых данных различного пространственного разрешения MODIS и Landsat-TM/ETM+ / С. А. Барталев [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2012. – Т. 9, № 2. – С. 9–27.
12. Бондур, В. Г. Принципы построения космической системы мониторинга Земли в экологических и природно-ресурсных целях / В. Г. Бондур // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 1995. – № 2. – С. 14–38.
13. Бондур, В. Г. Методы аэрокосмической диагностики лесных экосистем / В. Г. Бондур, В. Ф. Крапивин, И. И. Потапов // Экологические системы и приборы. – 2010. – № 3. – С. 17–26.
14. Бондур, В. Г. Мониторинг и прогнозирование природных катастроф / В. Г. Бондур, В. Ф. Крапивин, В. П. Савиных. – М.: Научный мир, 2009. – 692 с.
15. Бондур, В. Г. Концепция создания систем мониторинга окружающей среды в экологических и природно-ресурсных целях / В. Г. Бондур, А. И. Савин // Исследование Земли из космоса. – 1992. – № 6. – С. 70–78.
16. Савин, А. И. Научные основы создания и диверсификации глобальных аэрокосмических систем / А. И. Савин, В. Г. Бондур // Оптика атмосферы и океана. – 2000. – Т. 13, № 1. – С. 46–62.
17. Аэрокосмический мониторинг объектов нефтегазового комплекса / под ред. В. Г. Бондура. – М.: Научный мир, 2012. – 558 с.
18. Бондур, В. Г. Современные подходы к обработке больших потоков гиперспектральной и многоспектральной аэрокосмической информации / В. Г. Бондур // Исследование Земли из космоса. – 2014. – № 1. – С. 4–16.
19. Бондур, В. Г. Методы и программы обработки и классификации аэрокосмических изображений / В. Г. Бондур, С. А. Старченков // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2001. – № 3. – С. 118–143.
20. Бондур, В. Г. Анализ текстуры радиолокационных изображений растительности / В. Г. Бондур, Т. Н. Чимитдоржиев // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2008. – № 5. – С. 9–14.
21. Бондур, В. Г. Дистанционное зондирование растительности оптико-микроволновыми методами / В. Г. Бондур, Т. Н. Чимитдоржиев // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2008. – № 6. – С. 64–73.
22. Pan-Eurasian Experiment (PEEX): Towards a holistic understanding of the feedbacks and interactions in the land-atmosphere-ocean-society continuum in the Northern Eurasian region / H. K. Lappalainen [et al.] // Atmospheric Chemistry and Physics. – 2016. – Vol. 16 (22). – P. 14421–14461.
23. Analysing forest recovery after wildfire disturbance in boreal Siberia using remotely sensed vegetation indices / C. M. Gonzalez [et al.] // Global Change Biology. – 2009. – Vol. 15. – P. 561–577.
24. Chu, T. Remote sensing approach to detect post-fire vegetation regrowth in Siberian boreal larch forest / T. Chu, X. Guo, K. Takeda // Ecological Indicators. – 2016. – Vol. 62. – P. 32–46.
25. Post-Fire Vegetation Succession and Surface Energy Fluxes Derived from Remote Sensing / X. Li [et al.] // Remote Sensing. – 2018. – Vol. 10. – P. 1000.
26. Analyzing spatial and temporal variability in short-term rates of post-fire vegetation return from Landsat time series / R. J. Frazier [et al.] // Remote Sensing of Environment. – 2018. – Vol. 205. – P. 32–45.
27. Bondur, V. G. Satellite monitoring of wildfires and their effects in the Northern Eurasia / V. G. Bondur, K. A. Gordo // 17-th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2017, 29 June – 5 July, 2017. – Albena, Bulgaria. – P. 227–238.
28. Satellite-based Mapping of Fires in Russia: New Products for Fire Management and Carbon Cycle Studies / A. I. Sukhinin [et al.] // Remote Sensing of Environment. – 2005. – Vol. 94. – P. 428.
29. Giglio, L. The Collection 6 MODIS burned area mapping algorithm and product / L. Giglio [et al.] // Remote Sensing of Environment. – 2018. – Vol. 217. – P. 72–85.
30. Ten Years of Global Burned Area Products from Spaceborne Remote Sensing – A Review: Analysis of User Needs and Recommendations for Future Developments / F. Mouillot [et al.] // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. – 2014. – Vol. 26. – P. 64–79.
31. Spatial and temporal intercomparison of four global burned area products / M. L. Humber [et al.] // International Journal of Digital Earth. – 2018. – N 23. – P. 1–25.
32. Overview of Land Degradation Neutrality (LDN) in Europe and Central Asia. Food and Agriculture Organization of the United Nations. – Rome, 2022. – 88 p.
33. Русецкий, С. Г. Оценка современной пирологической ситуации на территории лесоболотного комплекса «Ольманские болота». История пожаров / С. Г. Русецкий, Д. Ю. Жилинский, Д. Г. Груммо // Ботаника: исследования. – 2020. – Вып. 49. – С. 124–133.
34. Флора и растительность ландшафтного заказника «Ельня» / Д. Г. Груммо [и др.]; под ред. Н. Н. Бамбалова. – Минск: Минсктиппроект, 2010. – 200 с.
35. High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change / M. C. Hansen [et al.] // Science. – 2013. – Vol. 342. – P. 850–853.
36. Картографирование растительности торфяных болот и заболоченных земель Беларуси: методические подходы и результаты / Д. Г. Груммо [и др.] // Растительность болот: современные проблемы классификации, картографирования, использования и охраны: материалы IV Междунар. науч. семинара (22–24 сентября 2021 г., Минск–Витебск) / Ин-т эксперимент. ботаники НАН Беларуси, Витеб. гос. ун-т им. П. М. Машерова. – Минск: Колорград, 2021. – С. 29–37.

Поступила 23.02.2022