

<https://doi.org/10.51301/ejsu.2023.i3.05>

## Earth remote sensing application for forest fire size, burn state and fire recovery

N. Shogelova<sup>1\*</sup>, S. Sartin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>International Educational Corporation, Almaty, Kazakhstan

<sup>2</sup>North Kazakhstan University named after M. Kozybayev, Petropavlovsk, Kazakhstan

\*Corresponding author: [nazym-shogelova@mail.ru](mailto:nazym-shogelova@mail.ru)

**Abstract.** Forest fires greatly affect forest ecosystems, causing the loss of their biodiversity and their resilience. In addition, they have a strong impact on the global carbon balance and, ultimately, climate change. This article analyzes studies of remote sensing techniques and data used to estimate the area of forest burnt, fire severity, fire impacts, and patterns of reforestation at the global level. The study discusses the results of an analysis based on 329 selected articles on major aspects of the field of study published in 48 journals over the past two decades (2000-2020). Article characteristics were analyzed, including journals, spatial extent, geographic distribution, types of remote sensing sensors, ecological zoning, tree species, spectral indices, and accuracy measures used in the studies. The paper also discusses the main trends, problems and the increasing value of various remote sensing methods in assessing the area of forest fires, the severity of fires and post-fire recovery. Finally, it identifies potential opportunities for future research using next-generation remote sensing systems, classification methods and cloud computing, as well as new process platforms for regional and large-scale research applications.

**Keywords:** forest fires, earth remote sensing, area of forest fires, fire severity, forest restoration.

### 1. Введение

Пожары в природе - это периодические нарушения, которые сильно влияют на строение и распространение глобальных лесных экосистем, изменение эрозии почвы, вызывающее утрату биоразнообразия, среды обитания, производства и продуктивности, подвергая опасности жизни людей и разрушая средства к существованию [1]. За последние два десятилетия во всем мире было сожжено более 7.20 млрд га земли лесными пожарами в среднем на 400 млн га ежегодно [2]. Согласно анализу Продовольственной и сельскохозяйственной организации, с 2001 по 2020 год площадь леса (покрытый деревьями) составляли около 29% от общей площади, выжженной лесными пожарами [3].

Кроме того, лесные пожары оказывают сильное влияние на изменение климата из-за быстрого выброса углерода, депонированного в лесной биомассе, в атмосферу [4, 5]. В последние десятилетия быстро меняющийся климат увеличил частоту и силу лесных пожаров [6, 7] и по прогнозам дальнейшего потепления, вероятно, вызовет более серьезные последствия для лесов и увеличение площади пожаров [8, 9, 10]. Растущее опасения по поводу воздействия изменения климата увеличили потребность в разработке политики устойчивого лесопользования, направленной на снижение выбросов парниковых газов и повысить эффективность управления пожарами [11, 12, 13]. Растущая озабоченность по поводу воздействия изменения климата увеличила потребность в разработке политики устойчивого лесопользования, направленной на сокращение выбросов парниковых газов и повышение эффективности борьбы с пожарами [14, 15].

За последние несколько десятилетий использование данных космических датчиков дало уникальные достижения профессиональному сообществу в обнаружении нарушений лесных экосистем, особенно для оценки пространственно-временной динамики пожаров и картирования площади возгорания [16, 17]. Методы дистанционного зондирования становятся беспрецедентной альтернативой дорогостоящим и трудоемким полевым мероприятиям при мониторинге лесных экосистем на больших и удаленных географических территориях [18, 19]. Мультиспектральные спутниковые изображения широкого пространственного разрешения широко использовались при измерении лесных площадей до и после пожаров для картографирования в региональном и глобальном масштабах [20, 21], а также для оценки интенсивности пожаров [22, 23] и восстановления растительности [25, 26].

Учитывая его важность мониторинга лесных экосистем и политики управления окружающей средой, основной целью этой работы является обзор современных методов дистанционного зондирования и данных для оценки площадей и тяжести лесных пожаров и моделей восстановления лесов на глобальном уровне, которые были применены в исследовательских статьях, опубликованных в рецензируемых научных журналах в период с 2000 по 2020 год.

В этой работе использовался систематический подход обзора литературы с 2000 по 2021 год с акцентом только на научных рецензируемых работах в области площади возгорания, дистанционного зондирования и лесных экосистем на локальном, региональном и глобальном уровнях. Данный промежуток времени выбран по двум причинам. Во-первых, исследования в области

приложений для дистанционного зондирования и оценки лесных экосистем и лесных пожаров заметно расширились, особенно в последние десятилетия из-за быстрого роста числа источников данных наблюдения Земли. Во-вторых, за последние два десятилетия появилось несколько всесторонних обзоров из разных уголков мира, свидетельствующих о растущем интересе к области исследования среди профессионального сообщества [27, 28].

Был определен набор ключевых слов для первичного поиска в электронных базах данных Scopus (Elsevier) и Web of Science (Clarivate Analytics): «дистанционное зондирование», «леса», «пожар», «тяжесть ожога». Дальнейший поиск проводился в тех же базах данных с изменением ключевых слов для конкретных спутников (MODIS, Landsat, Sentinel и др.). Первоначальная попытка показала, что 1140 научных публикаций были идентифицированы в соответствии с установленными критериями поиска, из которых 660 статей были идентифицированы через Web of Science, а 480 были найдены в базе данных Scopus (рисунок 1).

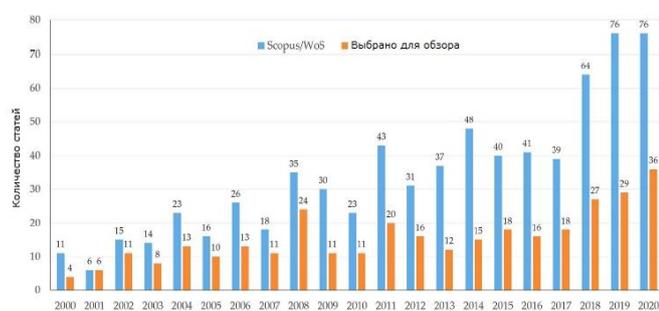


Рисунок 1. Временное распределение имеющихся и избранных публикаций с 2000 по 2020 г.

На этапе проверки поиск статей был усовершенствован путем удаления дубликатов из двух баз данных. Дальнейший отбор был сделан путем чтения аннотаций статей для выявления исследований, посвященных методам дистанционного зондирования для мониторинга и оценки лесных площадей после пожаров. Если в аннотации не было четко указано, что исследование связано с возгоранием леса, авторы продолжали просматривать полный текст, чтобы определить цель и методологию статьи. Также исключили публикации без рецензирования и статьи, в которых пожары затронули другие экосистемы (луга, кустарники, сельскохозяйственные угодья, луга и т.д.). Однако это не всегда было возможно из-за того, что в некоторых региональных и глобальных исследованиях леса классифицировались наряду со многими другими типами земного покрова. Следующий этап состоял в тщательном рассмотрении оставшихся 605 статей по следующим критериям:

- Методы дистанционного зондирования являются основными компонентами исследования;
- Исследование дает точную во времени оценку площади и тяжести возгорания леса с использованием различных наборов данных для проверки результатов картирования;
- Статья надлежащим образом описывает методы и/или результаты исследования, чтобы они могли быть интерпретированы и воспроизведены;

- Основное внимание уделялось лесным насаждениям, а не другим атрибутам экосистемы (почвы, воды, подлесок);

- В исследовании должны быть представлены подробные результаты оценки точности.

В окончательный список были включены 329 статей соответствующие критериям поиска на платформе Mendeley для проведения дальнейшего анализа. Затем были извлечены данные из выбранного фонда публикаций и объединены в несколько различных категорий, связанных с географическим регионом территории, используемым датчиком, пространственным масштабом лесного пожара, временным масштабом исследования, типом пожара, лес (основные древесные породы), подходы к классификации и моделированию, индексы растительности, используемый метод точности, год публикации и справочные (проверочные) данные.

Количество исследований, проводимых в области дистанционного зондирования площади и тяжести возгорания леса и послепожарного восстановления, существенно увеличилось, о чем свидетельствует количество статей, опубликованных в период с 2000 по 2020 г. Это хорошо подтверждается общей тенденцией увеличения публикационной активности в области дистанционного зондирования, доступности и политики открытого доступа к данным наблюдений за Землей, а также важность предотвращения лесных пожаров для действий по устойчивому управлению лесами [1, 3]. За период 2000–2010 гг. были отобраны для дальнейшего рассмотрения 122 (38%) публикации, а за 2011–2020 гг. их число почти удвоилось и составило 204 публикации (62%).

Анализ данных показал, что выбранные статьи были опубликованы в 48 рецензируемых журналах. Основными журналами-источниками 329 статей были: Remote Sensing of Environment (74 статьи), Remote Sensing (56 статей), International Journal of Remote Sensing (39), International Journal of Wildland Fire (26), International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation (15), а также Forest Ecology and Management (14) вошли в семерку лучших журналов, опубликовавших не менее 10 исследовательских статей за последние два десятилетия.

На рисунке 2 представлены 20 лучших журналов, в которых были опубликованы 285 статей или примерно 88% отобранных публикации. Остальные 28 журналов (12%), опубликовавших только две релевантные статьи, были исключены из описательной статистики на рисунке.

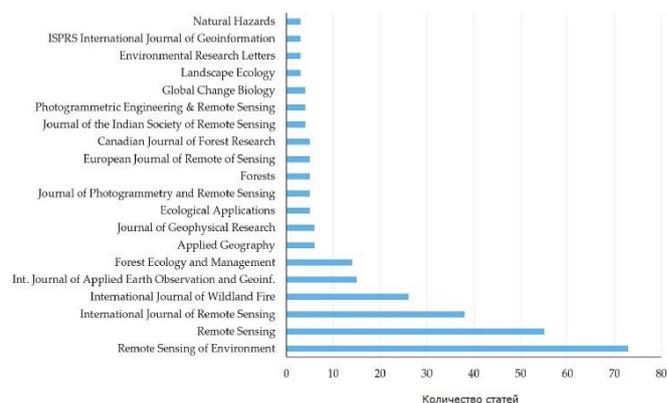


Рисунок 2. 20 лучших из 48 рецензируемых журналов, в которых были опубликованы выбранные статьи

Рецензируемые статьи были разделены на пять классов пространственной протяженности: локальный, мультилокальный, региональный, национальный и глобальный масштабы. В данной работе мы определяем локальный масштаб как уровень лесной единицы (национальный парк, лесничество, заказник и т.д.). Места, распределенные по стране, разным странам или континентам без определенной пространственной протяженности, называются многолокальным уровнем. Региональный уровень включает исследования в нескольких местах в пределах или в нескольких провинциях (штатах) страны или трансграничные исследования в нескольких странах. Национальный пространственный уровень рассматривает гари в пределах государственных границ изучаемой страны. Исследования на мировом уровне были отнесены к категории глобальных. Статистический анализ показал, что большинство рецензируемых статей выполнено в локальном (48%) и региональном пространственных масштабах (28%). Выявлено 30 национальных (9%) и 28 мультилокальных (9%) исследований лесных гарей с применением дистанционного зондирования, а также 18 глобальных исследований (6%).

Исследования, рассматриваемые в этой работе, проводились во многих лесных массивах по всему миру, включая страны Америки (Северной, Центральной и Южной), Европы, Азии, Австралии и Африки. Избранные публикации с 2000 по 2020 год были посвящены лесным пожарам в 39 странах. Журналы с 10 и более публикациями из США (93), Испании (49), Канады (29), Греции (21), Бразилии (17), Российской Федерации (15), Италии (13), Португалии (12), Австралия (10) и Китайская Народная Республика (10). Всего в 269 статьях (84%) описаны различные подходы к оценке площади лесных пожаров в десяти из этих стран с использованием методов дистанционного зондирования. Тематические исследования, проведенные в США, Испании и Канаде, охватывают около 53% всех рецензируемых публикаций. Следует упомянуть и другие страны с более чем двумя публикациями, в частности Индию (7), Францию (5), Южную Африку (4%), Республику Конго (3), Индонезию (2), Южную Корею (2), Турцию (2), Аргентина (2), Малайзия (2), Перу (2), Израиль (2), Чили (2) и Центральноафриканская Республика (2).

## 2. Методы и материалы

Дистанционное зондирование картографирования площадей возгорания имеет долгую историю, начиная с начала 1970-х годов, и в течение 2000–2020 годов оно по-прежнему является активной темой исследований с использованием передовых методов, объединяющих геостатистику, а также объектно-ориентированные методы и методы машинного обучения [29]. За последние два десятилетия был разработан и применен широкий спектр продуктов для картирования возгорания леса в глобальном, региональном и локальном масштабах.

Уменьшение отражательной способности растительного покрова в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне и увеличение отражательной способности поверхности в коротком и среднем инфракрасном диапазоне большинства спутниковых датчиков, происходящее после лесного пожара, может облегчить идентификацию паттернов местности возгорания [30]. Среди широко используемых оптических признаков вегетационные индексы (ВИ) играют основную роль в исследованиях

дистанционного зондирования лесных пожаров. В течение двух десятилетий наиболее часто используемым ВИ по сравнению с другими индексами был нормализованный разностный вегетационный индекс (NDVI) (128 исследований, 23.4%), за которым следовал дельта-нормализованный коэффициент сжигания (dNBR) (81 исследование, 14.8%), нормализованный показатель сжигания. Отношение (NBR) (77 исследований, 14.1%) и относительный разностный нормализованный коэффициент сжигания (RdNBR) (32 исследования, 5.8%). В общей сложности 34 исследования (6.2%) использовали составной индекс ожогов (CBI) для сопоставления данных дистанционного зондирования с полевыми характеристиками тяжести ожогов, наблюдаемых после лесных пожаров [31].

В ряде исследований наблюдали усиленный вегетационный индекс (21 случай, 3.8%), индекс площади гари (18 случаев, 3.3%), нормированный разностный водный индекс (NDVI) (17 случаев, 3.1%), индекс выгорания в среднем инфракрасном диапазоне (MIRBI) (12 случаев, 2.2%) и индекс глобального мониторинга окружающей среды (GEMI) (12 случаев, 2.2%). Чтобы свести к минимуму отражательную способность почвы, также применялись вегетативный индекс с поправкой на почву (SAVI) (13 случаев, 2.4%), модифицированный SAVI (MSAVI) (12 случаев, 2.2%) и индекс обугленной почвы (CSI) (6 случаев, 1.1%).

В начале 2000 г. использование AVHRR, MODIS, IRS, SPOT/HRVIR и Landsat для обнаружения горячих точек на основе изображений dNDVI широко применялось для оценки БА во многих исследованиях. Подтвержденные горячие точки затем используются для получения пороговых значений различий NDVI на региональном уровне для картирования площади горения леса. В качестве альтернативы NDVI нелинейный глобальный индекс мониторинга окружающей среды (GEMI) дал лучшие результаты для выделения гарей в нескольких лесных экосистемах. GEMI был специально разработан, чтобы свести к минимуму проблемы загрязнения растительного сигнала посторонними факторами для мониторинга недавно выгоревших территорий. Другой нелинейный индекс площади пожаров (BAI), который объединяет минимальную отражательную способность выгоревшей растительности в ближнем ИК-диапазоне и максимум в красных полосах, изначально был разработан для распознавания площади горения на изображениях NOAA-AVHRR. BAI был адаптирован к диапазонам MODIS NIR и SWIR (BAIM) для картирования недавно выгоревших территорий в средиземноморских экосистемах. Биспектральный индекс среднего инфракрасного диапазона (MIRBI), который применяется к длинам волн SWIR, также показал сильное спектральное разделение между выгоревшими и негоревшими областями. Некоторые исследователи обнаружили, что MIRBI оказался надежным средством уменьшения путаницы со смешанными пикселями, обнаруженными на границах между водой и сушей и в районах, пострадавших от предыдущих лесных пожаров.

За последние десятилетия было разработано несколько глобальных продуктов для обнаружения местности горения леса на основе датчиков среднего и высокого разрешения. В частности, спутниковые данные датчика VEGETATION (VGT) на борту европейского спутника

SPOT-4 использовались для оценки глобальной БА на основе крупномасштабных особенностей растительности или сезонной горячей активности в различных экосистемах (бореальных, тропических, лесостепных, саваннах и т. д.). Проект GLOBSCAR был инициирован в 2001 году как часть Программы пользователей данных Европейского космического агентства (ЕКА) с целью создания глобальных карт БА на основе прибора вдоль трекового сканирующего радиометра (ATSR-2) на борту ЕКА ERS - 2 спутника. Продукт Globcarbon BA (проект ЕКА), который был разработан с пространственным разрешением 1 км, 10 км, 0.250 м и 0.50 м с месячным временным разрешением для фокусировки на десяти полных годах (1998–2007 гг.), можно гибко применять для существующие архивы и легко объединяются в модели системы Земли [32].

Два продукта NASA BA, MODIS MCD45A1 и MCD64A1, которые отображают пространственную протяженность и приблизительную дату сжигания биомассы во всем мире с пространственным разрешением 500 м, были проверены с использованием Landsat в южной части Африки, западной США и Центральной Сибири. Оба продукта использовались для проведения широкого круга исследований, касающихся оценок лесных пожаров и выбросов от сжигания биомассы. Информация о пожарах для системы управления ресурсами (FIRMS) также является полезным продуктом, разработанным НАСА, который предоставляет данные MODIS об активных пожарах руководителям лесного хозяйства в более чем 90 странах.

В последние годы появились подходы к планетарному геопространственному анализу с использованием облачной платформы Google Earth Engine (GEE) с несколькими каталогами спутниковых данных с разным пространственным разрешением (MODIS, Landsat и Sentinel-2). Чтобы обеспечить более высокую точность и обновить небольшие выгоревшие участки, был предложен новый метод глобального ежегодного картографирования выгоревших территорий (GAVAM 2015) с пространственным разрешением 30 м, основанный на огромном каталоге изображений временных рядов Landsat, а также на высокопроизводительных вычислениях, мощность GEE [33].

Среди проанализированных публикаций значительный интерес вызывают спутниковые оценки неоднородности тяжести возгорания в пределах лесного пожара. Для целей настоящего исследования мы определили тяжесть возгорания как степень, в которой экосистема изменилась из-за как краткосрочных, так и долгосрочных последствий лесных пожаров. Относительные величины тяжести возгорания часто выражаются в терминах конкретных характеристик лесной экосистемы (растительность, подстилка и почва), которые визуальнo ранжируются после возникновения пожара. В контексте дистанционного зондирования тяжесть возгорания обычно относится к измерениям, сделанным непосредственно после лесного пожара, включая такие показатели, как потребление растительного покрова и гибель деревьев или потребление и обугливание органических профилей почвы.

Оценка тяжести ожогов в полевых условиях часто основывается на прямых измерениях составного ожогового индекса (СВІ), который был разработан для оценки тяжести на месте путем оценки среднего

состояния ожога на полевом участке. В течение последних двух десятилетий СВІ часто использовался во многих исследованиях для проверки различных продуктов дистанционного зондирования и для всесторонней оценки степени тяжести возгорания в широком диапазоне различных лесных экосистем. Недостатком СВІ является то, что он требует знания допoжарных условий оцениваемой территории и не учитывает различия в фракционном покрытии каждого слоя экосистемы. De Santis и Chuvieco [34] предложили модифицированный геометрически структурированный композитный индекс ожогов (GeoСВІ) для улучшения определения степени тяжести ожогов по данным дистанционного зондирования. Это оперативный инструмент для визуальной оценки степени ожогов от пожара на земле в пяти лесных ярусах (почвы, подлесок, средний полог, верхний ярус и доминирующие деревья). В нескольких исследованиях сообщается, что GeoСВІ сильнее коррелирует со спектральной отражательной способностью растительности на выжженных территориях. В других исследованиях было высказано предположение, что площадь и тяжесть ожогов также можно количественно оценить с помощью дистанционных измерений LAI и эмпирических моделей.

В то время как NDVI все еще используется в текущих исследованиях, в течение 2005–2020 гг. появился нормализованный коэффициент горения Landsat (NBR), предназначенный для оценки тяжести возгорания лесных пожаров с использованием технологии дистанционного зондирования. NBR (и разностный NBR) включает информацию о спектральных изменениях на поверхности с использованием различных откликов ближнего инфракрасного (NIR, 0.76–0.90 мкм) и среднего инфракрасного (SWIR, 2.08–2.35 мкм) диапазонов для создания масштабированного индекса. Подход dNBR, рассчитанный путем вычитания NBR после пожара из NBR до пожара, дает более точную оценку тяжести ожога, чем одиночный NBR, поскольку он основан на измерении изменений коэффициента отражения на пиксель, что делает общий подход более применимым в экосистемах. Очерчивание рассчитанных изображений dNBR Landsat и их пороговое значение по классам серьезности легло в основу программы мониторинга тенденций интенсивности пожаров (MTBS), в рамках которой все лесные пожары площадью более 200 га наносятся на карту на национальном уровне. И индексы dNBR, и dNDVI были точными при выявлении ожогов высокой степени тяжести в лесах северной Патагонии, но в меньшей степени при выявлении ожогов средней и легкой тяжести. Epting и другие [35] оценили 13 показателей дистанционного зондирования (отдельные полосы, отношения полос, индексы растительности, многомерные компоненты, нормализованные различия) для картирования тяжести ожогов во внутренних районах Аляски и пришли к выводу, что NBR после пожара дает наилучшие корреляции с СВІ на основе поля в закрытых игольчатых лесах, смешанных и широколиственных лесах, за которыми следует dNBR. Однако они предупредили, что взаимосвязь между NBR и СВІ была хуже в районах с редким древесным покровом (открытые леса, кустарники, травы и пастбища).

dNBR обеспечивает меру абсолютного изменения, тогда как RdNBR был разработан как относительная мера для учета пространственных вариаций индекса площади

листьев до пожара и для улучшения оценок в районах с неоднородным и непродуктивным растительным покровом. Среди исследователей нет единого мнения относительно использования каждого индекса тяжести возгорания с точки зрения лесных экосистем, рельефа местности и расчетных масштабов. Некоторые исследования пришли к выводу, что RdNBR обеспечивает более последовательную оценку тяжести ожога с более высокой точностью классификации, чем dNBR. Другие исследователи сообщают, что взаимосвязь между NBR и его производными (dNBR и RdNBR) и тяжестью ожогов сильно различается и непостоянна в зависимости от выгоревших территорий и типов экосистем (саванны, бореальные и тропические леса). Исследование, проведенное на юго-востоке Китая, показало, что dNBR является более надежным показателем для картирования тяжести лесных пожаров, чем RdNBR, что привело к более высоким значениям R2 и меньшим значениям RMSE для лесной площади [36]. Основываясь на полевых данных о шести пожарах, исследование в национальных парках Канады показало, что dNBR имеет более высокую общую точность классификации, чем RdNBR, и что пожары с наименьшей сомкнутостью лесного полога и рейтингом неоднородности не показали улучшения с RdNBR. Результаты этого исследования показывают, что модель, полученная из RdNBR, не оценивала тяжесть ожога более точно, чем dNBR (точность классификации 65.2% против 70.2%). Кроме того, использование NBR или dNBR для оценки тяжести ожогов может быть затруднено из-за изменений топографии и угла возвышения солнца в течение вегетационного периода. Относительный коэффициент выгорания (RBR), который является альтернативой dNBR и RdNBR, был предложен в качестве метрики на основе Landsat и оценен для лесных пожаров на границах западных территориях США. Их результаты показывают, что RBR превзошел dNBR и RdNBR по общей точности и в соответствии с CBI, измеренным в полевых условиях. Однако также было обнаружено, что на неоднородных территориях с высоким присутствием кустарников и травы были незначительные различия между dNBR, RdNBR или RBR в оценке тяжести возгорания. Хотя все эти стандартные спектральные индексы остаются наиболее подходящими для оценки тяжести ожогов, между исследователями нет единого мнения относительно сильных и слабых сторон каждого индекса, полученного из NBR.

Количественная оценка послепожарных последствий становится все более важной для понимания того, как реагируют лесные экосистемы, включая восстановление растительности, модели сукцессии, устойчивость экосистем, воздействие на окружающую среду и планирование управления лесами. В этом отношении ДЗ признан незаменимым инструментом для мониторинга моделей лесовосстановления после лесных пожаров. Среди различных количественных методов особый интерес для исследователей представляют преобразования Tasseled Cap и Multitemporal Kauth-Thomas, поскольку они основаны на оценке спутниковых снимков трех ключевых показателей послепожарного состояния растительности — яркости, зелени и влажности. В многочисленных исследованиях использовался комплексный анализ, связанный как с преобразованиями для картирования

изменений, так и с нарушениями в лесах после лесных пожаров.

Было проведено несколько исследований послепожарной динамики в экосистемах бореальных лесов с использованием оптических датчиков. Hicke и другие [37] оценили среднее послепожарное восстановление NPP для бореальных лесов Северной Америки примерно в 9 лет, используя 17-летний временной ряд наблюдений AVHRR NDVI. В другом исследовании использовались два набора данных 17-летнего временного ряда NDVI AVHRR для изучения восстановления растительности после лесных пожаров в бореальных лесах Канады [38]. Результаты показали, что скорость восстановления лесов различалась в течение трех лет с эпизодами лесных пожаров (1981, 1989 и 1995 годов) и что время восстановления до исходного уровня (5 лет и более) было короче, чем в предыдущих исследованиях. Cuevas-Gonzalez и другие [39] наблюдали пространственно-временные закономерности доли поглощенной фотосинтетически активной радиации (fAPAR) с использованием временных рядов MODIS для оценки послепожарной динамики во время и через два года после пожара в сибирских бореальных лесах. Их результаты показали, что различия в траекториях fAPAR коррелируют с типом леса, а изменения fAPAR существенно не различаются между бореальными широтными регионами. Послепожарное восстановление сибирских бореальных лесов изучалось с использованием 16-летних временных рядов NDVI и NDSWIR (нормализованный разностный коротковолновый инфракрасный индекс), полученных из MODIS [36]. Результаты показали, что для полного восстановления временных сигналов NDVI и NDSWIR после лесного пожара требуется более 13 лет. Epting и Verbyla [40] использовали изображения Landsat TM/ETM+ для оценки сукцессии лесов за 16-летний период после пожара во внутренних районах Аляски. Результаты исследования показали, что структура послепожарных бореальных лесов Аляски тесно связана как с типами допожарной растительности, так и с ДО. Через шестнадцать лет после пожара большая часть высоких участков БС с закрытыми хвойными, разомкнутыми хвойными и смешанными классами леса перешла в редколесья или кустарники. Фрейзер и другие [41] использовали три показателя спектрального восстановления, полученные из ежегодных попиксельных временных рядов NBR Landsat, для оценки циклов восстановления канадских бореальных лесов. Они обнаружили, что темпы спектрального восстановления лесов после пожаров увеличились в период с 1986 по 2011 год на 18% на востоке Таежного щита и на 9% на западе Таежного щита в Канаде.

Многие исследования послепожарной реакции растительности основаны на выделении спектральных полос и индексов растительности (в основном NDVI, dNBR и EVI) по разновременным снимкам MODIS, Landsat, SPOT и Sentinel в разных регионах и лесных экосистемах мира. Многочисленные исследования показали, что NDVI имеет более высокую корреляцию с отращиванием растительности после пожара, площадью листьев и биомассой, чем другие ВИ. Резкие изменения условий роста экосистемы, вызванные лесными пожарами, часто приводят к быстрым процессам лесовосстановления, которые можно наблюдать на региональном уровне по данным временных рядов MODIS 250 м NDVI. Ryu и

другие [42] использовали данные MODIS и Landsat TM/OLI для оценки процессов восстановления леса и физиологической активности после лесного пожара в апреле 2000 года на восточном побережье Южной Кореи. Результаты исследований показывают, что состояние экосистемы сосны (*Pinus densiflora*) улучшилось до исходного состояния через 8 лет после пожара, тогда как биомассе растительности потребовалось больше времени для восстановления. Meng и другие [43] также использовали изменение NDVI после тридцати пяти пожаров в смешанном хвойном лесу в горах Сьерра-Невада в Калифорнии между 1999 и 2006 гг., в то время как горелый пихтовый лес был чувствителен к послепожарной температуре. Lee и Chow [44] обнаружили, что растительность быстро восстановилась в первые три года (значительно увеличился NDVI) после лесного пожара в государственном парке Бастроп (США), но это восстановление все еще значительно отставало по сравнению с контрольным участком полевых данных.

Динамика послепожарного восстановления оценивалась в лесах средиземноморской сосны (*Pinus halepensis* и *Pinus pinaster*) (Испания) с использованием временной сегментации временных рядов Landsat (1994-2018 гг.). Исследования показывают, что темпы восстановления основных лесов сильно коррелировали с послепожарным климатом в среднесрочной и долгосрочной перспективе. В нескольких исследованиях по моделированию темпов восстановления и возобновления лесов использовались другие важные факторы, такие как тип растительности, подстилающий рельеф, почвы, экспозиция склона, количество осадков и индикаторы засухи. Zhao и другие [45] оценили спектральное восстановление леса после пожара в экосистеме Большого Йеллоустона (GYE) с использованием алгоритма отслеживания изменений стека и растительности Landsat Time Series (LTSS-VCT) и изображений с высоким пространственным разрешением из Google Earth. Они обнаружили, что лесовосстановление сильно коррелирует с типом леса, высотой над уровнем моря и типом почвы GYE. Другое исследование средиземноморских лесных экосистем продемонстрировало доказательства того, что количество непрекращающихся лесных пожаров в течение короткого периода уменьшило восстановление лесов, измеряемое отрицательным значением EVI, на которое также повлияли микроклиматические эффекты (влажность почвы и окружающей среды). Такие исследования также предполагают, что результаты более значимы, когда учитываются, моделируются и сравниваются другие важные факторы с восстановлением леса на площади возгорания.

### 3. Результаты и обсуждение

Результаты анализа создают основу для вышеупомянутых задач для будущих исследований в области лесных пожаров, тяжести возгорания и послепожарного восстановления:

- Важно проводить больше исследований в лесных экосистемах Южной Америки, Африки и Евразии, поскольку эти регионы оказывают большое влияние на глобальный баланс углерода и изменение климата.

- Дальнейшие определенные исследования, вероятно, будут включать использование данных с более высоким разрешением, алгоритмов многокритериального анализа,

эмпирических моделей и объединение данных с нескольких датчиков. Принятие этих методов и данных потенциально может устранить неправильную классификацию и высокую изменчивость в исследованиях лесных пожаров, тяжести возгорания и восстановлении после пожара.

- Нейронные сети, деревья классификации и регрессии (CART), нечеткое моделирование и OBIA также очень перспективны в будущих исследованиях с применением алгоритмов больших данных и новых платформ обработки. Использование алгоритмов машинного обучения и методов облачных вычислений (например, GEE) открывает новые возможности для области исследования.

- Обзор предполагает, что необходимо провести дополнительные исследования по поиску методов уменьшения ошибок классификации изображений РС (упущение и комиссия) и повышения глобальной и региональной точности карты возгорания леса, особенно в регионах с недостаточным объемом данных.

- Комбинация изображений ДЗ от пассивных и активных датчиков может дать больше информации в области исследования, включая возможность преодоления проблем с облачным покровом в возгорании лесов.

- Ожидается увеличение интеграции LiDAR, радаров, гиперспектральных датчиков и новых технологий БПЛА в будущих исследованиях лесных пожаров. Также имеется огромный потенциал для исследования пространственно-временной закономерности послепожарного восстановления и подходов к мониторингу возгорания лесов с целью повышения устойчивости экосистем.

### 4. Выводы

В этой статье представлен всесторонний обзор прогресса и развития приложений на основе ДЗЗ для обнаружения и мониторинга лесных пожаров. Были рассмотрены в общей сложности 329 соответствующих статей в 48 рецензируемых журналах, касающихся всех аспектов дистанционного зондирования площади возгорания леса за последние два десятилетия. База данных, содержащая информацию об оценках лесных пожаров на основе ДЗ, была создана в качестве основы для анализа. Были проанализированы работы по направленности исследований, экологическому районированию, пространственному разрешению изображений ДЗЗ, временному охвату, породам деревьев, спектральным индексам, справочным данным, общей точности и применяемым методам классификации. Был проведен глубокий анализ для обсуждения применения систем ДЗ в исследованиях после пожаров в лесах во всем мире, что отличает наше исследование от предыдущих обзоров. Рассматриваемые темы включают оценку и картографирование площадей пожаров, оценку серьезности пожаров и мониторинг восстановления лесов после пожаров.

Данная работа показывает, что количество исследований дистанционного зондирования лесных пожаров существенно увеличилось с начала 2000-х годов и достигло пика в десятилетие 2011-2020 годов. Доминирующие исследования проводились с использованием оптических датчиков (261 случай, 80%) на базе спутников Landsat, Sentinel, Terra, Aqua, Sentinel, AVHRR и SPOT. Согласно карте Глобальной экологической зоны FAO, большинство рассмотренных исследований было проведено в субтропических сухих лесах (21.4%, 92 случая). Что касается

дискриминации древесных пород, то в исследованиях в основном описывалась сосна (37.0%). NDVI и dNBR были наиболее часто используемыми индексами VI по сравнению с другими индексами. Исследования показывают, что существуют некоторые проблемы, в основном из-за спектрального смещения и низкого качества проверочных данных, при определении площади и тяжести возгорания. Использование мультисенсорных изображений может повысить точность и уменьшить неопределенность оценок площади возгорания. Также существует потребность в глобальных и региональных продуктах с более высоким пространственным разрешением, чтобы обеспечить наиболее точную оценку БА. Использование классификаторов RF, SVM и MLH позволило выявить классы лесных БА без существенной разницы между ними. В течение 2000-2020 годов методы классификации постепенно стремились достичь более высокой общей точности, особенно при использовании наземных данных и объединении данных из разных справочных источников. Следовательно, ожидается, что дистанционное зондирование улучшит методологии обнаружения и мониторинга БА быстрым и экономически эффективным способом и, таким образом, повысит его роль в устойчивом управлении лесами.

## Литература / References

- [1] Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2020). The State of the World's Forests. In *Forests, Biodiversity and People*. Rome, Italy
- [2] Artés, T., Oom, D., de Rigo, D., Durrant, T.H., Maianti, P., Libertà, G. & San-Miguel-Ayanz, J. (2019). A global wildfire dataset for the analysis of fire regimes and fire behaviour. *Scientific Data*, (6), 296. <https://doi.org/10.1038/s41597-019-0312-2>
- [3] Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2020). Global Forest Resources Assessment: Main Report. Rome, Italy
- [4] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2014). Carbon and Other Biogeochemical Cycles. In *Climate Change 2013 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (465-570). Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.015>
- [5] Yue, C., Ciaia, P., Cadule, P., Thonicke, K. & van Leeuwen, T.T. (2015). Modelling the role of fires in the terrestrial carbon balance by incorporating SPITFIRE into the global vegetation model ORCHIDEE—Part 2: Carbon emissions and the role of fires in the global carbon balance. *Geoscientific Model Development*, (8), 1285–1297. <https://doi.org/10.5194/gmd-8-1321-2015>
- [6] Flannigan, M.D., Stocks, B.J. & Wotton, B.M. (2000). Climate change and forest fires. *Science of Total Environment*, 262(3), 221–229. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(00\)00524-6](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(00)00524-6)
- [7] Stephens, S.L., Agee, J.K., Fulé, P.Z., North, M.P., Romme, W.H., Swetnam, T.W. & Turner, M.G. (2013). Managing forests and fire in changing climates. *Science* 2013, 342, 41–42
- [8] Etchellsa, H., O'Donnella, A.J., McCawb, W.L. & Griersona, P.F. (2020). Fire severity impacts on tree mortality and post-fire recruitment in tall eucalypt forests of southwest Australia. *Forest Ecology and Management*, 459, 117850. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117850>
- [9] Loboda, T., Krankina, O., Savin, I., Kurbanov, E. & Joanne, H. (2017). Land management and the impact of the 2010 extreme drought event on the agricultural and ecological systems of European Russia. In *Land-Cover and Land-Use Changes in Eastern Europe after the Collapse of the Soviet Union in 1991*, Springer International Publishing: Cham, Switzerland. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-42638-9\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-319-42638-9_8)
- [10] Seidl, R., Schelhaas, M.J., Rammer, W. & Verkerk, P.J. (2014). Increasing forest disturbance in Europe and their impacts on carbon storage. *Nature Climate Change* 2014, 4, 806–810
- [11] Thompson, M.P., Rodríguez y Silva, F., Calkin, D.E. & Hand, M.S. (2017). A review of challenges to determining and demonstrating efficiency of large fire management. *International Journal of Wildland Fire*, 26, 562–573. <https://doi.org/10.1071/WF16137>
- [12] Brecka, A.F.J., Boulanger, Y., Searle, E.B., Taylor, A.R., Price, D.T., Zhu, Y., Shahia, C. & Chena, H.Y.H. (2020). Sustainability of Canada's forestry sector may be compromised by impending climate change. *Forest Ecology and Management*. 2020, 474, 118352. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118352>
- [13] Staal, A., van Nes, E.H., Hantson, S., Holmgren, M., Dekker, S.C., Pueyo, S., Xu, C. & Scheffer, M. (2018). Resilience of tropical tree cover: The roles of climate, fire and herbivory. *Global Change Biology*, 24(11), 5096–5109. <https://doi.org/10.1111/gcb.14408>
- [14] Mosquera-Losada, M.R., Santiago-Freijanes, J.J., Rois-Díaz, M., Moreno, G., den Herder, M., Aldrey-Vázquez, J.A., Ferreiro-Domínguez, N., Pantera, A., Pisanelli, A. & Rigueiro-Rodríguez, A. (2018). Agroforestry in Europe: A land management policy tool to combat climate change. *Land Use Policy*, 78, 603–613. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.06.052>
- [15] Sousa-Silva, R., Verbist, B., Lomba, Â., Valent, P., Suškevičs, M., Picard, O., Hoogstra-Klein, M.A., Cosofret, V.-C., Bouriaud, L., Ponette, Q., et al. (2018). Adapting forest management to climate change in Europe: Linking perceptions to adaptive responses. *Forest Policy and Economics*, 90, 22–30. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2018.01.004>
- [16] Otón, G., Ramo, R., Lizundia-Loiola, J. & Chuvieco, E. (2019). Global detection of long-term (1982–2017) burned area with AVHRR-LTDR data. *Remote Sensing*, 11(18), 2079. <https://doi.org/10.3390/rs11182079>
- [17] Talukdar, S., Singha, P., Mahato, S., Shahfahad, Pal, S., Liou, Y.-A. & Rahman, A. (2020). Land-use land-cover classification by machine learning classifiers for satellite observations—A review. *Remote Sensing*, 12(7), 1135. <https://doi.org/10.3390/rs12071135>
- [18] Verhegghen, A., Eva, H., Ceccherini, G., Achard, F., Gond, V., Gourlet-Fleury, S. & Cerutti, P.O. (2016). The Potential of Sentinel Satellites for Burnt Area Mapping and Monitoring in the Congo Basin Forests. *Remote Sensing*, 8(12), 986. <https://doi.org/10.3390/rs8120986>
- [19] Santana, N.C., De Carvalho Júnior, O.A., Gomes, R.A.T. & Guimarães, R.F. (2018). Burned-area detection in Amazonian environments using standardized time series per pixel in MODIS data. *Remote Sensing*, 10(12), 1904. <https://doi.org/10.3390/rs10121904>
- [20] Gupta, S., Roy, A., Bhavsar, D., Kala, R., Singh, S. & Kumar, A.S. (2016). Forest fire burnt area assessment in the biodiversity rich regions using geospatial technology: Uttarakhand forest fire event 2016. *Journal of Indian Society of Remote Sensing*, 46, 945–955
- [21] Campagnolo, M.L., Oom, D., Padilla, M. & Pereira, J.M.C. (2019). A patch-based algorithm for global and daily burned area mapping. *Remote Sensing of Environment*, 232, 111288. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111288>
- [22] Roy, D.P., Boschetti, L. & Trigg, S.N. (2006). Remote sensing of fire severity: Assessing the performance of the normalized burn ratio. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 3(1), 112–116. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2005.858485>
- [23] Kurbanov, E., Vorobyev, O., Leznin, S., Polevshikova, Y. & Demisheva, E. (2017). Assessment of burn severity in Middle Povolzhje with Landsat multitemporal data. *International journal of Wildland Fire*, 26(9), 772–782. <https://doi.org/10.1071/WF16141>
- [24] Chen, X., Vogelmann, J., Rollins, M., Ohlen, D., Key, C., Yang, Y., Huang, C. & Shi, H. (2011). Detecting post-fire burn severity and vegetation recovery using multitemporal remote sensing spectral indices and field-collected composite burn index data in

- a ponderosa pine forest. *International Journal of Remote Sensing*, 32(23), 7905–7927. <https://doi.org/10.1080/01431161.2010.524678>
- [25] Saulino, L., Rita, A., Migliozi, A., Maffei, C., Allevato, E., Garonna, A.P. & Saracino, A. (2020). Detecting Burn Severity across Mediterranean Forest Types by Coupling Medium-Spatial Resolution Satellite Imagery and Field Data. *Remote Sensing*, 12(4), 741. <https://doi.org/10.3390/rs12040741>
- [26] Cuevas-González, M., Gerard, F., Balzter, H. & Riano, D. (2009). Analysing forest recovery after wildfire disturbance in boreal Siberia using remotely sensed vegetation indices. *Global Change Biology*, 15, 561–577. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01784.x>
- [27] Van Leeuwen, W.J.D., Casady, G.M., Neary, D.G., Bautista, S., Alloza, J.A., Carmel, Y., Wittenberg, L., Malkinson, D. & Orr, B.J. (2010). Monitoring post-wildfire vegetation response with remotely sensed time-series data in Spain, USA, and Israel. *International journal of Wildland Fire*, 19(1), 75–93. <https://doi.org/10.1071/WF08078>
- [28] Kibler, C.L., Parkinson, A.-M.L., Peterson, S.H., Roberts, D.A., D’Antonio, C.M., Meerdink, S.K. & Sweeney, S.H. (2019). Monitoring post-fire recovery of chaparral and conifer species using field surveys and Landsat time series. *Remote Sensing*, 11(24), 2963. <https://doi.org/10.3390/rs11242963>
- [29] Fernández-Guisuraga, J.M., Suárez-Seoane, S. & Calvo, L. (2020). Transferability of vegetation recovery models based on remote sensing across different fire regimes. *Applied Vegetation Science*, 23(3), 441–451. <https://doi.org/10.1111/avsc.12500>
- [30] Girardin, M.P., Ali, A.A. & Hely, C. (2010). Wildfires in boreal ecosystems: Past, present and some emerging trends. *International journal of Wildland Fire*, 19, 913–926. [https://doi.org/10.1071/WFv19n8\\_FO](https://doi.org/10.1071/WFv19n8_FO)
- [31] Gitas, I., Mitri, G., Veraverbeke, S. & Polychronaki, A. (2012). Advances in remote sensing of post-fire vegetation recovery monitoring-A review. *Remote Sensing of Biomass - Principles and Applications*, London, UK. <https://doi.org/10.5772/20571>
- [32] Miettinen, J., Hyer, E., Chia, A.S., Kwok, L.K. & Liew, S.C. (2013). Detection of vegetation fires and burnt areas by remote sensing in insular Southeast Asian conditions: Current status of knowledge and future challenges. *International journal of Remote Sensing*, 34, 4344–4366. <https://doi.org/10.1080/01431161.2013.777489>
- [33] Long, T., Zhang, Z., He, G., Jiao, W., Tang, C., Wu, B., Zhang, X., Wang, G. & Yin, R. (2019). 30 m resolution Global Annual Burned Area Mapping Based on Landsat images and Google Earth Engine. *Remote Sensing*, 11(5), 489. <https://doi.org/10.3390/rs11050489>
- [34] De Santis, A., Chuvieco, E. (2009). GeoCBI: A modified version of the Composite Burn Index for the initial assessment of the short-term burn severity from remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, 113(3), 554–562. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.10.011>
- [35] Epting, J., Verbyla, D. & Sorbel, B. (2005). Evaluation of remotely sensed indices for assessing burn severity in interior Alaska using Landsat TM and ETM+. *Remote Sensing of Environment*, 96(3–4), 328–339. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.03.002>
- [36] Cai, L., Wang, M. (2022). Is the RdNBR a better estimator of wildfire burn severity than the dNBR? A discussion and case study in southeast China. *Geocarto International*, 37(2), 758–772. <https://doi.org/10.1080/10106049.2020.1737973>
- [37] Hicke, J.A., Asner, G.P., Kasischke, E.S., French, N.H.F., Randerson, J.T., Collatz, G.J., Stocks, B.J., Compton, J.T., Tucker, C.J., Los, S.O.; et al. (2003). Postfire response of North American boreal forest net primary productivity analyzed with satellite observations. *Global Change Biology*, 9, 1145–1157. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2003.00658.x>
- [38] Goetz, S.J., Fiske, G.J. & Bunn, A.G. (2006). Using satellite time-series data sets to analyze fire disturbance and forest recovery across Canada. *Remote Sensing of Environment*, 101, 352–365. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.01.011>
- [39] Cuevas-Gonzalez, M., Gerard, F., Balzter, H. & Riano, D. (2008). Studying the change in fAPAR after forest fires in Siberia using MODIS. *International journal of Remote Sensing*, 2008, 29(23), 6873–6892. <https://doi.org/10.1080/01431160802238427>
- [40] Epting, J., Verbyla, D. (2005). Landscape-level interactions of prefire vegetation, burn severity, and postfire vegetation over a 16-year period in interior Alaska. *Canadian Journal of Forest Research*, 35, 1367–1377. <https://doi.org/10.1139/x05-060>
- [41] Frazier, R.J., Coops, N.C., Wulder, M.A., Hermosilla, T. & White, J.C. (2018). Analyzing spatial and temporal variability in short-term rates of post-fire vegetation return from Landsat time series. *Remote Sensing of Environment*, 205, 32–45. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.11.007>
- [42] Ryu, J.-H., Han, K.-S., Hong, S., Park, N.-W., Lee, Y.-W. & Cho, J. (2018). Satellite-Based Evaluation of the Post-Fire Recovery Process from the Worst Forest Fire Case in South Korea. *Remote Sensing*, 10(6), 918. <https://doi.org/10.3390/rs10060918>
- [43] Meng, R., Dennison, P.E., Huang, C., Moritz, M.A. & D’Antonio, C. (2015). Effects of fire severity and post-fire climate on short-term vegetation recovery of mixed-conifer and red fir forests in the Sierra Nevada Mountains of California. *Remote Sensing of Environment*, 171, 311–325. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.10.024>
- [44] Lee, R.J., Chow, T.E. (2015). Post-wildfire assessment of vegetation regeneration in Bastrop, Texas, using Landsat imagery. *GIScience & Remote Sensing*, 52(5), 609–626. <https://doi.org/10.1080/15481603.2015.1055451>
- [45] Zhao, F.R., Meng, R., Huang, C., Zhao, M., Zhao, F.A., Gong, P., Yu, L. & Zhu, Z. (2016). Long-term post-disturbance forest recovery in the greater yellowstone ecosystem analyzed using Landsat time series stack. *Remote Sensing*, 8(11), 898. <https://doi.org/10.3390/rs8110898>

## Орман өртінің мөлшері, күйікті жағдайы және өртті қайта алу үшін жерді қашықтан зондтауды қолдану

Н.Т. Шогелова<sup>1\*</sup>, С.А. Сартин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Халықаралық білім беру корпорациясы, Алматы, Қазақстан

<sup>2</sup>М. Қозыбаев атындағы Солтүстік Қазақстан университеті, Петропавл, Қазақстан

\*Корреспонденция үшін автор: [nazym-shogelova@mail.ru](mailto:nazym-shogelova@mail.ru)

**Андатпа.** Орман өрттері орман экожүйелеріне қатты әсер етіп, олардың биоәртүрлілігі мен тұрақтылығын жоғалтады. Сонымен қатар, олар жаһандық көміртегі балансына және, сайып келгенде, климаттың өзгеруіне қатты әсер етеді. Бұл мақалада орман өртенген аумақты, өрттің ауырлығын, өрт әсерлерін және жаһандық деңгейде орманды

молықтыру үлгілерін бағалау үшін пайдаланылатын қашықтықтан зондтау әдістері мен деректері бойынша зерттеулер талданады. Зерттеу соңғы екі онжылдықта (2000-2020) 48 журналда жарияланған зерттеу саласының негізгі аспектілері бойынша таңдалған 329 мақалаға негізделген талдау нәтижелерін талқылайды. Журналдар, кеңістік ауқымы, географиялық таралуы, қашықтықтан зондтау сенсорларының түрлері, экологиялық аудандастыру, ағаш түрлері, спектрлік индекстер және зерттеулерде қолданылған дәлдік өлшемдерін қамтитын мақала сипаттамалары талданды. Сондай-ақ, мақалада орман өрттерінің аумағын, өрттердің ауырлығын және өрттен кейінгі қалпына келтіруді бағалаудағы негізгі тенденциялар, проблемалар және әртүрлі қашықтықтан зондтау әдістерінің құндылығының артуы талқыланады. Соңында, ол келесі буын қашықтан зондтау жүйелерін, жіктеу әдістерін және бұлтты есептеулерді, сондай-ақ аймақтық және ауқымды зерттеу қосымшалары үшін жаңа технологиялық платформаларды пайдалана отырып, болашақ зерттеулердің әлеуетті мүмкіндіктерін анықтайды.

**Негізгі сөздер:** орман өрттері, жерді қашықтықтан зондтау, орман өрттерінің аймағы, өрттің ауырлығы, орманды қалпына келтіру.

## Применение дистанционного зондирования земли для определения площади лесных пожаров, степени горения и восстановления после пожара

Н.Т. Шогелова<sup>1\*</sup>, С.А. Саргин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Международная образовательная корпорация, Алматы, Казахстан

<sup>2</sup>Северо-Казахстанский университет имени М. Козыбаева, Петропавловск, Казахстан

\*Автор для корреспонденции: [nazym-shogelova@mail.ru](mailto:nazym-shogelova@mail.ru)

**Аннотация.** Лесные пожары сильно влияют на лесные экосистемы, вызывая утрату их биоразнообразия и их устойчивость. Кроме того, они оказывают сильное влияние на глобальный углеродный баланс и, в конечном счете, на изменение климата. В этой статье проведен анализ исследований методов дистанционного зондирования и данных, используемых для оценки площади выгоревших лесов, серьезности пожаров, последствий пожаров и закономерностей восстановления лесов на глобальном уровне. В исследовании обсуждаются результаты анализа на основе 329 избранных статей по основным аспектам изучаемой области, опубликованных в 48 журналах за последние два десятилетия (2000-2020 гг.). Проведен анализ характеристик статей, включая журналы, пространственную протяженность, географическое распространение, типы датчиков дистанционного зондирования, экологическое зонирование, породы деревьев, спектральные индексы и показатели точности, используемые в исследованиях. Так же в работе обсуждены основные тенденции, проблемы и возрастающая ценность различных методов дистанционного зондирования в оценке площади лесных пожаров, тяжести пожаров и послепожарного восстановления. Наконец, в нем определены потенциальные возможности для будущих исследований с использованием систем дистанционного зондирования нового поколения, методов классификации и облачных вычислений, а также новых платформ процессов для региональных и крупномасштабных приложений в области исследований.

**Ключевые слова:** лесные пожары, дистанционное зондирование земли, площадь лесных пожаров, тяжесть возгорания, восстановление леса.

Received: 30 March 2023

Accepted: 15 June 2023

Available online: 30 June 2023