

КАРТОГРАФИЯ И ГЕОИНФОРМАТИКА

УДК 528.8*614.841.3

DOI: 10.17072/2079-7877-2021-1-1549-161

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ДЛЯ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ ПРИРОДНЫХ ПОЖАРОВ**Алмаз Тимербулатович Гизатуллин**ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7186-1287>, Author ID: 992490e-mail: almazgiz1995@yandex.ru*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва*

Работа посвящена анализу и систематизированному обобщению процесса разработки методов использования данных дистанционного зондирования Земли для предупреждения природных пожаров. Рассматриваются историческое развитие и содержательное разнообразие методов и выделяются основные этапы, отражающие особенности их разработки с учетом расширения источников и типов съемки, углубления знаний о предмете. Интерпретация возгорания включает в себя принципиально разные процессы наступления пожара и распространения огня. Вводятся понятия пожарной опасности, факторов опасности, анализируются способы их выбора и применения в методах. Определяются исходные данные методов – продукты космической съемки различного разрешения (Landsat, Sentinel, MODIS/Terra-Aqua, AVHRR/NOAA и др.), снимки БПЛА, лидарные данные, а также технологии их обработки. Изучение набора методов показало, что наиболее часто используются традиционные методы геоинформационного анализа, имитационное моделирование и нейронные сети. В результате, были описаны характерные методы и выявлены особенности их реализации. В ходе описания анализируются примеры методов оценки пожарной опасности на основе ГИС, моделей распространения возгораний, нейросетевых методов предупреждения возгораний и их применения для разного пространственного уровня – глобального, регионального и локального.

Ключевые слова: предупреждение возгораний, пожарная опасность, данные дистанционного зондирования, геоинформационные методы, модели распространения возгораний, нейронные сети.

DEVELOPMENT OF REMOTE SENSING METHODS FOR NATURAL FIRE PREVENTION**Almaz T. Gizatullin**ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7186-1287>, Author ID: 992490e-mail: almazgiz1995@yandex.ru*Moscow State University, Moscow, Russia*

The study deals with remote sensing methods for natural fire prevention, provides analysis and systematization on the subject. It traces the historical development and demonstrates the diversity of the methods. The main development stages and their characteristics were identified taking into account the increasing number of the sources and types of remote sensing and deepening knowledge of the subject. Fire interpretation includes fundamentally different processes of ignition and fire spread. The concepts of fire danger and its factors were introduced, the ways for their selection and application in the methods were analyzed. The source data for the methods were defined: satellite imagery of various resolutions (Landsat, Sentinel, MODIS/Terra-Aqua, AVHRR/NOAA, etc.), UAV images, lidar data, as well as technologies to process those. The study demonstrates that the most commonly used are traditional methods of geoinformation analysis, simulation modelling and neural networks. The methods were described, features of their implementation were identified. The description includes specific examples of fire danger assessment methods based on GIS, simulation models of fire spread, fire prevention methods based on neural networks and their application for territories of different spatial levels – global, regional and local.

© Гизатуллин А.Т., 2021



К e y w o r d s : fire prevention, fire danger, remote sensing data, geoinformation methods, fire simulation models, neural networks.

Введение

Природные пожары являются одним из самых опасных стихийных бедствий. Ежегодно в России регистрируются десятки тысяч возгораний, которые охватывают площади в миллионы га [2]. В мире наибольшее число крупных пожаров ежегодно происходит в Бразилии, США, Австралии и Китае [8]. Особенности возникновения и развития природных пожаров часто являются причиной их позднего обнаружения, когда они уже не поддаются контролю со стороны человека. Как следствие, это вызывает огромный ущерб: физические потери, расходы на тушение, социальные и экономические убытки.

На сегодняшний день решение проблемы природных пожаров достигается с помощью различных данных. Важное место среди них занимают данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), преимуществами которых являются высокая обзорность наблюдаемой территории, оперативность их получения, прежде всего, безопасность исследований на их основе. Наиболее важным применением данных ДЗЗ, наряду с обнаружением и оценкой последствий пожаров, являются **предупреждение и прогноз природных возгораний** для проведения профилактических мер по недопущению и снижению негативных последствий. Активное развитие и расширение совокупности методов использования данных ДЗЗ способствует улучшению решения проблемы, однако **создает сложности информационного ориентирования для новых исследователей, снижает систематизацию области знаний ввиду несвязности и нелинейности общего процесса разработок**, что подтверждает актуальность текущей работы.

Целью исследования является **систематизация разработки методов использования данных ДЗЗ для предупреждения возгораний на основе анализа их исторического развития и текущего содержательного разнообразия**. В ходе исследования предполагается:

- выделить и рассмотреть исторические этапы и вехи в разработке методов и определить критические составляющие в них (интерпретация предмета исследования, используемые данные и технологии их обработки);
- проанализировать алгоритмы наиболее характерных методов, выявить особенности их разработки и применения.

Историческое развитие методов

1-й этап. Становление: переход от наземных измерений к космической съемке и ГИС

Первые применения данных ДЗЗ для предупреждения возгораний относятся к 1960-м гг. Для раннего обнаружения пожаров тестировались сканеры, установленные на самолетах и фиксирующие излучение в среднем и тепловом инфракрасном каналах [16]. Развитие спутниковой программы наблюдения Земли Landsat в 1970-х гг. послужило началом применению космических данных ДЗЗ для предупреждения возгораний. Космические снимки Landsat эффективно использовались для оценки показателя пожарной опасности, которая характеризует вероятность возгорания территории [7].

Одновременно с этим разработка первых геоинформационных систем позволила объединить несколько факторов пожарной опасности и получить их пространственную комбинацию для разделения пожароопасных зон. В качестве основных переменных использовались растительность, рельеф (высота, уклон и экспозиция), инсоляция, статистические данные о пожарах, данные о погоде. В частности, изображения в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне съемочной аппаратуры MSS спутников Landsat использовались для дешифрирования растительности, которая является основным горючим материалом природного пожара [25]. Кроме того, проводились исследования типов горючего материала в зависимости от цифровых данных о высоте. В совокупности все это позволяло с удовлетворительной точностью моделировать пожарную опасность территории и возможные пути распространения потенциального возгорания. Комплексный подход с применением многочисленных факторов пожарной опасности использовался в исследованиях [34], где типы растительности, полученные по снимкам MSS, соотносились с характеристиками рельефа, типами почв, инсоляцией, близостью к источникам воды и архивной статистикой пожаров.

В 1980-х гг. был разработан ряд приложений данных съемочной аппаратуры AVHRR, установленной на серии спутников NOAA (первый запуск в 1978 г.). Более высокий территориальный

Картография и геоинформатика
Гизатуллин А.Т.

охват и частота сбора данных AVHRR позволили создать альтернативу снимкам Landsat для предупреждения возгораний на глобальном уровне. Были продолжены исследования корреляции типов растительности и горючих материалов с вероятностью возникновения пожаров. Кроме того, комбинированное использование оперативных данных AVHRR и детальных аэроснимков оказалось полезным для исследования критических переменных возгорания в режиме околореального времени [5].

2-й этап. Развитие алгоритмической базы с углублением интерпретации предмета исследования

В этот период понятие пожарной опасности было расширено и детализировано: были разработаны методы оценки вероятности возгорания по условиям погоды с использованием данных ДЗЗ по аналогии с наземными погодными индексами (FWI – Fire Weather Index, индекс Нестерова и др.). Погодные условия, оцениваемые, главным образом, параметрами температуры и влажности влияют на состояние растительности и ее готовность к возгоранию [30]. Их измерение посредством космической съемки обладает высокой оперативностью, низкой стоимостью и большим территориальным охватом по сравнению с наземными мероприятиями.

В 1990-х гг. исходные данные методов предупреждения возгораний были дополнены новыми типами. Например, в исследованиях [27] изучаются возможности применения данных с радара с синтезированной апертурой (SAR) для прогноза возгораний. Теоретические модели показали, что активное излучение в радиодиапазоне чувствительно к изменениям состояния растительности, температуры и влажности поверхности, наличия воды в приповерхностном слое почвы. Практическая разработка методов на основе данных спутников ERS (European Remote Sensing Satellite), запущенных в 1991 и 1995 гг., была реализована в [6]. Их применение позволяет фиксировать изменения пожарной опасности, связанной как с вышеперечисленными параметрами, так и с погодными явлениями (дожди) и соответствующими индексами (FWI и др.).

Большое применение для прогноза возгораний в это время находят спектральные индексы, вычисляемые на основе отражательной способности в различных каналах. Наиболее распространенным из них является вегетационный индекс NDVI, характеризующий особенности отражения объектов в красной видимой и ближней инфракрасной области спектра. В целом же, на основе комбинации снимков видимого и инфракрасного каналов были получены многочисленные индексы, характеризующие состояние горючих материалов с разных сторон [36]: содержание влаги – FMC, Fuel Moisture Content, NDWI, Normalised Difference Water Index, SIWSI, Shortwave Infrared Water Stress Index, температура – FT, Fuel Temperature и др.

В последующем, на основе физических концепций выделения тепловой энергии в процессе воспламенения, были разработаны специальные индексы для описания пожарной опасности [13]: FSI – Fire Susceptibility Index, FPI – Fire Potential Index, FEI – Fire Energy Index и др. Они вычисляются путем синтеза спектральных индексов, характеризующих факторы опасности.

3-й этап. Обработка больших массивов данных: внедрение новых технологий и источников

В 1999 и 2002 гг. были запущены спутники Terra и Aqua соответственно. Установленная на них гиперспектральная съемочная система MODIS позволяет получать изображения в 36 каналах видимого и инфракрасного диапазона. На основе данных MODIS были разработаны контекстуальные алгоритмы обнаружения возгораний по температурным аномалиям [14], которые используются и по сей день. Их применение создало основу для накопления огромных архивов достоверных данных о пожарах и тестирования алгоритмов предупреждения возгораний. Кроме того, в дополнение к снимкам Landsat для исследования возгораний используется сканер на борту этих же спутников – ASTER, целевой задачей которого является изучение теплового поля Земли, получение высот поверхности на основе стереосъемки.

Помимо этого, к 2000-м гг. был сформирован большой архив данных высокого разрешения Landsat, SPOT и других спутников за десятки лет, что привнесло возможность исследования временных серий различных показателей пожарной опасности. Были разработаны временные индексы для классификации территории по готовности к возгоранию [32]. Чаще всего в их основе лежали статистические меры, например, отклонения от средних показателей за какой-либо период: наибольшая разница интерпретировалась как критический случай и необходимость профилактических мер.

Большое развитие получили имитационные и симуляционные модели, которые прогнозировали не только факт возможного возгорания, но потенциальный ход пространственно-временного развития пожара. В качестве входных данных для этих моделей использовались архивные статистические

Картография и геоинформатика

Гизатуллин А.Т.

закономерности [28] и текущие переменные пожарной опасности. В простейших реализациях таких моделей применялись линейные регрессии, которые в последующем осложнялись более сложными математическими методами [10] – деревьями решений, вероятностными методами Монте-Карло и др.

По мере развития методов и достижения достаточной достоверности их результатов организовываются системы мониторинга разного уровня – глобальные, региональные и локальные. Примерами таких систем являются FIRMS, Fire Information System for Resource Management System, EFFIS, European Forest Fire Information System, ИСДМ-Рослесхоз, Информационная система дистанционного мониторинга. В свою очередь, они становятся платформами для интеграции различных данных ДЗЗ и методов их использования для предупреждения возгораний [19].

Во втором десятилетии XXI в. количество источников данных ДЗЗ, применяемых для прогноза пожаров, увеличивается, разрабатываются методики их использования. Дополнением к продуктам MODIS стали изображения сканера VIIRS со спутника Suomi NPP [12], выведенного на орбиту в 2011 г., а также снимки SLSTR со спутников Sentinel-3 [9], запущенных в 2016 и 2018 гг. Высокий и частично реализованный потенциал для региональных и локальных исследований имеют снимки высокого разрешения со спутников Sentinel-2 [23]. Не меньшие возможности имеют также отечественные спутники ДЗЗ – Канопус-В и Ресурс-П, которые успешно интегрированы в системы мониторинга пожарной обстановки (ИСДМ-Рослесхоз).

В настоящее время активно внедряются и другие, относительно новые типы источников данных ДЗЗ [18]. Для визуального контроля и раннего обнаружения используются видимые и инфракрасные данные с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), которые отличаются своей маневренностью и оперативностью получения данных. Новые свойства растительности как горючих материалов изучаются с помощью лидарных технологий (LiDAR – Laser Detection and Ranging), которые позволяют исследовать пространственную структуру объектов на основе отражения активного оптического излучения.

На фоне огромного количества различных исходных данных и архивных наборов верифицированных данных о пожарах появилась возможность использовать нейронные сети. Их применение позволяет обучать вычислительные алгоритмы, на основе которых выявляются неочевидные закономерности, свойства изображений и их комбинации для точного прогноза природных возгораний [33].



Рис. 1. Исторические вехи в развитии методов использования данных ДЗЗ для предупреждения возгораний

Fig. 1. Milestones in the development of methods of using remote sensing data to prevent fires

Таким образом, по мере исторического развития (рис. 1) методическое обеспечение разработки методов использования данных ДЗЗ для предупреждения природных возгораний приобрело весьма обширный реализованный и перспективный потенциал.

Систематизация методов использования данных ДЗЗ для предупреждения возгораний

Вся совокупность методов использования данных ДЗЗ для предупреждения возгораний может характеризоваться и систематизироваться по ряду важных признаков (рис. 2).

Интерпретация процессов возгорания. Понимание причинно-следственных связей протекания пожара, факторов и условий возгорания для исследуемой территории является определяющим при выборе исходных данных и методов их обработки. В первом приближении в зависимости от типа горючего материала могут прогнозироваться лесные, степные и торфяные пожары, их возникновение и распространение.

Типы используемых данных. Подавляющее большинство методов ориентировано на применение космических снимков в разных спектральных диапазонах, однако происходит постоянное расширение перечня типов используемых данных (изображения с БПЛА, лидарные данные). Все чаще развиваются методы интеграции различных типов данных, что позволяет более всесторонне рассматривать процесс возгорания.

Технологии обработки и анализа данных. Углубление уровня знаний, экспоненциальный рост типов и объема данных требуют совершенствования технологий их обработки и анализа.

Пространственный уровень исследования также является важной характеристикой методов и определяет уровень детальности результатов прогноза возгораний и его характеристик.

Все вышеописанные признаки во взаимосвязи определяют вектор развития методов использования данных ДЗЗ. На наиболее характерных конкретных примерах рассмотрим особенности реализации и применения наиболее важных групп методов (см. таблицу), которые выделяются исходя из тесной взаимосвязи этих признаков: методы оценки пожарной опасности на основе ГИС, имитационные модели распространения возгораний и методы предупреждения возгораний на основе нейронных сетей.



Рис. 2. Методическое обеспечение использования данных ДЗЗ для предупреждения возгораний (ИК – инфракрасный)

Fig.2. Methodological support for the use of remote sensing data to prevent fires (IR – infrared)

Методы оценки пожарной опасности на основе ГИС

Основной задачей методов оценки пожарной опасности является классификация территории по классам этого показателя. Пожарная опасность выражает вероятность возгорания, классы с высокой опасностью интерпретируются как участки потенциальных пожаров. Как правило, она зависит от переменных факторов, которые закладывают авторы методов в понятие процесса возгорания. Традиционной является «триада» групп факторов – рельеф местности, условия погоды и характеристики горючих материалов. Алгоритмы методов оценки опасности включают следующие этапы:

1. *Измерение факторов пожарной опасности.* Показатели, вычисляемые по данным ДЗЗ в различных спектральных диапазонах, прямо или косвенно характеризуют факторы, заложенные в оценку пожарной опасности. Основным требованием является одновременность измерений, которая выполняется при съемке с одного спутника.

Картография и геоинформатика
Гизатуллин А.Т.

2. *Пространственное синтезирование показателей – оценка пожарной опасности.* С учетом веса вклада каждого фактора в геоинформационных системах на основе наложения слоев данных вычисляется синтезированный показатель. Вычисление происходит в зависимости от признаков выделения факторов на разных уровнях синтезирования [1]. Вес фактора может быть как фиксированным, так и переменным и зависеть от местоположения объекта потенциального возгорания. При использовании разнородных данных из различных источников (съёмочных систем и спутников) может вводиться временное синтезирование при несоблюдении принципа единовременности измерений. Таким образом, важными характеристиками являются пространственное и временное разрешение данных, которые определяют детальность прогноза и, косвенно, территориальный охват.

3. *Классификация по классам опасности.* В зависимости от особенностей территории выделяют диапазоны значений синтезированного показателя, которые количественно и качественно описывают вероятность возгорания. Чаще всего, вся совокупность значений ранжируется на 5 классов с очень низкой, низкой, средней, высокой и очень высокой опасностью.

4. *Интерпретация результатов – прогноз и рекомендации.* На этом этапе выполняется принятие решений, а именно выдаются конечный прогноз и рекомендации к проведению профилактических мероприятий.

Геоинформационное синтезирование факторов пожарной опасности иллюстрируется в методе, использованном в рамках борьбы с пожарами в лесах Греции [29]. Для определения типов горючего материала используются космические снимки Landsat, а также производные от них индексные изображения NDVI. Эти типы классифицированы по готовности к возгоранию на основе статистических данных. Для расчета топографического положения были использованы цифровые модели рельефа: чем выше уклон и южнее экспозиция местности, тем выше пожарная опасность. Помимо природных условий учитывалась и антропогенная нагрузка (расстояние до населенных пунктов и дорог) как источник потенциального возгорания. В несколько другой интерпретации влияние человека используется в методе предупреждения возгораний для лесов Италии [21]. В этом методе был введен дополнительный индекс ODIF, Operational Difficulty Index in Firefighting, в котором близость очага к дорогам и источникам водоснабжения являются благоприятными факторами и снижают пожарную опасность.

Иной признак синтезирования факторов применили исследователи [15], которые заложили в оценку пожарной опасности постоянную и переменную части. Постоянная часть FRSI (Fire Risk Static Index) складывается из аналитических параметров уклона, высоты, расстояния до главных дорог, количества солнечной радиации, типов растительного покрова, а также статистических архивных данных о пожарах. Переменная часть FRDI (Fire Risk Dynamic Index) вычисляется с использованием космических данных об NDVI (MODIS) и постоянной части: $FRDI = (1 - NDVI) \cdot FRSI$.

Нетривиальный подход к выделению признаков используется в методе прогнозирования исследователей из Италии и Испании [4]. На основе архива природных пожаров за несколько десятков лет они выявили *предикторы* – прогностические параметры, косвенно указывающие на вероятность возгорания. При выделении антропогенных источников пожаров для исследованной территории наиболее характерными предикторами являются плотность рекреационных зон, населенных пунктов и дорог, тогда как природная составляющая пожарной опасности статистически зависит от средней температуры воздуха, индекса NDVI и частоты грозных разрядов.

Таким образом, измеренные в пространстве факторы и показатели синтезируются в пожарную опасность. Современные системы мониторинга и предупреждения возгораний могут включать десятки и сотни оцениваемых факторов, сводимых в среде ГИС в единый показатель.

Модели распространения возгораний

Распространение возгораний является не менее важным процессом, необходимым для моделирования и предупреждения возгораний. Моделирование распространения возгораний используется как при прогнозе потенциальных пожаров, так и в случае обнаружения существующих очагов. Входными данными для моделирования являются совокупность точек, из которых распространяется огонь, а также космические снимки, цифровые модели рельефа и набор данных погоды, которые применяются для моделирования факторов распространения возгораний.

Картография и геоинформатика
Гизатуллин А.Т.

Сводная таблица методов предупреждения возгораний
Summary table of fire prevention methods

Метод	Назначение	Данные	Показатели	Территория
1	2	3	4	5
<i>Геоинформационные методы оценки пожарной опасности</i>				
Hirsch et al., 1971 [16]	Раннее выявление возгораний	Аэрофото среднем и тепловом ИК (инфракрасном канале)	Интенсивность спектрального отражения	Монтана, Айдахо, США
Giglio et al., 2003 [14]		Снимки MODIS	Спектральное отражение в среднем ИК	Весь мир
Yunhao et al., 2007 [36]		Данные БПЛА	Спектральное отражение в тепловом ИК	–
Calle, Salvador, 2013 [9]		Снимки Sentinel-3A,3B	Спектральное отражение в среднем ИК	Весь мир
Csiszar et al., 2013 [12]		Снимки Suomi NPP	Спектральное отражение в диапазоне 4 мкм	Весь мир
Ambrosia, Brass, 1988 [5]	Расчет переменных пожара	Аэроснимки, снимки AVHRR	Интенсивность и скорость пожара – спектральное отражение в диапазонах 2,25; 3,8; 11,5 мкм	Калифорния, США
Amatulli et al., 2007 [4]	Оценка вероятности возгорания	Архивные данные, ЦМР (цифровая модель рельефа)	Частота возгораний, вызванных человеком и молниевыми разрядами	Арагон, северо-восточная Испания
Rabii, 1979 [25]	Оценка пожарной опасности	Снимки MSS/Landsat-2, топографические карты	Классификация проводников горения через типы растительности	Национальный парк Кратер-Лейк, США
Bradshaw et al., 1984 [7]		Метеорологические, лесотаксационные, архивные данные	ИПО (индекс пожарной опасности) – температура и относительная влажность воздуха, облачность, скорость ветра, архивная частота возгораний, уклон местности, тип растительности	США
Van Wagner, 1987 [30]		Метеоданные	Влажность проводников горения, скорость распространения и расхода материалов горения	Канада
Rignot et al. 1994 [27]		Радиолокационные данные ERS-1, метеоданные	ИПО – коэффициент обратного рассеяния, влагосодержание растительности	Мэнли, США
B.-Chavez et al., 1999 [6]		Метеоданные, карта растительности, космические снимки	Индекс пожарного потенциала FPI – NDVI, температура и относительная влажность воздуха	Аляска, США, Канада
Lopez et al., 2002 [19]		Космические снимки, полевые данные, ландшафтные карты	Режимы пожарной опасности по видам проводников горения	Европа
Rollins et al., 2004 [28]		Снимки MODIS	Индекс пожарного потенциала FPI и пожарной уязвимости FSI – индексы NDVI, NDWI	–
Dasgupta et al., 2006 [13]		Снимки AVHRR	Опасность на основе NDVI	Джорджия, США
Hernandez-Leal et al., 2006 [15]				

Картография и геоинформатика
Гизатуллин А.Т.

Окончание табл.

1	2	3	4	5
Marchi et al., 2007 [21]		Космические снимки, лесотаксационные и метеоданные, ЦМР	Статический (близость к дорогам и населенным пунктам, уклон и экспозиция местности, тип растительности) и динамический (температура, осадки, количество дней без осадков) ИПО, сложность тушения (близость к дорогам и пожарным пунктам)	Тоскана, Италия
Stergiopoulos et al., 2007 [29]	Оценка пожарной опасности	Полевые данные, снимки TM/Landsat-5	Режимы пожарной опасности по видам проводников горения	Север Греции
Verbesselt et al., 2007 [32]		Снимки SPOT	Влажность проводников горения – NDVI, NDWI, VDI, IVDI, ARND и их временные изменения	Южная Африка
Navarro et al., 2017 [23]		Снимки Sentinel-2A	ИПО – NDVI, GNDVI, NBR, NDVIreXn	о. Мадейра
<i>Модели распространения возгораний</i>				
Zhu et al., 2000 [37]	Моделирование распространения пожара	Снимки AVHRR, TM/Landsat-5	Форма распространения пожаров (фракталы)	Учагоу, Китай
Mbow et al., 2004 [22]		Снимки ETM+/Landsat-7	ИПО – влажность поверхности, NDVI	Сенегал
Carmel et al., 2009 [10]		Метеоданные, SRTM, топокарты, карты растительности	Вектор скорости распространения FARSITE – высота, уклон, экспозиция местности, тип растительности, относительная влажность, температура воздуха, скорость ветра, удаленность от дорог и населенных пунктов	Израиль
Kanga, Singh, 2017 [17]		Снимки IRS-P6, SRTM, топокарты, метеоданные		Север Индии
Хвостиков и др., 2012 [3]		Метеоданные (Росгидромет), карта растительности TerraNorte RLC, STRM, точки пожаров MODIS	Общий индекс скорости пожара – влажность горючих материалов, тип земного покрова, уклон местности, скорость ветра	Россия
<i>Методы предупреждения возгораний на основе нейронных сетей</i>				
Rao et al., 2016 [26]	Раннее выявление возгораний	Данные БПЛА	Спектральное отражение в тепловом ИК	Андра Прадеш, Индия
Yaloveha et al., 2019 [33]		Многозональные данные БПЛА	Спектральное отражение в разных диапазонах	Калифорния, США
Vasconcelos et al., 2001 [31]	Оценка пожарной опасности	Топокарты, архивные данные о пожарах	ИПО – высота, уклон, экспозиция местности, тип растительности, расстояние до дорог и населенных пунктов, частота возгораний	Центральная Португалия
Maeda et al., 2009 [20]		Снимки MODIS	Спектральное отражение в разных диапазонах	Амазония, Бразилия
Levick et al., 2018 [18]		Снимки Sentinel-1,2, Pleiades, WorldView-3, KOMPSAT-3, лидарные данные	Плотность растительности	Север Австралии

Картография и геоинформатика
Гизатуллин А.Т.

При разработке моделей рассматривают различные ситуации поведения огня с учетом физики горения в различных средах, характера потенциальных горючих материалов и внешнего воздействия. Например, при исследовании рисков распространения огня в саваннах Африки [22] для описания горючих материалов были использованы спектральные индексы влагосодержания и относительной зелены растительности, полученные по снимкам ETM+/ Landsat-7. С использованием архивных многолетних параметров ветра как внешнего воздействия была разработана модель зон охвата пожара, которая линейно рассчитывает площади распространения.

Полуэмпирическая модель распространения возгораний была разработана исследователями из Китая [37]. Она включает в себя расчет теплового поля по данным TM/Landsat-5 и AVHRR/NOAA и прогноз распространения на основе фракталов с предположением о самоподобии пространственной формы пожара с его ростом. Позже в модели было учтено влияние типов растительности, метеоусловий и человека.

В вероятностной модели прогнозирования динамики лесных пожаров [3] в качестве переменных используются типы горючих материалов (в основном, растительности), данные о погоде и цифровая модель рельефа SRTM, а также инициирующие моделирование тепловые аномалии по изображениям MODIS, VIIRS, Landsat и Sentinel-2. В качестве метода моделирования используется метод Монте-Карло, который позволяет оценить периметр потенциального охвата пожара.

Известной моделью распространения огня является модель FARSITE, которая рассчитывает рост и поведение лесных пожаров для длительных периодов времени в неоднородных условиях местности и погоды [17]. Входными данными для модели являются переменные широты (инсоляции), рельефа (высота, уклон и экспозиция), типов растительности и его влагосодержания, погоды (температура и влажность воздуха, скорость и направление ветра), инфраструктуры (населенные пункты и дороги).

Результаты моделирования распространения возгораний представляются в виде изображений, демонстрирующих пути возможного роста очага возгорания с указанием временных интервалов (рис. 3).

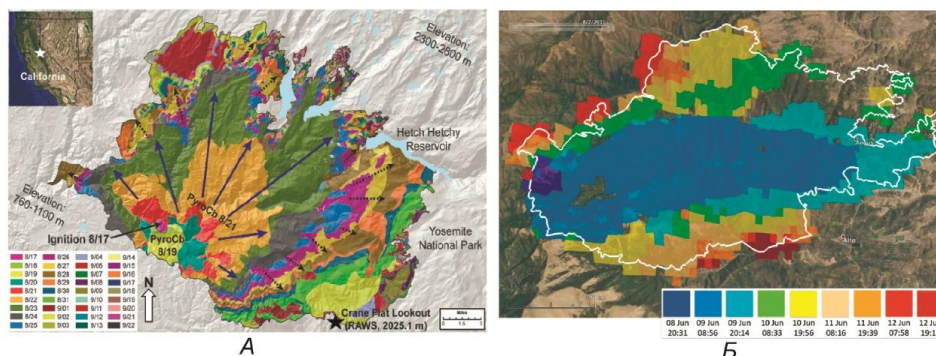


Рис. 3. Результаты моделирования распространения возгораний: А – [24], Б – [11]
Fig. 3. Results of modeling the spread of fires: А – [24], Б – [11]

Методы предупреждения возгораний на основе нейронных сетей

Нейронные сети для предупреждения возгораний используются для классификации изображений по классам пожарной опасности, распознавания образов очагов возгорания на снимках и предсказания потенциальных пожаров. Успешность применения нейронных сетей зависит от набора обучающих и тестовых данных: чем репрезентативнее выборка, тем лучше соответствие результатов обучения реальной ситуации.

В ранних исследованиях [31] были разработаны методы распознавания и классификации пространственных вероятностных образов пожаров, вызванных разными причинами и описываемых различными факторами (топографическое положение, типы использования земель и расстояния до объектов инфраструктуры). Было установлено, что для исследуемой территории (центральная Португалия) более эффективно использование нейронных сетей по сравнению с логистической регрессией.

В целом, нейросетевые методы в прогнозах пожаров различаются друг от друга типами сетей и территорией применения. Например, для амазонских лесов Бразилии на основе искусственных нейронных сетей с обратной связью была исследована возможность расчета вероятности возгорания на основе значений NDVI по данным прибора MODIS [20]. Вегетационные индексы в совокупности с метео-

*Картография и геоинформатика**Гизатуллин А.Т.*

и радарными данными также были использованы для предупреждения возгораний в муссонных лесах Камбоджи путем построения тренда по трем временным интервалам [35]. СКО тестирования обученных сетей составила не более 10%, что указывает на высокую точность прогнозов.

Нейронные сети также используются для данных с БПЛА и лидаров. В частности, семантические нейронные сети применяются для распознавания образов ранних очагов возгорания на изображениях с БПЛА [26]. Известны случаи прогноза пожаров с построением облаков точек по данным с БПЛА и лидара [18], которые позволяют исследовать трехмерную картину распределения горючих материалов, например, растительность под пологом леса, которая недоступна для космической съемки.

Заключение

В ходе исследования была предпринята попытка систематизации процесса разработки методов использования данных ДЗЗ для предупреждения природных возгораний сквозь призму их исторического развития и содержательного разнообразия и достигнуты следующие результаты:

– было выделено три временных этапа (см. рис. 1), которые отражают основные вехи разработки методов: 1) от наземных измерений к космической съемке и ГИС; 2) развитие алгоритмической базы с углублением интерпретации процесса возгорания; 3) обработка больших массивов данных с внедрением новых технологий и источников;

– впервые предложена систематизация совокупности методов, которые могут быть охарактеризованы с точки зрения интерпретации процессов возгорания, используемых данных, технологий их обработки и пространственного уровня исследования (см. рис. 2) как критических составляющих при их разработке. На основе анализа этих категорий были сделаны некоторые выводы.

Большинство методов нацелены на предупреждение лесных возгораний как наиболее масштабных с точки зрения физических, экономических и социальных убытков, но при этом интенсивно изучаются также степные и торфяные пожары. Предупреждение возгораний может интерпретироваться, с одной стороны, как прогнозирование факта возникновения пожара, а с другой – его распространения. Однако современные методы стремятся исследовать процесс комплексно, объединяя оба варианта интерпретации.

Развитие методов предупреждения природных возгораний происходит с учетом текущих технологических достижений использования данных ДЗЗ и смежных областей геоинформатики. Апогеем их разработки являются многоуровневые системы мониторинга пожарной ситуации, которые комбинируют в себе разнородные типы данных, различные алгоритмы их обработки и интегрируют результаты между собой.

Таким образом, на сегодняшний день проблема точного прогнозирования пожаров не является решенной. Однако систематизированная методическая обеспеченность и многосторонняя интерпретация исследуемого процесса позволяют с достаточной достоверностью применять реализованный потенциал данных ДЗЗ в рассматриваемой области, а также развивать перспективные типы данных и технологии их обработки в обширном и сложном процессе разработки методов для предупреждения возгораний.

Библиографический список

1. Гизатуллин А.Т., Алексеенко Н.А., Моисеева Н.А. Разработка алгоритма превентивной оценки пожарной опасности природных территорий по данным дистанционного зондирования // Геодезия и картография. 2019. Т. 80. № 1. С. 102–109.
2. Пожары и пожарная безопасность в 2018 году: статистический сборник / под общей ред. Д.М. Гордиенко. М.: ВНИИПО, 2019. 125 с.
3. Хвостиков С.А. Региональная оптимизация параметров прогнозной модели природных пожаров и оперативное моделирование динамики их развития с использованием данных спутниковых наблюдений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 3. С. 91–100.
4. Amatulli G., Perez-Cabello F., de la Riva J. Mapping lightning/human-caused wildfires occurrence under ignition point location uncertainty // Ecological Modelling. 2007. Т. 200. № 3-4. P. 321–333.
5. Ambrosia V.G., Brass J.A. Thermal analysis of wildfire effects on global ecosystem cycling // Geocarto International. 1988. Т. 3. № 4. P. 29–40.
6. Bourgeau-Chavez L.L., Kasischke E.S., Rutherford M.D. Evaluation of ERS SAR data for prediction of fire danger in a boreal region // International Journal of Wildland Fire. 1999. Т. 9. № 3. P. 183–194.
7. Bradshaw L.S., Deeming J.E., Burgan R.E., Cohen, J.D. The 1978 National Fire-Danger Rating System: technical documentation. General Technical Report INT-169. Ogden: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, 1984. 44 p.

Картография и геоинформатика

Гизатуллин А.Т.

8. Brushlinsky N.N., Ahrens M., Sokolov S.V., Wagner P. World Fire Statistics // Center of Fire Statistics: International Association of fire and rescue services. 2016. № 21. 62 p.
9. Calle A., Salvador P. The active fire FRP product: study on Sentinel-3/SLSTR // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 2013. T. 10. № 5. P. 1046–1049.
10. Carmel Y., Paz S., Jahashan F., Shoshany M. Assessing fire risk using Monte Carlo simulations of fire spread // Forest Ecology and Management. 2009. T. 257. № 1. P. 370–377.
11. Coen J.L., Schroeder W. Use of spatially refined satellite remote sensing fire detection to initialize and evaluate coupled weather-wildfire growth model simulations // Geophysical Research Letters. 2013. T. 40. P. 5536–5541.
12. Csiszar [et al.] Active fires from the Suomi NPP Visible Infrared Imaging Radiometer Suite: Product status and first evaluation results // Journal of Geophysical Results: Atmospheres. 2013. T. 119. № 2. P. 803–816.
13. Dasgupta S., Qu J.J., Hao X.J. Design of a susceptibility index for fire risk monitoring // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 2006. T. 3. № 1. P. 140–144.
14. Giglio L., Descloitres J., Justice C. O., Kaufman Y.J. An enhanced contextual fire detection algorithm for MODIS // Remote Sensing of Environment. 2003. T. 87. № 2-3. P. 273–282.
15. Hernandez-Leal P.A., Arbelo M., Gonzalez-Calvo A. Fire Risk assessment using satellite data // Advances in Space Research. 2006. T. 37. № 4. P. 741–746.
16. Hirsch S.N., Kruckeberg R.F., Madden F.H. The bi-spectral forest detection system // Proceeding 7th International Symposium. on Remote Sensing of Environment. ERIM. Ann Arbor. MI. 1971. P. 2253–2259.
17. Kanga S., Singh K. Forest Fire Simulation Modeling using Remote Sensing & GIS // International Journal of Advanced Research in Computer Science. 2017. T. 8. № 5. P. 326–332.
18. Levick S.R., Shendryk Y., Setterfield S.A., Rossiter-Rachor N.A. Evaluation of satellite remote sensing pathways for mapping and monitoring of gamba grass for the Savanna Fire Management Methodology. Darwin, 2018. 20 p.
19. Lopez A.S., San-Miguel-Ayanz J., Burgan R. Integration of satellite sensor data, fuel type maps and meteorological observations for evaluations of forest fire risk at the pan-European scale // International Journal of Remote Sensing. 2002. T. 23. № 13. P. 2713–2719.
20. Maeda E.E. [et al.]. Forest fire risk mapping in the Brazilian Amazon using MODIS images and artificial neural networks // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2009. T. 11. №4. P. 265–272.
21. Marchi E. [et al.]. Forest fire prevention: a GIS tool for fire-fighting planning and management // Proceedings of the 6th international workshop of the EARSeL special interest group on forest fires. Thessaloniki, 2007. P. 102–106.
22. Mbow C., Goita K., Benie B. Spectral indices and fire behavior simulation for fire risk assessment in savanna ecosystem // Remote Sensing of Environment. 2004. T. 91. № 1. P. 1–13.
23. Navarro G. [et al.]. Evaluation of forest fire on Madeira Island using Sentinel-2A MSI imagery // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2017. T. 58. P. 97–106.
24. Peterson D.A. [et al.]. Implications for predicting extreme fire spread, pyroconvection and smoke emissions // Bulletin of the American Meteorological Society. 2015. T. 96. № 2. P. 229–247.
25. Rabii H.A. An Investigation of the utility of Landsat-2 MSS data to the fire-danger rating area, and forest fuel analysis within Crater Lake National Park: Ph.D. thesis. Oregon, 1979. 410 p.
26. Rao G.N., Rao P.J., Duvvuru R.A. Drone Remote Sensing for Virtual Reality Simulation System for Forest Fires: Semantic Neural Network Approach // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2016. № 149. P. 1–7.
27. Rignot E. [et al.]. Monitoring of environmental conditions in taiga forests using ERS-1 SAR // Remote Sensing of the Environment. 1994. T. 49. № 2. P. 145–154.
28. Rollins M.G., Keane R.E., Parsons R.A. Mapping fuels and fire regimes using remote sensing, ecosystem simulation and gradient modeling // Ecological Applications. 2004. T. 14. № 1. P. 75–95.
29. Stergiopoulos I., Mallinis G., Gitas I.Z. Fuel type mapping using medium resolution imagery and GIS, considering radiometric, spatial and spectral enhancements of the original dataset // Proceedings of the 6th international workshop of the EARSeL special interest group on forest fires. Thessaloniki, 2007. P. 107–110.
30. Van Wagner C.E. Development and Structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System // Forestry Technical Report. Canada Forest Service. 1987. 37 p.
31. Vasconcelos M.J.P. [et al.]. Spatial Prediction of Fire Ignition Probabilities: Comparing Logistic Regression and Neural Networks // Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. 2001. T. 67. № 1. P. 73–81.
32. Verbesselt J. [et al.]. Monitoring herbaceous fuel moisture content with SPOT VEGETATION time-series for fire risk prediction in savanna ecosystems // Remote Sensing of Environment. 2007. T. 108. №4. P. 357–368.
33. Yaloveha V., Hlavcheva D., Podorozhniak A., Kuchuk H. Fire Hazard Research of Forest Areas based on the use of Convolutional and Capsule Neural Networks // IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering. Lviv, 2019. P. 828–832.
34. Yool S.R., Eckhardt D.W., Estes J.E., Cosentino J. Describing the brushfire hazard in Southern California // Annals of the American Association of Geographers. 1985. T. 75. № 3. P. 417–430.
35. Yu B., Chen F., Li B., Wang L. Fire Risk Prediction Using Remote Sensed Products: A Case of Cambodia // Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. 2017. T. 83. № 1. P. 19–25.

Картография и геоинформатика

Гизатуллин А.Т.

36. Yunhao C., Jing L., Guangxiong P. Forest fire risk assessment combining remote sensing and meteorological information // *New Zealand Journal of Agricultural Research*. 2007. Т. 50. № 5. P. 1037–1044.

37. Zhu Q., Rong T., Sun R. A case study on fractal simulation of forest fire spread // *Science in China*. 2000. Т. 43. P. 104–113.

References

1. Gizatullin, A., Alekseenko, N. and Moiseeva, N. (2019), Razrabotka algoritma preventivnoi otsenki pozharnoi opasnosti prirodnykh territorii po dannym distantsionnogo zondirovaniya (Development of the preventive natural fire danger assessment algorithm using remote sensing data), *Geodeziya i kartografiya*, 80(1), pp. 102–109.

2. Gordienko, D. (ed.) (2019), *Pozhary i pozhar'naya bezopasnost' v 2018 godu: Statisticheskii sbornik* [Fires and Fire Safety in 2018: Statistical Digest], Moscow, Russia: VNIPO.

3. Khvostikov, S., Balashov, I., Bartalev, S., Efremov, V. and Lupyan, E. (2012), Regional'naya optimizatsiya parametrov prognoznoi modeli prirodnykh pozharov i operativnoe modelirovanie dinamiki ikh razvitiya s ispol'zovaniem dannykh sputnikovykh nablyudenii (Regional scale optimization of wildfire model parameters and modelling of wildfire dynamic using remote sensing data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, vol 9, n. 3, pp. 91–100.

4. Amatulli, G., Perez-Cabello, F. and de la Riva, J. (2007), "Mapping lightning/human-caused wildfires occurrence under ignition point location uncertainty", *Ecological Modelling*, vol. 200, no. 3–4, pp. 321–333.

5. Ambrosia, V., and Brass, J.A. (1988), "Thermal analysis of wildfire effects on global ecosystem cycling", *Geocarto International*, vol. 3, no. 4, pp. 29–40.

6. Bourgeau-Chavez, L., Kasischke, E. and Rutherford, M. (1999), "Evaluation of ERS SAR data for prediction of fire danger in a boreal region", *International Journal of Wildland Fire*, vol. 9, no. 3, pp. 183–194.

7. Bradshaw, L., Deeming, J., Burgan, R. and Cohen, J. (1984), *The 1978 National Fire-Danger Rating System: technical documentation. General Technical Report INT-169*, Ogden: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, p. 44.

8. Brushlinsky, N., Ahrens, M., Sokolov, S. and Wagner, P. (2016), *World Fire Statistics. Center of Fire Statistics*, International Association of fire and rescue services, no. 21.

9. Calle, A., and Salvador, P. (2013), "The active fire FRP product: study on Sentinel-3/SLSTR", *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 10, no. 5, pp. 1046–1049.

10. Carmel, Y., Paz S., Jahashan, F. and Shoshany, M. (2009), "Assessing fire risk using Monte Carlo simulations of fire spread", *Forest Ecology and Management*, vol. 257, no. 1, pp. 370–377.

11. Coen, J., and Schroeder, W. (2013), "Use of spatially refined satellite remote sensing fire detection to initialize and evaluate coupled weather-wildfire growth model simulations", *Geophysical Research Letters*, vol. 40, pp. 5536–5541.

12. Csiszar, I., Schroeder, W., Giglio, L., Ellicor, E., Vadrevu, K., Justice, C. and Wind, B. (2014), "Active fires from the Suomi NPP Visible Infrared Imaging Radiometer Suite: Product status and first evaluation results", *Journal of Geophysical Results: Atmospheres*, vol. 119, no. 2, pp. 803–816.

13. Dasgupta, S., Qu, J. and Hao, X. (2006), "Design of a susceptibility index for fire risk monitoring", *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 3, no. 1, pp. 140–144.

14. Giglio, L., Descloitres, J., Justice, C. and Kaufman, Y. (2003), "An enhanced contextual fire detection algorithm for MODIS", *Remote Sensing of Environment*, vol. 87, no. 2–3, pp. 273–282.

15. Hernandez-Leal, P., Arbelo, M. and Gonzalez-Calvo, A. (2006), "Fire Risk assessment using satellite data", *Advances in Space Research*, vol. 37, no. 4, pp. 741–746.

16. Hirsch, S., Kruckeberg, R. and Madden, F. (1971), "The bi-spectral forest detection system", *Proceedings of the 7th International Symposium on Remote Sensing of Environmen*, Ann Arbor Environmental Research Institute of Michigan, pp. 2253–2259.

17. Kanga, S., and Singh, K. (2017), "Forest Fire Simulation Modeling using Remote Sensing & GIS", *International Journal of Advanced Research in Computer Science*, vol. 8, no. 5, pp. 326–332.

18. Levick, S., Shendryk, Y., Setterfield, S. and Rossiter-Rachor, N. (2018), *Evaluation of satellite remote sensing pathways for mapping and monitoring of gamba grass for the Savanna Fire Management Methodology*, Darwin: CSIRO and Charles Darwin University.

19. Lopez, A., San-Miguel-Ayanz, J. and Burgan, R. (2002), "Integration of satellite sensor data, fuel type maps and meteorological observations for evaluations of forest fire risk at the pan-European scale", *International Journal of Remote Sensing*, vol 23, no. 13, pp. 2713–2719.

20. Maeda, E., Formaggio, A., Shimabukuro, Y., Arcoverde, G. and Hansen, M. (2009), "Predicting forest fire in the Brazilian Amazon using MODIS imagery and artificial neural networks", *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 11, no. 4, pp. 265–272.

21. Marchi, E., Tesi, E., Montorselli, N., Conese, C., Bonora, L. and Romani, M. (2007), "Forest fire prevention: a GIS tool for fire-fighting planning and management", *Proceedings of the 6th international workshop of the EARSeL special interest group on forest fires*, Thessaloniki: European Communities, pp. 102–106.

22. Mbow, C., Goita, K. and Benie, B. (2004), "Spectral indices and fire behavior simulation for fire risk assessment in savanna ecosystems", *Remote Sensing of Environment*, vol. 91, no. 1, pp. 1–13.

Картография и геоинформатика

Гизатуллин А.Т.

23. Navarro, G., Caballero, I., Silva, G., Parra, P.C., Vasquez, A. and Caldera, R. (2017), "Evaluation of forest fire on Madeira Island using Sentinel-2A MSI imagery", *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 58, pp. 97–106.
24. Peterson, D.A. et al. (2015), "The 2013 Rim Fire: Implications for predicting extreme fire spread, pyroconvection and smoke emissions" *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 96, no. 2, pp. 229–247.
25. Rabii, H.A. (1979), *An Investigation of the utility of Landsat-2 MSS data to the fire-danger rating area, and forest fuel analysis within Crater Lake National Park: Ph.D. thesis*, Oregon.
26. Rao, G., Rao, P. and Duvvuru, R. (2016), "A Drone Remote Sensing for Virtual Reality Simulation System for Forest Fires: Semantic Neural Network Approach", *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, no. 49, pp. 1–7.
27. Rignot, E. et al. (1994), "Monitoring of environmental conditions in taiga forests using ERS-1 SAR", *Remote Sensing of the Environment*, vol. 49, no. 2, pp. 145–154.
28. Rollins, M., Keane, R. and Parsons, R. (2004), "Mapping fuels and fire regimes using remote sensing, ecosystem simulation and gradient modeling", *Ecological Applications*, vol. 14, no. 1, pp. 75–95.
29. Stergiopoulos I., Mallinis G. and Gitas I. (2007). Fuel type mapping using medium resolution imagery and GIS, considering radiometric, spatial and spectral enhancements of the original dataset, *Proceedings of the 6th international workshop of the EARSeL special interest group on forest fires*, Thessaloniki: European Communities, pp. 107–110.
30. Van Wagner, C.E. (1987), *Development and Structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System*, Forestry Technical Report, Canada Forest Service.
31. Vasconcelos, M. et al. (2001), "Spatial Prediction of Fire Ignition Probabilities: Comparing Logistic Regression and Neural Networks", *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, vol. 67, no. 1, pp. 73–81.
32. Verbesselt, J. et al. (2007), "Monitoring herbaceous fuel moisture content with SPOT VEGETATION time-series for fire risk prediction in savanna ecosystems", *Remote Sensing of Environment*, vol. 108, no. 4, pp. 357–368.
33. Yaloveha, V., Hlavcheva, D., Podorozhniak, A. and Kuchuk, H. (2019), "Fire Hazard Research of Forest Areas based on the use of Convolutional and Capsule Neural Networks", *IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering*, Lviv, Ukraine, pp. 828–832.
34. Yool, S.R., Eckhardt, D.W., Estes, J.E. and Cosentino J. (1985), "Describing the brushfire hazard in Southern California", *Annals of the American Association of Geographers*, vol. 75, no. 3, pp. 417–430.
35. Yu, B., Chen, F., Li, B. and Wang, L. (2017), "Fire Risk Prediction Using Remote Sensed Products: A Case of Cambodia", *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, vol. 83/ no. 1, pp. 19–25.
36. Yunhao, C., Jing, L. and Guangxiong, P. (2007), "Forest fire risk assessment combining remote sensing and meteorological information", *New Zealand Journal of Agricultural Research*, vol. 50, no. 5, pp. 1037–1044.
37. Zhu, Q., Rong, T. and Sun R. (2000), "A case study on fractal simulation of forest fire spread", *Science in China*, vol. 43, pp. 104–113.

Поступила в редакцию 23.11.2020.

Сведения об авторе**Алмаз Тимербулатович Гизатуллин**

аспирант кафедры картографии и геоинформатики,
Московский государственный университет имени М.В.
Ломоносова;
119991, Россия, г. Москва, ГСП-1, Ленинские горы,
МГУ, географический факультет

About the author**Almaz T. Gizatullin**

Postgraduate Student, Department of Cartography and
Geoinformatics, Lomonosov Moscow State University;
GSP-1, Leninskie gory, Moscow, 119991, Russia

e-mail: almazgiz1995@yandex.ru

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Гизатуллин А.Т. Разработка методов использования данных дистанционного зондирования земли для предупреждения природных пожаров // Географический вестник = Geographical bulletin. 2021. №1(56). С. 149–161. doi 10.17072/2079-7877-2021-1-149-161.

Please cite this article in English as:

Gizatullin, A.T. (2021) Development of remote sensing methods for natural fire prevention. *Geographical Bulletin*. No. 1(56). Pp. 149–161. doi 10.17072/2079-7877-2021-1-149-161.