

УДК: 528.88:630*432

DOI: 10.35595/2414-9179-2021-2-27-340-354

А.Т. Гизатуллин¹

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ ПРИРОДНЫХ ПОЖАРОВ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ НА ПРИМЕРЕ ЛЕСОВ КРАСНОЯРСКОГО КРАЯ

АННОТАЦИЯ

Рассматриваются этапы разработки методики предупреждения природных пожаров по данным дистанционного зондирования на примере лесов Красноярского края. Приводится обоснование выбора территории исследования на основе статистических данных о пожарах (термоточки FIRMS 2016-2018 гг.) с точки зрения разнообразия условий возгорания. В основу оценки пожарной опасности закладываются наиболее информативные факторы возгорания – температура поверхности, неоднородность растительного покрова и антропогенная нагрузка, выведенные на основе природно-пожарной характеристики территории. Эти факторы оценены путем измерения близких к ним показателей соответственно – радиояркостной температуры на основе теплового излучения, вегетационного индекса NDVI и интегрального показателя расстояния до населенных пунктов и дорог. В качестве источников данных использовались материалы со спутников Terra/Aqua, Sentinel-3, Landsat-8, Sentinel-2 и векторные картографические слои Open Street Maps. С помощью статистических данных была проанализирована взаимосвязь показателей с фактической возгораемостью территории Красноярского края. В результате были получены различные по лесным районам и времени пожароопасного сезона коэффициенты корреляции, описывающие вклад отдельных факторов в пожарную опасность, а также пороговые значения показателей для предупреждения пожаров. В соответствии с ними была построена методика в виде последовательности этапов аналитической и синтетической оценки пожарной опасности. Тестирование методики было произведено в наиболее пожароопасном и репрезентативном с точки зрения условий возгорания участке на юго-западе Красноярского края в период с 1 апреля по 10 мая 2019 года. По итогам тестирования подтвердилась достаточная достоверность (65 %) и надежность (58 %) прогноза природных возгораний.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: оценка пожарной опасности, данные ДЗЗ, факторы пожарной опасности, пороговые значения.

Almaz T. Gizatullin²

DEVELOPMENT OF NATURAL FIRE PREVENTION METHOD BASED ON REMOTE SENSING DATA: CASE STUDY OF KRASNOYARSK REGION FORESTS

ABSTRACT

The stages of development of natural fire prevention method based on remote sensing data were considered. The case study is focused on Krasnoyarsk region forests. There was a rationale

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, кафедра картографии и геоинформатики, Ленинские горы, д. 1, 119991, Москва, Россия, e-mail: almazgiz1995@yandex.ru

² Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Cartography and Geoinformatics, Leninskie Gory 1, 119991, Moscow, Russia, e-mail: almazgiz1995@yandex.ru

for selecting a study area on the basis of statistical fire data (FIRMS thermal hot spots 2016–2018) and a variety of fire conditions. The fire assessment was founded on the most informative fire factors – surface temperature, vegetation cover inhomogeneity and man-made load, which are derived by the natural-fire characteristics of the territory. These factors were evaluated by measuring parameters closed to them, respectively – radiobrightness temperature based on thermal emission, vegetation index NDVI and integral indicator of distance to settlements and roads. Materials from the Terra/Aqua, Sentinel-3, Landsat-8, Sentinel-2 satellites and Open Street Maps vector map layers were used as data sources. With use of statistical data, the relationship between above parameters and the present fire danger of Krasnoyarsk region was analyzed. Based on the results, we obtained different by forest rayon and fire season month correlation coefficients that described the contribution of individual factors to a fire danger, and threshold values of parameters for preventing fires. Then a sequence of stages of analytical and synthetic fire danger assessment as a study method was built. Validation of the method was performed in the most fire dangerous and representative in terms of fire conditions area in the south-west of the Krasnoyarsk Territory from April 1 to May 10, 2019. It showed sufficient accuracy (65 %) and reliability (58 %) of fire forecast.

KEYWORDS: fire danger assessment, remote sensing data, fire danger factors, threshold values.

ВВЕДЕНИЕ

Данные дистанционного зондирования успешно используются в области исследования природных возгораний уже несколько десятилетий. Первые применения ДДЗ относятся к 1960-м гг., когда для раннего обнаружения пожаров на самолеты устанавливали тепловые инфракрасные сканеры [Hirsch et al., 1971]. Запуск спутников Landsat в 1970-х дал начало применению космических ДДЗ, которые эффективно использовались для оценки показателя пожарной опасности [Bradshaw et al., 1984]. В это же время разработка первых геоинформационных систем позволила объединить факторы пожарной опасности и получить пространственную комбинацию в виде пожароопасных зон [Calabri, 1984]. В качестве основных переменных использовались характерные факторы, такие как растительность, рельеф, инсоляция, параметры погоды и др. [Rabii et al., 1979].

Дальнейшее развитие области использования ДДЗ для предупреждения пожаров подразделяется на несколько направлений и связано:

- с расширением типов ДДЗ и технологий их обработки;
- с интерпретацией процесса возгорания в связи с особенностями территории.

По мере развития вводились новые типы данных: радиолокационные, обеспечивающие мониторинг температуры и влажности приповерхностного слоя почвы [Rignot et al., 1994; Verbesselt et al., 2007]; лидарные, позволяющие детально исследовать пространственную структуру объектов потенциального возгорания [Skowronski et al., 2011]; данные с БПЛА, отличающиеся маневренностью и оперативностью получения [Yuan et al., 2015], и др.

Однако эффективность методик предупреждения также сильно зависит от учета территориальных условий, которые определяют готовность к возгоранию. В России с обширными лесными территориями для оценки пожарной опасности принят комплексный индекс Нестерова¹, который рассчитывается в зависимости от условий погоды, в частности, от температуры воздуха. На сегодняшний день разработаны аналоги индекса, основанные на измерениях радиационных температур по космическим снимкам [Сухинин, Пономарев, 2003]. Подобные методы по условиям погоды разработаны и используются в странах с

¹ ГОСТ Р 22.1.09-99. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Мониторинг и прогнозирование лесных пожаров. Общие требования.

острыми проблемами лесных пожаров: FWI (Fire Weather Index), рейтинговые системы в США и Канаде¹, индекс Макаурта в Австралии [Dowdy *et al.*, 2009] и др.

Важное значение уделяется изучению проводников горения, которым выступает лесная растительность, обладающая различными свойствами и, как следствие, разным риском воспламенения [Софронова, Волокутина, 2017]. Оригинальную интерпретацию учета растительности предложили [Chéret, Denux, 2011], которые при оценке пожарной опасности средиземноморского побережья использовали временные профили NDVI 2000–2006 гг. и разработали два производных индекса. Они основаны на статистических отклонениях исходного показателя от среднего и показывают недостаток или переизбыток развития зеленой массы и, как следствие, влагосодержания растительности. В исследованиях различных территорий Греции, Италии, Китая и Ирана [Stergiopoulos *et al.*, 2007; Marchi *et al.*, 2007; Dong *et al.*, 2005] к классификации растительности, как проводников возгорания разной опасности, добавляют такие факторы, как рельеф (уклон и экспозиция), близость к антропогенным источникам возгорания (населенные пункты, дороги) и тушения (пожарные базы). Все эти методы используют взвешенную оценку факторов и последующее их комбинирование в единый показатель пожарного риска. Вероятностные исследования и выявление различных предикторов (причин возгораний) провели [Amatulli *et al.*, 2007]: на основе обширного архива пожаров в Испании за 1983–2001 гг. было выявлено 34 наиболее вероятных параметра, которые влияют на риски возгорания (густота антропогенных объектов, высота местности, NDVI и др.).

Текущий обзор показывает разнообразие методов оценки пожарной опасности, но, тем не менее, возрастающее разнообразие и объем данных дистанционного зондирования позволяют совершенствовать и уточнять методы их обработки для выявления потенциальных пожаров. При этом, несмотря на их разнообразие набор и веса факторов для достаточно крупных территорий остаются постоянными, тогда как они обладают пространственной и сезонной изменчивостью, что в конечном счете понижает достоверность прогноза.

Целью текущего исследования является *разработка методики предупреждения природных пожаров с использованием данных дистанционного зондирования на примере лесов Красноярского края*, которая будет учитывать пространственно-временную дифференциацию факторов пожарной опасности. Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

- обосновать выбор территории применения методики;
- подобрать и уточнить показатели оценки пожарной опасности;
- протестировать эффективность методики.

Красноярский край характеризуется высоким значением лесистости территории: леса покрывают более 70 % площади и занимают 168,1 млн га². Столь обширная лесная территория, которая имеет достаточно широкую меридиональную протяженность, располагается в пределах нескольких природных зон: притундровых лесов и редколесий, таежной (северной, средней и южной) и лесостепной, местами осложняется высотной поясностью и дифференцируется на 7 лесных районов (рис. 1).

Ежегодно на территории Красноярского края происходит большое количество лесных пожаров, что обуславливает актуальность исследования и обеспечивает совокупность эталонных участков для их изучения на основе ДДЗ. Для подтверждения

¹ Fire Weather Index (FWI) System. National Wildfire Coordinating Group. Электронный ресурс: <https://www.nwccg.gov/publications/pms437/cffdrs/fire-weather-index-system> (дата обращения 21.03.2021).

² Официальные статистические показатели. ЕМИСС – Государственная статистика. Электронный ресурс: <https://fedstat.ru/> (дата обращения 23.03.2021).

этого положения был проведен оверлейный анализ на основе пересечения сетки административно-территориального деления РФ и совокупности термоточек, интерпретируемых как местоположения пожаров за 2016–2018 гг. и сформированных системой FIRMS¹ по данным MODIS с коэффициентом надежности более 95 % (см рис. 1). Как видим, наибольшее количество пожаров достигается в Восточной Сибири: в республике Саха (149 686 точек), в Красноярском крае (140 743 точки). Однако, как уже было отмечено, меридиональная протяженность Красноярского края обуславливает большее разнообразие породного состава лесов, что увеличивает репрезентативность его территории для распространения методики на всю Россию.

С точки зрения, природно-пожарной характеристики [Фурьев и др. 2017] Красноярский край описывается существенными различиями в условиях возгорания, которые определяются *разнообразием и плотностью распространения древесных пород*, а также *растительностью напочвенного покрова*, которые служат горючим материалом. Горимость лесов также зависит от количества приходящей солнечной радиации, и, как следствие, от *температуры* нагреваемой ею *поверхности*. Немаловажным фактором является *антропогенная нагрузка* на территорию. Таким образом, для последующего исследования были выбраны три фактора пожарной опасности: *неоднородность растительного покрова, температура поверхности и антропогенная нагрузка*.

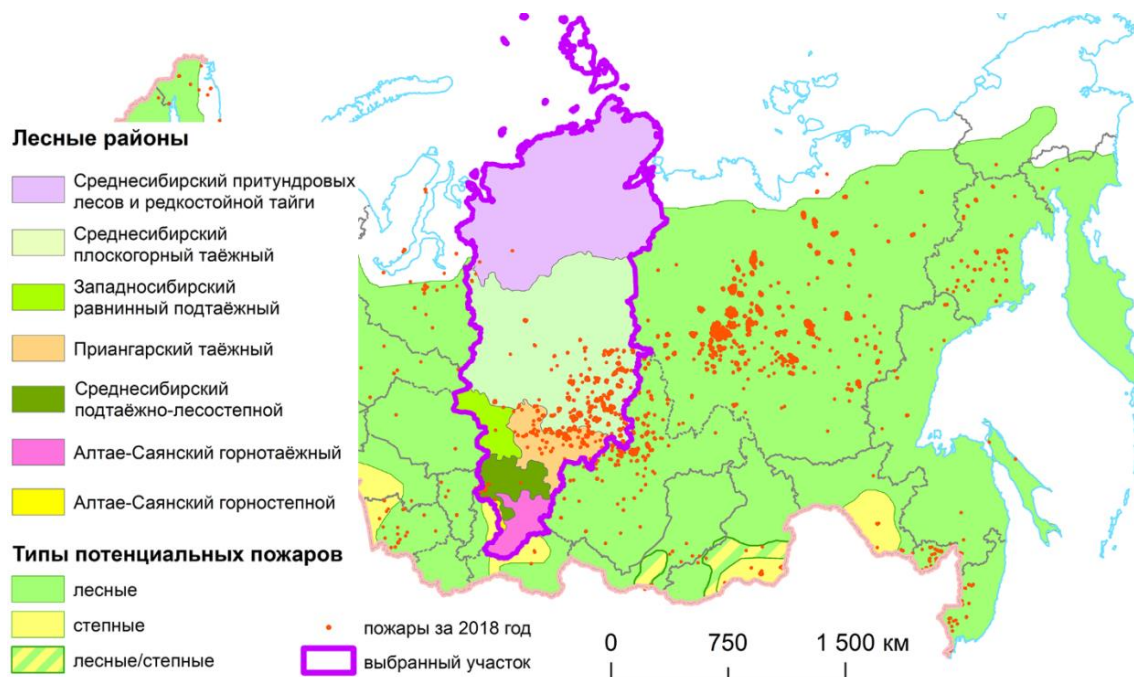


Рис. 1. Красноярский край в разрезе исследования пожарной опасности
Fig. 1. Krasnoyarsk region in terms of fire danger research

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Методика предупреждения лесных пожаров на основе оценки пожарной опасности предполагает собой определенную последовательность операций по обработке исходных

¹ Fire Information for Resource Management System. Электронный ресурс: <https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/> (дата обращения 15.01.2021).

данных для численного расчета факторов пожарной опасности, их интерпретации и сведения значений в единый показатель.

Исходные данные

В качестве исходных данных были использованы данные дистанционного зондирования спутников Terra/Aqua, Sentinel-3, Sentinel-2, Landsat-8 (табл. 1). В совокупности эти данные отвечают таким требованиям, как свободный и практически нелимитированный доступ (в некоммерческих целях), регулярное обновление и актуальность, возможность автоматизации обработки. Кроме того, они взаимодополняют друг друга с точки зрения пространственного охвата (Terra/Aqua и Sentinel-3) и детальности (Landsat-8, Sentinel-2), алгоритмической базы, преемственности и перспектив использования (Terra/Aqua → Sentinel-3, Landsat-8 → Sentinel-2, потенциальный Landsat-9). Все это обеспечивает достоверные и надежные результаты их обработки в рамках разрабатываемой методики.

В дополнение к ДДЗ, применялись векторные картографические слои Open Street Maps¹ (OSM), отражающие распределение антропогенных объектов на территории исследования. Выбор этих данных обуславливается открытой лицензией на их использование при сопоставимой достоверности по сравнению с другими сервисами общегеографических карт и более актуальным изображением местности по сравнению с топографическими картами. Также они представлены в векторном формате, удобном для осуществления последующего автоматизированного анализа по ним.

Табл. 1. Основные характеристики исходных данных ДДЗ (составлено по источнику²)
Table 1. Principal characteristics of used remote sensing data (compiled based on source⁸)

Спутник	Съемочная система	Дата запуска	Пространственное разрешение, м	Полоса обзора, км	Частота съемки, сут.
Terra/Aqua	MODIS	1999, 2002	250, 500, 1000	2330	≈0,5-2
Sentinel-3	SLSTR	A – 2016 B – 2018	500	1420	≈1
Landsat-8	OLI/TIRS	2013	15, 30, 100	185	до 16
Sentinel-2	MSI	A – 2015 B – 2017	10, 20, 60	290	до 5

Численный расчет факторов пожарной опасности

Ранее было выделено 3 фактора пожарной опасности – неоднородность растительного покрова, температура поверхности и антропогенная нагрузка. Для их количественного измерения введем понятие показателя пожарной опасности – метрически описываемая с помощью ДДЗ или их производных и наиболее точно по смыслу как фактор пожарной опасности характеристика.

Для описания *неоднородности растительности*, в частности, ее горизонтальной составляющей зачастую используют вегетационные индексы [Chéret, Denux, 2011], самым распространенным из которых является индекс NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). Расчет этого индекса основывается на двух наиболее стабильных и информативных участках спектральной кривой растительности – красном видимом и ближнем инфракрасном [Rouse et al., 1974]:

¹ RU:Highway classification. OSM-Wiki. Электронный ресурс: https://wiki.openstreetmap.org/wiki/RU:Highway_classification (дата обращения: 16.03.2021).

² Пространственные данные – космическая съемка. Совзонд. Электронный ресурс: <https://sovzond.ru/products/spatial-data/satellites/> (дата обращения 19.02.2021).

$$NDVI = \frac{B_{\sim 0,8-0,9 \text{ мкм}} - B_{\sim 0,63-0,75 \text{ мкм}}}{B_{\sim 0,8-0,9 \text{ мкм}} + B_{\sim 0,63-0,75 \text{ мкм}}},$$

где B – интенсивность спектрального излучения в соответствующих диапазонах.

Существует устойчивая взаимосвязь между NDVI и многими природными характеристиками – состояние и плотность растительности, продуктивность экосистем, их биомасса [Рязанова, Сорокин, 2017]. При этом, он достаточно чувствителен к изменениям погодных условий (объем осадков, количество приходящей солнечной радиации) и, как следствие, может быть индикатором степени увлажнения. Все это указывает на его пригодность для общего описания неоднородности растительного покрова и, более того, изменений ее состояния, что повышает информативность показателя для оценки пожарной опасности. При использовании космических снимков выбранных спутников для вычисления NDVI были использованы следующие каналы:

- Terra/Aqua – 1 (Red) и 2 (NIR), пространственное разрешение – 250 м;
- Sentinel-3 – 2 (Red) и 3 (NIR), 500 м;
- Landsat-8 – 4 (Red) и 5 (NIR), 30 м;
- Sentinel-2 – 4 (Red) и 8a (NIR), 10 м.

Температура поверхности – физическая характеристика, отражающая степень прогрева потенциальных проводников горения, и косвенно интерпретируемая как их готовность к возгоранию. Для предупреждения пожаров важно проследить текущие значения температур поверхности ($0...100^{\circ}\text{C}$), которые наблюдаются в спектральном диапазоне $10...13$ мкм. Как правило, значения спектрального отражения в каналах этого диапазона применяют при формировании продуктов 2-го уровня MODIS и SLSTR по температурным данным⁸. Тепловые изображения из этих продуктов включают в себя пространственные распределения температур в $^{\circ}\text{K}$, для перевода в $^{\circ}\text{C}$ необходимо выполнить смещение шкалы на $-273,15$.

На высокодетальном уровне (десятки м) съемка в тепловом диапазоне ведется только системой TIRS (Landsat-8), продукты которой поставляются в виде изображений спектрального отражения в каналах $10,3...12,5$ мкм. Для получения физических значений температуры была использована следующая формула¹:

$$T = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{B} + 1\right)} - 273,15^{\circ}\text{C},$$

где K_1 и K_2 – постоянные значения из метаданных, B – интенсивность излучения в тепловом канале.

Антропогенная нагрузка – показатель, характеризующий воздействие человека на природную среду, в данном случае, рассматривается его влияние на пожарную опасность территории. Закономерность ее проявления в общих чертах описывается следующим образом: чем выше вероятность нахождения человека как потенциального инициатора возгорания в точке, тем выше в ней вероятность возникновения пожара. Поэтому для ее оценки были выбраны два типа объектов, которые наиболее всего характеризуют присутствие человека в той или иной точке – населенные пункты и дороги. В качестве метрической характеристики было использовано расстояние от указанных объектов.

Населенные пункты как место постоянной локализации людей имеют большую значимость, чем дороги как место с переменным их присутствием. Для распределения весовых коэффициентов был использован способ ранжированной оценки, причем в связи с большей важностью населенных пунктов, значимости объектов измерялись порядками:

¹ Landsat Provisional Surface Temperature. Landsat Science Products. USGS. Электронный ресурс: <https://www.usgs.gov/core-science-systems/nli/landsat/landsat-provisional-surface-temperature> (дата обращения 16.04.2021).

населенные пункты – 10, дороги – 1. Следовательно, их весовые коэффициенты составили 0,91 и 0,09 соответственно. Для детализации вероятности нахождения человека категории населенных пунктов по численности населения и дорог по типу/классу также были проранжированы, для каждой из категорий в зависимости от значимости вычислен вес (табл. 2).

Исходя из вышеперечисленного, расчет распределения антропогенной нагрузки сводится к следующей последовательности операций:

1) расчет расстояния от каждой точки пространства (ячейки раstra в 10 м – разрешение наиболее космической системы – Sentinel-2), интерпретируемой как потенциальная точка возгорания, до ближайшего объекта – отдельно для населенных пунктов и отдельно для дорог в пределах Красноярского края;

2) растровое умножение полученных расстояний на веса из табл. 2;

3) взвешенное сложение полученных растров для населенных пунктов (вес 0,91) и дорог (0,09);

4) пересчет в относительные значения с масштабированием к диапазону [0, 1] путем деления значений всех ячеек раstra на максимальное значение раstra. Физически это значение должно достигаться в точке, наиболее удаленной с учетом весов от населенных пунктов и дорог. В итоге, антропогенная нагрузка будет стремиться к 0 в удаленных от указанных объектов точках, а 1 – в точках, наиболее близких к ним. Соответственно, пожарная опасность с точки зрения антропогенной составляющей будет минимальной в первом случае и максимальной – во втором.

Табл. 2. Весовые коэффициенты объектов при расчете антропогенной нагрузки
Table 2. Feature weights for man-made load calculation

Населённые пункты (0,91)			Дороги (0,09)		
Людность, тыс. чел	Знач-ть	Вес	Тип/класс	Знач-ть	Вес
более 1 000	6	0,29	Железные дороги (railways)	3	0,33
500...1 000	5	0,24	Автомобильные дороги: I класса (motorway, trunk, primary*)	3	0,33
100...500	4	0,19			
50...100	3	0,14			
10...50	2	0,09	II класса (secondary)	2	0,22
менее 10	1	0,05	III класса (tertiary)	1	0,12

* классы автомобильных дорог в соответствии с классификатором OSM⁷

Таким образом, все вышерассмотренные факторы и показатели пожарной опасности с учетом их особенностей можно разделить на две группы:

— *переменные* – NDVI и температура поверхности – обладают изменчивостью в течение суток и более крупных временных промежутков и вычисляются по регулярно поступающим данным;

— *постоянные* – антропогенная нагрузка – изменяются эпизодически и достаточно медленно (в задачах прогноза пожарной опасности можно считать их постоянными) и требуют обновления только по мере необходимости.

Такая классификация факторов и показателей представляет собой способ описания общей пожарной опасности. Её использование в основе синтезирования факторов в единую оценку пожарной опасности позволяет учитывать разностороннее влияние на формирование вероятности возгорания.

Интерпретация показателей пожарной опасности

Для предупреждения пожаров по значениям показателей опасности была исследована их связь с возгораемостью территории, которая представляет собой пространственную характеристику, выражающую готовность проводников горения к воспламенению на том или ином участке. Был использован коэффициент корреляции, который характеризует тесноту связи между явлениями А и В. При отсутствии знаний об истинной форме связи между показателями и возгораемостью предполагается, что она является линейной: чем выше NDVI и температура поверхности, тем выше вероятность возгорания. Расчёт коэффициента корреляции r выполняется по совокупности соответственных значений явлений А и В:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (a_i - M_a)(b_i - M_b)}{n\sigma_a\sigma_b},$$

где M_a и M_b – среднее арифметическое значений А и В соответственно, σ_a и σ_b – их среднеквадратические отклонения, n – число пространственно распределенных точек i , в которых были измерены значения a_i и b_i .

В качестве первого явления выступают переменные показатели NDVI и температура, а второго – возгораемость территории. Исходными точками для набора значений этих явлений были приняты термоточки 2016–2018 гг. (период функционирования выбранных спутников). Для повышения достоверности и уменьшения объема выборки с сохранением репрезентативности эта совокупность, которая составляет сотни тысяч точек в пределах Красноярского края, была обработана следующим образом:

- произведен отбор с применением информационных источников МЧС, Гринпис России и региональных центров мониторинга пожарной ситуации (Лесопожарный центр Красноярского края), то есть в последующем были использованы только те термоточки, которые были зафиксированы как пожары с помощью аэро- и наземных служб;
- в связи с исследованием возгораемости территории в конечную совокупность были включены только первые по времени точки пожаров, в то время как последующие не несут смысловой нагрузки для выявления прогнозных закономерностей.

В качестве численного выражения возгораемости была использована *условная вероятность возгорания*, аппроксимированная с помощью линейной функции, причем максимальное ее значение 100 % или 1 достигается в момент первого выявления пространственной точки пожара. *Пороговым значением*, когда условия для возгорания максимальны, принимается значение 90 %, которое фиксировалось за 2–4 дня в зависимости от наличия данных и градиента изменения показателя. Для исследования взаимосвязи на низкодетальном уровне с учетом высокого временного разрешения были использованы космические снимки MODIS и SLSTR за 7 дней до пожара, на высокодетальном – данные OLI/TIRS, MSI за 1 месяц (~два периода получения снимков Landsat-8 на одну и ту же территорию).

Для учета пространственной дифференциации физико-географических условий и факторов пожарной опасности взаимосвязь между показателями и вероятностью возгорания была исследована отдельно в пределах каждого лесного района в Красноярской области (см. рис. 1). Во временном отношении были установлены анализируемые промежутки, которые составили 1 месяц в течение пожароопасного сезона с достаточным количеством статистических данных (с апреля по октябрь).

В результате были получены *коэффициенты корреляции каждого переменного показателя с вероятностью возгорания*, а также зафиксированы их *пороговые значения при условной вероятности в 90 %* (табл. 3). Из двух проанализированных показателей наиболее ярко пожарную опасность характеризует температура (коэффициент корреляции от 0,75 до 0,93, детерминации ~0,56...0,86), тогда как NDVI имеет менее выраженную связь

($\sim 0,5 \dots 0,7$, $\sim 0,25 \dots 0,5$). Пороговые значения температуры растут с севера на юг в пространственном отношении, а во временном – увеличиваются с апреля по июль, затем убывают до октября. Такая закономерность учитывает сезонную изменчивость метеорологических параметров, которые влияют на факторы пожарной опасности, и свидетельствует об адаптивности выявленных значений.

Анализ корреляции между антропогенной нагрузкой и фактической возгораемостью территории был проведен с использованием всей совокупности термоточек MODIS за 2016-2018 годы. Это обеспечивает максимальную полноту данных при допустимой достоверности. В основу анализа был заложен следующий математический аппарат:

— пространство показателя было разделено на равные классы – 0,1 по значениям нагрузки;

— в пределах каждого класса была рассчитана *статистическая вероятность/частота случаев возгораний* (количество термоточек) – как и в случае с переменными показателями для учета пространственно-временной дифференциации явлений вычисления проводились в пределах лесных районов/степных зон за каждый месяц (см. табл. 3).

Влияние антропогенной нагрузки на возгораемость в пределах Красноярского края является различным в зависимости от особенностей лесного района и времени в который он действует. Однозначное воздействие антропогенной нагрузки на пожарную опасность прослеживается в густозаселенной южной части, а также в районе освоения нефтегазовых районов.

Табл. 3. Результаты исследования взаимосвязи показателей пожарной опасности с возгораемостью территории на примере Приангарского таежного района в апреле
Table 3. Correlation analysis results: fire danger indicators and flammability of the territory. Case study of the Priangarsky taiga region in April

Переменные факторы пожарной опасности						
Фактор	Показатель	Коэффициент корреляции (детерм.)		Пороговое значение		
		низкодет. уровень	высокодет. уровень	низкодет. уровень	высокодет. уровень	
Неоднородность раст. покрова	NDVI	0,59 (0,35)	0,62 (0,38)	0,31	0,31	
Температура поверхности	Радиояркость температура	0,85 (0,72)	0,86 (0,74)	13,6°C	13,5°C	
Постоянные факторы пожарной опасности						
Антропогенная нагрузка		0,5...0,6	0,6...0,7	0,7...0,8	0,8...0,9	0,9...1,0
Количество термоточек		41	100	182	406	314
Статистическая частота/ вес класса		0,04	0,10	0,17	0,39	0,30

На основе полученных данных (коэффициентов корреляции, пороговых значений и статистических вероятностей) показатели конвертируются в частные оценки пожарной опасности. Для обеспечения последующих расчетов показатели в собственных единицах измерения необходимо пересчитать в общий диапазон изменения вероятности возникновения пожаров – 0...1 или 0...100 %. Формулы пересчета также были установлены на основе результатов корреляционного анализа: для совокупности точек были построены

линии регрессии, уравнения которых выражают линейную связь между условной вероятностью возгорания и показателем пожарной опасности (рис. 2).

В общем виде уравнение преобразования записывается следующим образом:

$$Y = k \cdot X + b,$$

где Y – частная оценка пожарной опасности, X – значения показателя, выражающего фактор опасности, k и b – коэффициенты пересчета.

Учитывая, что анализ проводился для каждой пространственно-временной единицы, то коэффициенты в составе формул будут обладать как географической, так и сезонной изменчивостью. При объединении этих коэффициентов в пространстве и времени функция будет представлять дискретную пространственно-временную модель оценки пожарной опасности, единицами которой являются лесные районы в каждый месяц пожароопасного сезона.



Рис. 2. Порядок расчета частной оценки пожарной опасности (пример – Алтай-Саянский горнотаёжный лесной район в мае)

Fig. 2. Calculation of partial fire danger assessment (case study – Altai-Sayan mountain taiga forest region in May)

Сведение в общий показатель пожарной опасности

Общая оценка пожарной опасности представляет собой численный показатель, который также выражает вероятность возгорания, однако учитывает несколько наиболее информативных факторов. Порядок ее вычисления основывается на постепенной интеграции частных оценок переменной опасности (по температуре и NDVI) и статистических вероятностей по антропогенной нагрузке с помощью весовых функций. На самом высоком иерархическом уровне объединяются оценки переменных и постоянных факторов. Диапазоны значений частных оценок и статистических вероятностей совпадают, поэтому их веса зависят только от их информативности. Для определения весов был использован метод ранжированной оценки по значимости факторов: для переменных как наиболее информативных общий вес составил 0,67, а для постоянных – 0,33.

На следующем уровне были распределены веса внутри групп. Для переменных факторов вес был определен в зависимости от коэффициента их корреляции с возгораемостью: чем больше его значение, тем больше вес. Он рассчитывался как отношение коэффициента текущего показателя на сумму коэффициентов корреляции всех переменных факторов. Например, корреляция возгораемости с температурой в пределах Среднесибирского района притундровых лесов и редкостойной тайги за май составила 0,81, а с NDVI – 0,56; таким образом, вес температурного фактора будет 0,59, а неоднородности расти-

тельного покрова – 0,41. Внутри группы постоянных факторов антропогенная нагрузка является единственным показателем, поэтому его вес равен 1. Исходя из вышеописанного, запишем весовую функцию для расчета общей оценки пожарной опасности:

$$FireDanger = 0,67 \cdot \sum_{i=1}^n w_i X_i + 0,33 \sum_{j=1}^m v_j Z_j,$$

где X_i и Y_j – значения частных оценок переменных и постоянных факторов соответственно, w_i и v_j – их весовые коэффициенты, n и m – количество используемых факторов в пределах групп.

После вычисления общей оценки пожарной опасности ее значения в каждом пикселе изображения проверяются на превышение 0,9. При положительном результате координаты центра пикселя интерпретируются как местоположения потенциального возгорания.

Таким образом, в результате исследования пожарной опасности, влияющих на нее факторов и их изменчивости была разработана методика оценки пожарной опасности природных территорий (рис. 3).



Рис. 3. Последовательность этапов методики предупреждения природных пожаров
Fig. 3. Stages of natural fire prevention method

Ее преимущественным свойством является адаптивная применимость практически для любого участка в пределах лесных районов Красноярского края, что возможно благодаря учету пространственно-временной изменчивости факторов пожарной опасности и дифференциации условий возгорания на основе особенностей растительности как основного проводника горения.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Основным результатом исследования является методика предупреждения лесных пожаров на территории Красноярского края, обоснованная с учетом физико-географических условий и статистических данных. Как и ранее рассмотренные методы [Stergiopoulos et al., 2007; Marchi et al., 2007; Dong et al., 2005 и др.], текущая разработка также использует взвешенную оценку факторов пожарной опасности, выведенных с учетом особенностей возгорания на исследуемой территории. Однако главным отличием является ввод пространственных и временных единиц, которые позволяют учитывать изменчивость пожарных рисков, как по территории, так и в течение пожароопасного сезона путем изменения весов и пороговых значений показателей.

Для контроля эффективности методики было произведено ее тестирование задачей мониторинга небольших районов Красноярского края. При выборе тестовых районов основным критерием являлось разнообразие условий при небольшой площади отбираемых участков. Требование к минимальным размерам участков исходит из вычислительных возможностей: чем меньше район и больше разнообразие условий, тем более информативными будут результаты при минимальных вычислениях. В итоге, были выбраны Балахтинский, Новосёловский, Краснотурьинский и Идринский районы на юго-западе Красноярского края: с одной стороны, южные районы характеризуются большим

количеством возгораний и максимальной антропогенной нагрузкой, а с другой – выбранная территория лежит в пределах трех лесных районов – Среднесибирском подтаёжно-лесостепном, Алтае-Саянском горнотаежном и Алтае-Саянском горностепном.

Временным промежуток тестирования был выбран период с 1 апреля по 10 мая 2019 г., в пределах которого оценивалась пожарная опасность тестовых участков и были получены точки вероятных пожаров. Вместе с этим, контролировалась текущая пожароопасная ситуация с использованием достоверных источников пожарных данных (FIRMS, Космоснимки-Пожары, МЧС, Гринпис России, Лесопожарный центр Красноярского края). Проведем пространственно-временной анализ полученных результатов (рис. 4).



Рис. 4. Прогноз лесных пожаров на юге Красноярского края (1 апреля – 10 мая 2019 г.)
 Fig. 4. Forecast of forest fires in the south of the Krasnoyarsk region (April 1 – May 10, 2019)

На тестовом участке Красноярского края была получена 201 прогнозная точка, в то время как системами детектирования пожаров было выявлено 98 пожаров. На основе данных низкодетального уровня (SLSTR, MODIS) был предупреждён 51 пожар из 98, тогда как более детальные данные Landsat-8 и Sentinel-2 выдали прогноз на 60 правильных возгораний. В общей совокупности, было предупреждено 64 лесных пожара. Однако относительно общего количества спрогнозированных точек – более 200 – немногим более половины (116) совпали со случаями реальных возгораний. Наибольшее количество возгораний было выявлено с помощью общего показателя пожарной опасности – 58, 46 – с превышением температуры, и всего 12 – с помощью NDVI.

Общая достоверность прогноза (отношение числа предсказанных возгораний к числу всех возгораний) составила 65 %, а его надёжность (отношение числа потенциальных точек возгорания, совпавших с реальными, к числу всех точек прогноза) – 58 %. Однако в абсолютном количестве число ложных точек сопоставимо с количеством реальных случаев возгорания, что является недостатком пороговых значений показателей пожарной опасности. Также следует отметить, что использование данных различного уровня охвата и детализации повышает достоверность прогноза: пожары, не

спрогнозированные на одном уровне, могут быть предупреждены на другом. Таким образом, результаты тестирования показали успешную применимость методики как в техническом, так и в научно-методическом плане.

ВЫВОДЫ

- в основу методики предупреждения природных пожаров на примере лесов Красноярского края были заложены факторы пожарной опасности – температура поверхности, индекс NDVI и антропогенная нагрузка, которые были выделены как наиболее влияющие на условия возгорания в пределах рассматриваемой территории;
- несмотря на постоянство набора показателей пожарной опасности меняются их веса в зависимости от лесного района и месяца в течение пожароопасного сезона, что учитывает пространственно-временную изменчивость условий возгорания;
- комбинирование данных дистанционного зондирования с различными характеристиками (Terra/Aqua, Sentinel-2 и 3, Landsat-8), а также картографических слоев обеспечивает большой охват и высокую детальность результатов предупреждения пожаров, как следствие, возможность прогноза на региональном и локальном уровнях;
- аналитическая (частные показатели) и синтетическая (общие показатели) оценка пожарной опасности увеличивает достоверность и надежность предупреждения возгораний;
- репрезентативность Красноярского края с точки зрения условий возгорания является основанием для применения методики для других регионов России с некоторым уточнением весов показателей пожарной опасности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Рязанова Н.Е., Сорокин П.А.* Опыт применения дистанционного зондирования растительности при исследовании динамики экосистем российской Арктики. *Науки о Земле: вчера, сегодня, завтра. Материалы III Междунар. науч. конф.*, 2017. С. 7–12.
2. *Софронова А.В., Волокитина А.В.* Оценка природной пожарной опасности лесных участков на территории нефтегазовых комплексов с использованием данных дистанционного зондирования Земли. *Сибирский лесной журнал*, 2017. № 5. С. 84–94. DOI: 10.153 72/SJFS20170508.
3. *Сухинин А.И., Пономарев Е.И.* Картирование и краткосрочное прогнозирование пожарной опасности в лесах Восточной Сибири по спутниковым данным. *Сибирский экологический журнал*, 2003. Т. 10, № 6. С. 669–677.
4. *Фуряев В.В., Цветков П.А., Фуряев И.В., Злобина Л.П.* Условия возникновения и распространения пожаров в лесных районах Красноярского края. *Хвойные бореальной зоны*, 2017. Т. 35. № 1–2. С. 66–74.
5. *Amatulli G., Pérez-Cabello F., de la Riva J.* Mapping lightning/human-caused wildfires occurrence under ignition point location uncertainty. *Ecological Modelling*, 2007. V. 200. No 3. P. 321–333. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2006.08.001.
6. *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.
7. *Calabri G.* La Prevenzione degli Incendi Boschivi. I Problemi e le Tecniche della Difesa. Bologna: Edagricole, 1984.
8. *Chéret V., Denux J.P.* Analysis of MODIS NDVI Time Series to Calculate Indicators of Mediterranean Forest Fire Susceptibility. *GIScience & Remote Sensing*, 2011. V. 48. No 2. P. 171–194. DOI: 10.2747/1548-1603.48.2.171.

9. *Dong X., Li-min D., Guo-fan S., Lei T., Hui W.* Forest fire risk zone mapping from satellite images and GIS for Baihe Forestry Bureau. *Journal of Forestry Research*. Jilin, 2005. No 16. P. 169–174. DOI: 10.1007/BF02856809.
10. *Dowdy A.J., Mills A.G., Finkele K., de Groot W.* Australian fire weather as represented by the McArthur Forest Fire Danger Index and the Canadian Forest Fire Weather Index. CAWCR Technical Report, 2009. No 10. 91 p.
11. *Hirsch S.N., Kruckeberg R.F., Madden F.H.* The bi-spectral forest detection system. *Proceeding 7th International Symposium on Remote Sensing of Environment*. Ann Arbor, 1971. P. 2253–2259.
12. *Marchi E., Tesi E., Montorselli N.B.* 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.
13. *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.
14. *Rignot E., Way J.B., McDonald K., Viereck L., Williams C., Adams P., Payne C., Wood W., Shi J.* Monitoring of environmental conditions in taiga forests using ERS-1 SAR. *Remote Sensing of the Environment*, 1994. No 49. P. 145–154. DOI: 10.1016/0034-4257(94)90051-5.
15. *Rouse J.W., Haas R.H., Schell J.A., Deering D.W.* Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *Proceedings of the Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium*, 1974. No 1. P. 309–317.
16. *Skowronski N.S., Clark K.L., Duvencek M., Hom J.* Three-dimensional canopy fuel loading predicted using upward and downward sensing LiDAR systems. *Remote Sensing of Environment*, 2011. V. 115. P. 703–714. DOI: 10.1016/j.rse.2010.10.012.
17. *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.
18. *Verbesselt J., Somers B., Lhermite S., Jonckheere I., van Aardt J., Coppin P.* Monitoring herbaceous fuel moisture content with SPOT VEGETATION time-series for fire risk prediction in savanna ecosystems. *Remote Sensing of Environment*, 2007. No 108. P. 357–368. DOI: 10.1016/j.rse.2006.11.019.
19. *Yuan C., Zhang Y., Liu Z.* A survey on technologies for automatic forest fire monitoring, detection, and fighting using unmanned aerial vehicles and remote sensing techniques. *Canadian journal of forest research*, 2015. V. 45. No 7. P. 783–792. DOI: 10.1139/cjfr-2014-0347.

REFERENCES

1. *Amatulli G., Pérez-Cabello F., de la Riva J.* Mapping lightning/human-caused wildfires occurrence under ignition point location uncertainty. *Ecological Modelling*, 2007. V. 200. No 3. P. 321–333. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2006.08.001.
2. *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.
3. *Calabri G.* La Prevenzione degli Incendi Boschivi. I Problemi e le Tecniche della Difesa. Bologna: Edagricole, 1984.
4. *Chéret V., Denux J.P.* Analysis of MODIS NDVI Time Series to Calculate Indicators of Mediterranean Forest Fire Susceptibility. *GIScience & Remote Sensing*, 2011. V. 48. No 2. P. 171–194. DOI: 10.2747/1548-1603.48.2.171.

5. *Dong X., Li-min D., Guo-fan S., Lei T., Hui W.* Forest fire risk zone mapping from satellite images and GIS for Baihe Forestry Bureau. *Journal of Forestry Research*. Jilin, 2005. No 16. P. 169–174. DOI: 10.1007/BF02856809.
6. *Dowdy A.J., Mills A.G., Finkele K., de Groot W.* Australian fire weather as represented by the McArthur Forest Fire Danger Index and the Canadian Forest Fire Weather Index. CAWCR Technical Report, 2009. No 10. 91 p.
7. *Furjaev V.V., Cvetkov P.A., Furjaev I.V., Zlobina L.P.* Conditions of fire origin and spreading in forest regions of Krasnoyarsk krai. *Conifers of the boreal area*, 2017. V. 35. No 1–2. P. 66–74 (in Russian).
8. *Hirsch S.N., Kruckeberg R.F., Madden F.H.* The bi-spectral forest detection system. *Proceeding 7th International Symposium on Remote Sensing of Environment*. Ann Arbor, 1971. P. 2253–2259.
9. *Marchi E., Tesi E., Montorselli N.B.* 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.
10. *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.
11. *Rignot E., Way J.B., McDonald K., Viereck L., Williams C., Adams P., Payne C., Wood W., Shi J.* Monitoring of environmental conditions in taiga forests using ERS-1 SAR. *Remote Sensing of the Environment*, 1994. No 49. P. 145–154. DOI: 10.1016/0034-4257(94)90051-5.
12. *Rouse J.W., Haas R.H., Schell J.A., Deering D.W.* Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *Proceedings of the Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium*, 1974. No 1. P. 309–317.
13. *Rjazanova N. E., Sorokin P. A.* The experience of remote vegetation sensing application in the Russian Arctic Ecosystems dynamics study. *Earth sciences: yesterday, today, tomorrow*. *Proceeding of III International scientific conference*, 2017. P. 7–12 (in Russian).
14. *Skowronski N.S., Clark K.L., Duveneck M., Hom J.* Three-dimensional canopy fuel loading predicted using upward and downward sensing LiDAR systems. *Remote Sensing of Environment*, 2011. V. 115. P. 703–714. DOI: 10.1016/j.rse.2010.10.012.
15. *Sofronova A.V., Volokitina A.V.* Assessment of fire hazard for forest sites at the territory of oil and gas complexes using Earth remote sensing data. *Siberian Journal of Forest Science*, 2017. No 5. P. 84–94 (in Russian). DOI: 10.15372/SJFS20170508.
16. *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.
17. *Suhinin A.I., Ponomarev E.I.* Mapping and Short-Term Forecast of Fire Risk in the Forests of East Siberia according to Satellite Data. *Siberian Journal of Ecology*, 2003. V. 10. No 6. P. 669–677 (in Russian).
18. *Verbesselt J., Somers B., Lhermite S., Jonckheere I., van Aardt J., Coppin P.* Monitoring herbaceous fuel moisture content with SPOT VEGETATION time-series for fire risk prediction in savanna ecosystems. *Remote Sensing of Environment*, 2007. No 108. P. 357–368. DOI: 10.1016/j.rse.2006.11.019.
19. *Yuan C., Zhang Y., Liu Z.* A survey on technologies for automatic forest fire monitoring, detection, and fighting using unmanned aerial vehicles and remote sensing techniques. *Canadian journal of forest research*, 2015. V. 45. No 7. P. 783–792. DOI: 10.1139/cjfr-2014-0347.