

**КАРТОГРАФИЯ И ГЕОИНФОРМАТИКА**

УДК 911.6:51-71

**А.И. Пономарчук, С.В. Пьянков****ОЦЕНКА ДИСКРИМИНИРУЮЩЕГО ВЛИЯНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ФАКТОРОВ НА РИСКИ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ\****Пермский государственный национальный исследовательский университет, г. Пермь*

Ежегодные потери вследствие лесных пожаров значительны и могут достигать катастрофических масштабов в условиях труднодоступности, отсутствия развитой инфраструктуры и малой населенности территорий. Важно оценивать и выделять территории, наиболее пожароопасные вследствие совокупности природных и антропогенных факторов. Риски лесных пожаров определяются общими стационарными (характеристики природно-ландшафтных комплексов, климата, водного баланса, антропогенной активности и т.п.) и переменными (межгодовая и внутрисезонная изменчивость) условиями. Между условиями (факторами) и рисками возгораний могут существовать взаимосвязи, выявление которых позволяет получать обоснованные прогнозы уровня пожарной опасности. Задача заключается в статистически-обоснованном отборе ключевых (наиболее значимых, т.е. оказывающих наибольшее дискриминирующее влияние на уровень пожарной опасности) факторов и получении полуэмпирических соотношений для оценки рисков возгораний. Представлен метод, обеспечивающий выделение пространственно-распределенных факторов и их значений, соответствующих наибольшим рискам лесной пожарной опасности. В качестве меры пожарной опасности используется относительная частотность возгораний при разных условиях, полученная на основе фактов о лесных пожарах за пятилетний период наблюдений в Пермском крае. Предложенный метод ранжирования факторов по степени пожарной опасности обоснован применением вероятностно-статистических моделей. Сопоставление критических значений факторов с их пространственным распределением обеспечивает процедуру зонирования территории по степени лесной пожарной опасности. Метод иллюстрируется на примере стационарных факторов «виды лесной растительности» и «наличие густого леса», однако к ключевым факторам отнесен только первый из них. В работе использована карта пространственного распределения видов лесной растительности, полученная на основе дешифрирования данных MODIS.

Ключевые слова: лесные пожары, детектирование пожаров, уровень лесной пожарной опасности, районирование, ключевые факторы, частотность пожаров.

**A.I. Ponomarchuk, S.V. Pyankov****EVALUATION OF THE DISCRIMINATING IMPACT OF SPATIAL FACTORS ON FOREST FIRE RISKS***Perm State University, Perm*

Annual losses due to forest fires are considerable and may be catastrophic, especially in regions difficult to access, characterized by lack of infrastructure and underpopulation. It is important to learn how to evaluate and allocate the most fire-prone territories based on the combination of natural and anthropogenic factors. Risks of forest fires are determined by stationary (characteristics of natural landscapes, climate, water balance, anthropogenic activity, etc.) and non-stationary (year and seasonal variability) conditions. Certain mathematical relationships may exist between the conditions (factors) and the risk of fire, and determination of those relationships would provide reasonable forecasts of the fire danger. Thus, the goal is to obtain a statistically-based selection of the key (most important, having the greatest discriminating impact on the fire risk level) factors and to figure out the semi-empirical relations to estimate the risk of fire. We present the method which provides allocation of spatially distributed factors and their values corresponding to the highest risk of forest fire danger. Relative frequency of fires under different conditions is used as a

measure of fire danger; the corresponding data were obtained from observation of forest fires in the Perm region over a five-year period. The proposed method of ranking key factors by the fire risk degree has been justified by applying probabilistic and statistical models. Comparison of the critical values of the factors and their spatial distribution provides a procedure for zoning forest territory by the fire risk degree. The method is illustrated by the example of stationary factors «types of forest vegetation» and «presence of dense forest», as a result only the first one was identified as the key factor. In the course of research, a map of the forest vegetation types obtained from the MODIS data was used.

Key words: forest fires, fire detection, forest fire danger level, key factors, frequency of fires.

doi 10.17072/2079-7877-2016-4-118-128

### Введение

Лесные пожары (далее – ЛП) наносят значительный урон природе и хозяйственной деятельности, что стимулирует разработку методов их своевременного обнаружения, а также организацию мероприятий по предупреждению пожарной опасности и уменьшению последствий случившихся пожаров. В настоящее время значительная часть территорий не обеспечена средствами гарантированного обнаружения возгораний (лесной пожарной опасности, далее – ЛПО) на ранних стадиях: как правило, пожаротушение проводится уже в фазе активного горения, поскольку средства космического мониторинга ЛПО ограничены низким пространственным разрешением спутниковых систем, то невозможно обеспечить надежное детектирование пожаров на ранних стадиях. В условиях густой и высокой лесной растительности, преобладающей в лесном фонде Российской Федерации, «чувствительность» этих методов еще ниже. Анализ эффективности спутникового мониторинга по РФ в целом [5], по Мурманской [9] и Томской [1] областям, по Пермскому краю [8] показывает, что для территорий с густой и высокой лесной растительностью отношение числа детектированных и подтвержденных ЛП к общему числу зарегистрированных ЛП составляет не более 4 – 15%. Для повышения чувствительности методов детектирования пожаров на основе данных спектрорадиометра MODIS [14] использован алгоритм детектирования пожаров с параметрами, адаптированными к условиям густых высоких лесов [7]. Данный подход повышает чувствительность детектирования, но одновременно увеличивает количество «ложных» пожаров.

Наземные средства наблюдения могут обеспечить раннее обнаружение пожаров только при плотности размещения датчиков, достаточной для наблюдения всей территории. Так, при использовании системы «Лесной дозор» (видеокамеры и тепловизионные датчики на вышках, анализ и автоматическое распознавание дыма и пламени [12], радиус наблюдения вышки около 30 км) для покрытия территории типичного субъекта федерации потребуются десятки вышек. Решение проблемы требует выборочного создания наземных систем только на особо пожароопасных территориях с аномально высокой частотой возгораний на единицу площади. Выявление таких территорий может быть выполнено на основе анализа статистики лесных пожаров с учетом действующих природных и антропогенных факторов.

На практике принято выделять две обобщенные характеристики влияния на вероятность возникновения ЛП: а) класс пожарной опасности по условиям погоды (определяется по значению соответствующего комплексного показателя В.Г. Нестерова) и б) класс пожарной опасности лесных участков (определяется на основе преобладающего породного состава). Показатель по условиям погоды рассчитывается на каждый день и зависит как от общей засушливости пожароопасного сезона, так и от погодных колебаний (количество осадков и число дней после последнего дождя). Существует целый ряд аналогичных показателей, оценивающих степень горимости в зависимости от запаса (сухих) лесных горючих материалов [6]. Для зонирования территории по степени пожарной опасности особенно важны *стационарные* факторы, сохраняющиеся на протяжении нескольких пожароопасных сезонов, в частности, фактор «тип леса» в детерминированно-вероятностной модели определения ЛПО [2].

Первостепенное значение имеет наличие *достоверных карт*, отражающих пространственные распределения исследуемых факторов. Перспективным источником являются результаты дешифрирования данных дистанционного зондирования Земли (далее – ДЗЗ), в частности, классификация типов растительного покрова с помощью спутниковых данных [3; 13].

В настоящей работе даются формулировка и вероятностно-статистическое обоснование метода, обеспечивающего выявление статистически значимых пространственно-распределенных факторов, в наибольшей степени влияющих на возникновение лесных пожаров. Их значения используются для

ранжирования территории лесного фонда по степени пожарной опасности и последующего районирования. Применимость подхода иллюстрируется на примере исследования статистической зависимости ЛПО от фактора «виды лесной растительности», выполненного на основе фактических данных о лесных пожарах на территории Пермского края за период 2010-2014 гг. Источником пространственного распределения указанного фактора являются классы лесной растительности, полученные путем обработки данных MODIS по территории Пермского края [10].

### Вероятностная модель возгораний

С формальной точки зрения цель работы – это установление статистической зависимости вероятности случайного события (возникновение лесного пожара) от сопутствующих условий на местности: пространственно-временных факторов природного и антропогенного происхождения. Для каждого из таких факторов следует: а) установить наличие или отсутствие статистически значимого влияния на вероятность ЛПО; б) оценить степень этого влияния в измеримых величинах. Последнее означает возможность ранжирования факторов по степени их влияния на уровень ЛПО.

Под термином «возникновение лесного пожара» будет пониматься факт возгорания безотносительно к длительности, его интенсивности и т.п. Примем, что совокупность анализируемых факторов  $C = (C_1, C_2, \dots, C_N)$  представляет собой комплекс условий, генерирующих пожары (события  $H$ ) с некоторой *интенсивностью*. Факторы будем соотносить с их числовыми значениями  $x_i$ , а интенсивность – с количеством возгораний  $F$ , происходящих на территории с площадью  $\delta S$  в течение периода времени  $\delta T$ . Значение любого фактора является статистической величиной в силу того, что это результат осреднения по пространственно-временному интервалу  $\delta \Omega = \delta S \cdot \delta T$ <sup>1</sup>. Примем, что области значений  $x_i$  факторов можно свести к конечным множествам из  $L_i$  дискретных значений, или *уровней фактора*<sup>2</sup>:  $x_i \in \{x_{ij(i)}\}$ ,  $j(i) = 1, 2, \dots, L_i$ . Факт возгорания в пространственно-временном интервале рассматривается как случайное событие  $H$ , произошедшее под влиянием совокупности условий, описываемых уровнями факторов  $x_i$ , а количество возгораний является функцией  $F = F(x_1, x_2, \dots, x_N)$  с общим числом уровней  $L = L_1 L_2 \dots L_N$ . Совокупность условий образует полную систему событий в том смысле, что любому событию  $H$  соответствует одна и только одна комбинация значений  $(x_1, x_2, \dots, x_N)$ ; это же верно и для совокупности уровней каждого отдельного фактора. Зависимость интенсивности возгораний от распределенных в пространстве и времени величин переходит в зависимость от уровней факторов, в результате чего вся задача сводится к многофакторному анализу [11].

Возьмем пространственно-временной интервал  $\delta \Omega$  с соответствующей ему совокупностью условий  $(x_1, x_2, \dots, x_N)$  и проведем испытание, заключающееся в фиксации события «возгорание произошло» или «возгорание не произошло». Это испытание Бернулли [4], в котором благоприятному исходу («возгорание произошло») соответствует значение случайной величины  $F = 1$  и вероятность  $p$ , а «неблагоприятному» исходу – значение  $F = 0$  и вероятность  $1 - p = q$ , что дает соответствующий закон распределения с единственным параметром  $p = p(x_1, x_2, \dots, x_N)$ . При  $n$ -кратном повторении условий<sup>3</sup> имеет место биномиальное распределение  $p_F(k; p, n)$  с параметрами  $p, n$ , определяющее вероятность того, что в серии из  $n$  испытаний будет  $k$

<sup>1</sup> Например, значение фактора «порода лесной растительности» определяется по доминирующему виду и присваивается всему участку (выделу или кварталу). Величина  $\delta \Omega$  является интервалом дискретизации.

<sup>2</sup> Это вполне соответствует реальной практике регистрации условий возникновения пожаров, когда даже для непрерывных величин (например, комплексный показатель пожарной опасности) принято вводить классы или категории (пожарной опасности) и фиксировать именно их.

<sup>3</sup> Здесь также предполагается независимость последовательных испытаний. Это следует из предположения о том, что возгорания на одном и том же пространственном интервале  $\delta S$  происходят редко и влиянием предыдущего возгорания на последующее можно пренебречь.

благоприятных исходов (возгораний). Параметр  $n$  может меняться в значительных пределах, в зависимости от числа реализаций соответствующей совокупности условий  $(x_1, x_2, \dots, x_N)$  для выбранного интервала дискретизации  $\delta\Omega$ . При выполнении условий  $n \ll 1$ ,  $np = \lambda < A$ , где  $A$  – ограниченное число, биномиальное распределение сводится к своему предельному случаю – распределению Пуассона  $p_F(k; p, n)$ . Распределение Пуассона описывает статистику возгораний в стационарных условиях. В этом случае среднее ожидаемое число возгораний пропорционально длительности периода наблюдений  $T$  и некоторому коэффициенту  $\alpha$ , определяющему частоту возгораний на пространственном интервале  $\delta S$ . Соотношения между ними определяются предельным переходом при выполнении указанных выше условий:  $E[F] = np \rightarrow \lambda = \alpha T$ .

### Факторы влияния и целевая функция

Ранжирование лесных участков по степени пожарной опасности зависит от множества природных и антропогенных факторов, являющихся функциями пространственных (при учете стационарных факторов) и/или пространственно-временных координат. К стационарным факторам и их комбинациям можно отнести породный и возрастной состав леса, тип почвы, доминирующие гидрометеорологические условия и т.п. К нестационарным относятся: уровень осадков, грозовая активность, температура подстилающей поверхности, комплексные показатели пожарной опасности и т.п.

Предполагается, что указанные выше факторы влияют на степень пожарной опасности, а сама эта степень характеризуется вероятностью возгорания, соотнесенной с единицей площади и интервалом времени. В свою очередь, вероятность возгорания оценивается по частотности возникновения пожаров, зарегистрированных противопожарными службами.

Сделаем ряд формальных утверждений. Вероятность возгорания при условии  $C_{ij}$  (фактор  $C_i$ , значение фактора  $x_{ij}$ ) имеет вид вероятности сложного события

$$P(H \cap C_{ij}) = P(H)P(C_{ij}|H) = P(C_{ij})P(H|C_{ij}), \quad (1)$$

где  $P(C_{ij})$  – вероятность реализации  $C_{ij}$ ,  $P(C_{ij}|H)$  – вероятность того, что уже случившееся возгорание произошло при условии  $C_{ij}$ ,  $P(H)$  – общая вероятность возгорания (при любых значениях фактора  $C_i$ ). В терминах байесовского подхода величины  $P(C_{ij})$  и  $P(C_{ij}|H)$  называют априорной и апостериорной вероятностями. В силу отмеченной выше полноты

$$\sum_{j=1}^{L_i} P(C_{ij}) = 1, \quad \sum_{j=1}^{L_i} P(C_{ij}|H) = 1, \quad i = 1, 2, \dots, N. \quad (2)$$

Очевидно, что для случайных величин  $F_{ij}$  (значение – число возгораний при условии  $C_{ij}$ ) имеет место условие

$$\sum_{j=1}^{L_i} F_{ij} = F, \quad i = 1, 2, \dots, N. \quad (3)$$

Интенсивность возгораний при данных условиях, случившихся в интервале наблюдений  $\delta\Omega$ , пропорциональна апостериорной вероятности, а оценка последней – отношению выборочных значений случайных величин  $F_{ij}$  и  $F$ :

$$P(C_{ij}|H) = p_{ij} \approx \frac{f_{ij}}{f}. \quad (4)$$

При отсутствии влияния фактора на ЛПО отношение (4) равно просто доле распространенности фактора  $P(C_{ij})$ . Введем относительную интенсивность возгораний

$$I_{ij} = \frac{P(C_{ij}|H)}{P(C_{ij})} = \frac{P(H|C_{ij})}{P(H)} = \frac{P(H \cap C_{ij})}{P(H)P(C_{ij})}, \quad (5)$$

которая уже не зависит ни от доли распространенности фактора, ни от общей пожароопасности сезона, выражаемой вероятностью  $P(H)$ . Это позволяет использовать  $I_{ij}$  в качестве величины, дискриминирующей ЛПО по уровням фактора  $x_{ij}$ . Если фактор не влияет на ЛПО, то величина относительной интенсивности равна единице; соответствие наблюдаемой выборки  $I_{ij}$  этому случаю рассматриваем как *нулевую гипотезу*, опровержение которой означает подтверждение зависимости ЛПО от фактора  $C_i$ . В свою очередь, величина отклонения от нулевой гипотезы дает естественную меру дискриминирования ЛПО по уровням фактора. Соотношение (5) позволяет также получать прогнозные оценки вероятности возгорания  $P(H|C_{ij})$  в ареале распространения  $C_{ij}$ , исходя из наблюдаемой частотности и общей пожароопасности сезона. Этот подход близок к байесовским методам, применяемым в задачах экологии и в смежных областях [15-16].

#### Статистическая оценка степени влияния фактора

Для упрощения выкладок в данном подразделе рассматривается единственный фактор  $C$  с уровнями  $j = 1, 2, \dots, L$ , а его влияние оценивается по  $N$  выборкам, соответствующим периодам наблюдений  $T_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, N$  (например, пожароопасным сезонам). Элементами анализа являются случайные значения  $x_{ij}$ , сопоставимые с относительной интенсивностью возгораний (5) и вычисляемые согласно

$$x_{ij} = \frac{\tilde{x}_j f_{ij}}{f_i} = \frac{1}{P(C_j)} \frac{f_{ij}}{f_i} \approx I_{ij}, \quad \tilde{x}_j = \frac{1}{P(C_j)}, \quad (6)$$

со средними для каждого уровня фактора:

$$\bar{x}_j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{ij} \approx \bar{I}_j. \quad (7)$$

Предположим, что за счет совокупного действия множества неучтенных случайных причин значения  $x_{ij}$  могут быть представлены суммами двух слагаемых – неслучайных воздействий фактора и независимых случайных величин, распределенных по нормальному закону с одинаковой дисперсией  $\sigma^2$ . Это позволяет применить методы однофакторного дисперсионного анализа [11] для оценки степени отклонения наблюдаемого распределения от нулевой гипотезы (распределение однородно по пространству) на основе сравнения дисперсий. Для общего случая (без предположений о виде распределения относительно уровня фактора) оценка дисперсии имеет вид

$$\sigma_*^2 = \frac{1}{NL - L} \sum_{j=1}^L \sum_{i=1}^N (x_{ij} - \bar{x}_j)^2 \quad (8)$$

с числом степеней свободы  $NL - L$ , определяемым числом случайных значений за вычетом связей вида (7). Распределение данной величины определяется через распределение Пирсона (хи-квадрат) с соответствующим числом степеней свободы:  $\sigma_*^2 \chi_{NL-L}^2$ . В случае нулевой гипотезы средние по уровням фактора нормально распределены относительно общего среднего  $\bar{x}$  с дисперсией  $\sigma_*^2/N$ . Соответствующая оценка дисперсии для нулевой гипотезы с числом степеней свободы  $L - 1$  принимает следующий вид:

$$\sigma_0^2 = \frac{N}{L - 1} \sum_{j=1}^L (\bar{x}_j - \bar{x})^2, \quad \bar{x} = \frac{1}{L} \sum_{j=1}^L \bar{x}_j \approx \bar{I}, \quad (9)$$

а ее распределение равно  $\sigma_0^2 \chi_{L-1}^2$ . Частное от деления дисперсий

$$F_* = \frac{\sigma_0^2}{\sigma_*^2} = \frac{\frac{N}{L - 1} \sum_{j=1}^L (\bar{x}_j - \bar{x})^2}{\frac{1}{NL - L} \sum_{j=1}^L \sum_{i=1}^N (x_{ij} - \bar{x}_j)^2} \quad (10)$$

дает выборочное значение случайной величины  $\xi$ , имеющей распределение Фишера ( $F$ -распределение) с соответствующими числами степеней свободы:

$$F(F_*, n, m) = P(\xi \leq F_*; n, m), \quad n = L - 1, \quad m = NL - L. \quad (11)$$

Значение  $F_*$  дает отношение межгрупповой и внутригрупповой изменчивости, характеризующее отклонение от нулевой гипотезы. При выполнении условия

$$P(\xi \geq F_*) < \alpha \quad (12)$$

нулевую гипотезу следует отвергнуть на уровне значимости  $\alpha$ , что в свою очередь указывает на наличие статистической зависимости относительной интенсивности возгораний от данного фактора. В качестве меры дискриминирования (ранжирования) ЛПО по различным факторам уместно использовать вероятностные оценки функции  $F$ -распределения, вычисленные по значениям  $F_*$  с соответствующими степенями свободы.

#### Анализ влияния на примере двух стационарных факторов

В качестве иллюстрации изложенного подхода рассмотрим сравнительное влияние двух стационарных факторов «вид лесной растительности» и «наличие густого леса». Первый фактор использует классификацию участков всей территории по 16 категориям и включает 14 видов лесной растительности (табл. 1), класс безлесных территорий и класс водной поверхности [10]; последние два класса в статистическом оценивании не используются. Фактор «наличие густого леса» учитывает возможность детектирования возгораний с помощью спутникового мониторинга и включает только две категории – «леса густые высокие» (при этом обнаружение ЛПО на начальной стадии «низовой пожар» максимально затруднено) и «все остальное». Статистические данные по пяти пожароопасным сезонам в период 2010–2014 гг. отнесены к участкам территорий (таксонам) по уровням факторов и

сведены в табл. 2 и 3, где колонка «средняя относительная интенсивность» рассчитана как среднее от годовых значений, оцененных согласно (7).

Таблица 1

## Категории фактора «вид растительности»

Номер категории	Наименование категории
1	Густые горные темнохвойные леса (пихта, кедр, ель)
2	Темнохвойные леса спелые и перестойные (ель, пихта, часто кедр)
3	Приспевающие и спелые темнохвойные леса (ель, пихта)
4	Спелые и перестойные сосновые леса
5	Сосновые леса спелые и приспевающие
6	Смешанные хвойно-мелколиственные леса с преобладанием темнохвойных пород в 1-м ярусе
7	Смешанные хвойно-мелколиственные леса с преобладанием сосны и присутствием темнохвойных пород в 1-м ярусе
8	Смешанные хвойно-мелколиственные леса с преобладанием лиственных пород и присутствием темнохвойных пород во 2-м ярусе
9	Смешанные хвойно-мелколиственные леса с преобладанием лиственных пород и присутствием темнохвойных пород во 2-3-м ярусе и подросте
10	Лиственные спелые и приспевающие леса с обильно развитым хвойным подростом
11	Разреженные молодые сосновые леса и смешанные мелколиственно-сосновые разреженные насаждения
12	Лиственные молодые и приспевающие леса, часто разреженные
13	Средне-низкобонитетные или молодые лиственные древесные и кустарниковые насаждения, часто разреженные
14	Редкие древесно-кустарниковые насаждения с примесью сухостебельного высокотравья на вырубках, бросовых землях и участках остепнения

Таблица 2

## Влияние фактора «вид растительности»

Уровень фактора	Доля площади таксона, %	Количество возгораний					Средняя относительная интенсивность
		2010	2011	2012	2013	2014	
1	1,41	4	2	0	1	0	0,450
2	2,92	6	2	2	3	1	0,601
3	4,97	13	6	1	9	3	0,707
4	<b>0,79</b>	<b>13</b>	<b>4</b>	<b>4</b>	<b>8</b>	<b>4</b>	<b>5,305</b>
5	<b>3,36</b>	<b>42</b>	<b>11</b>	<b>11</b>	<b>21</b>	<b>18</b>	<b>3,989</b>
6	15,62	66	26	13	41	12	1,173
7	4,99	23	9	3	11	6	1,204
8	13,44	26	8	2	28	5	0,537
9	11,18	14	12	2	5	3	0,399
10	9,72	9	6	3	2	1	0,279
11	<b>1,92</b>	<b>17</b>	<b>8</b>	<b>3</b>	<b>16</b>	<b>5</b>	<b>3,010</b>
12	13,43	41	21	15	20	18	1,184
13	7,80	22	9	2	10	5	0,684
14	8,44	40	11	8	24	9	1,272
	<b>100,00</b>	<b>336</b>	<b>135</b>	<b>69</b>	<b>199</b>	<b>90</b>	<b>20,794</b>

Таблица 3

Влияние фактора «наличие густого леса»

Уровень фактора	Доля площади таксона, %	Количество возгораний					Средняя относительная интенсивность
		2010	2011	2012	2013	2014	
1	75,48	329	125	64	183	86	1,017
2	24,52	82	63	16	51	23	0,949
	<b>100,00</b>	<b>411</b>	<b>188</b>	<b>80</b>	<b>234</b>	<b>109</b>	<b>1,966</b>

Наибольшая степень ЛПО по первому фактору соответствует таксонам 4, 5, 11. При суммарной доле площади 4,93% они обеспечивают 17,9% всех возгораний. Для второго фактора значения средней относительной интенсивности практически одинаковы, что говорит об отсутствии выраженной зависимости степени ЛПО. Заметим, что в этом случае сумма относительных интенсивностей близка к числу уровней фактора.

Количественная оценка мер дискриминирования согласно предложенной методике дает наблюдаемые значения  $F_* = 32,76$  и  $0,374$ , что, с учетом степеней свободы, соответствует уровням значимости  $2 \cdot 10^{-21}$  и  $0,56$ . Это значения, на которых отвергается «нулевая гипотеза», в частности, последняя оценка показывает, что выводы о зависимости или независимости ЛПО от второго фактора почти равновероятны.

Результаты выполненного пространственного анализа по фактору «вид лесной растительности» представлены ниже в виде карт. На рис. 1 слева показано районирование территории по уровням ЛПО с выделением безлесных территорий и водных объектов, справа отмечены все лесные пожары, зарегистрированные в период 2010–2014 гг. Таксоны объединены в три группы по уровням ЛПО (высокий, средний, низкий) методом «естественных границ», т.е. границам групп отвечают резкие изменения относительной интенсивности.

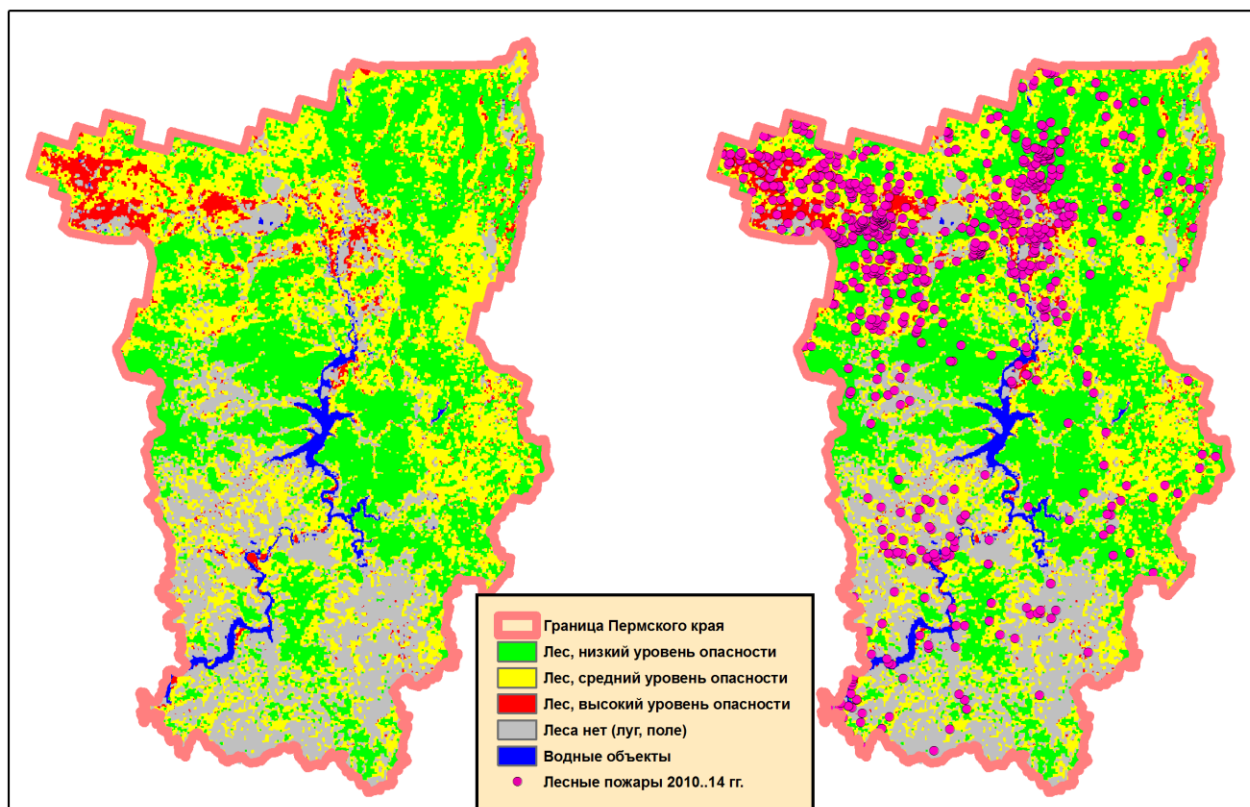


Рис. 1. Районирование территории Пермского края по уровням лесной пожарной опасности

Территории с высоким уровнем ЛПО соответствуют 6,1% всей площади и 22,3% возгораний, со средним уровнем соответственно 50,3 и 42,5%, с низким – 27,4 и 51,4%. Для большей наглядности



показан северо-западный фрагмент территории Пермского края с отдельным отображением лесных пожаров, случившихся в зоне повышенной (объединяет высокий и средний уровни ЛПО; см. рис. 2 слева) и пониженной (низкий уровень ЛПО, безлесные территории и водные объекты; см. рис. 2 справа) пожарной опасности.

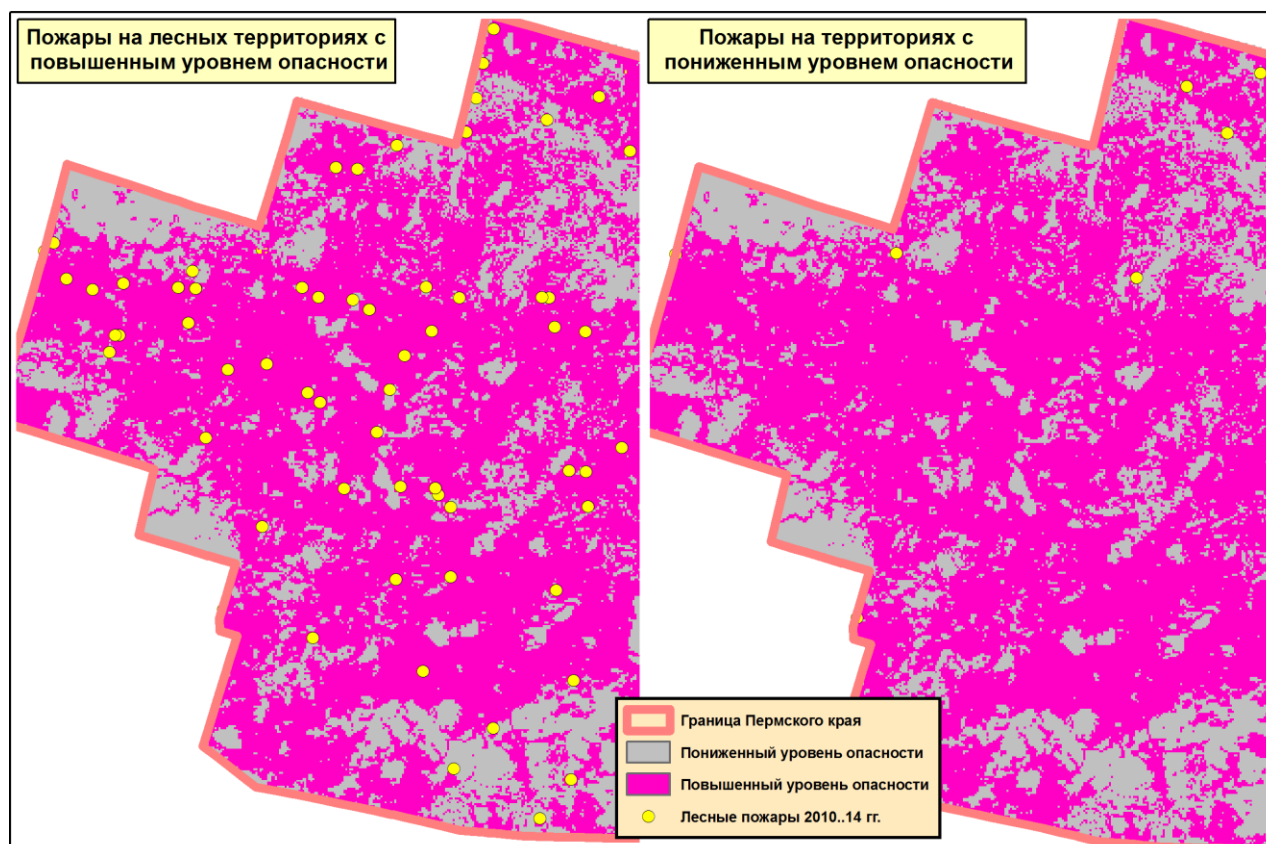


Рис.2. Фрагмент: лесные пожары на территориях с повышенным и пониженным уровнями ЛПО

### Заключение

В настоящей работе представлен подход к вероятностно-статистическому анализу зависимости степени ЛПО (наблюдаемой частотности возгораний) от стационарных и меняющихся во времени пространственно-распределенных факторов природного и/или антропогенного происхождения. Предложенные соотношения обуславливают способ выявления наиболее значимых, т.е. наиболее дискриминирующих факторов. Влияние уровней выделенного фактора оценивается по значению относительной интенсивности возгораний, характеризующей долю возгораний под воздействием того или иного значения фактора без учета его распространенности. Выбор наиболее дискриминирующих факторов и наиболее опасных уровней факторов основан на статистически обоснованных оценках.

Применение предложенного подхода проиллюстрировано на примерах, представляющих два крайних случая: первый показывает выраженную зависимость ЛПО от фактора «вид лесной растительности», второй («наличие густого леса») обнаруживает отсутствие статистически значимой зависимости.

### Библиографический список

1. Афонин С.В., Белов В.В., Энгель М.В. Анализ региональных спутниковых данных MODIS PRODUCTS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2005. Т. 2. №2. С. 336–342.
2. Барановский Н.В., Янкович Е.П. Методические и технические основы использования данных наземной таксации лесных массивов в целях количественной оценки лесной пожарной опасности // Экологические системы и приборы. 2014. №3. С. 3–12.
3. Барталев С.А., Егоров В.А., Ершов Д.В., Исаев А.С., Луян Е.А., Плотников Д.Е., Уваров И.А. Спутниковое картографирование растительного покрова России по данным спектрорадиометра

MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. №4. С. 285–302.

4. Венцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория вероятностей и ее инженерные приложения: учеб. пособие для вузов. М.: Академия, 2003. 464 с..

5. Галеев А.А., Котельников Р.В., Крашенинникова Ю.С., Лупян Е.А., Сементин В.Л., Флитман Е.В., Щербенко Е.В. Сопоставление информации о лесных пожарах по данным спутниковых, наземных и авиационных наблюдений ИСДМ-Рослесхоз // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2008. Т. 5. №2. С. 458–468.

6. Губенко И.М., Рубинштейн К.Г. Сравнительный анализ методов расчета индексов пожарной опасности // Гидрометеорологические прогнозы: тр. Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. 2012. Вып. 347. С. 180–193.

7. Пономарчук А.И. Оптимизация параметров контекстуального алгоритма при детектировании лесных пожаров с использованием данных дистанционного зондирования Земли // Современные проблемы науки и образования. 2013. №1. URL: <http://www.science-education.ru/107-8220> (дата обращения: 16.07.2015).

8. Пономарчук А.И., Шихов А.Н. Детектирование лесных пожаров в Пермском крае с использованием данных дистанционного зондирования Земли // Геоинформационное обеспечение пространственного развития Пермского края: сб. науч. тр. / Перм. гос. ун-т. Пермь, 2011. Вып. 4. С. 15–24.

9. Рыбчак Н.В., Утробин М.Г. Анализ лесопожарной обстановки на территории Мурманской области в 2010 г. с использованием спутниковой информации // Земля из Космоса – наиболее эффективные решения. 2010. №7. С. 60–66.

10. Сухова О.В. Создание карты лесной растительности для моделирования снегонакопления на территории Пермского края // Вестник Удмуртского университета. Сер. Биология. Науки о Земле. 2013. №4. С. 132–139.

11. Тюрин Ю.Н., Макаров А.А. Анализ данных на компьютере / под ред. В.Э. Фигурнова. М.: ИНФРА-М, 2002. 528 с.

12. Шишалов И.С., Пыпина О.И. «Лесной Дозор» — эффективная система раннего обнаружения лесных пожаров // Лесной бюллетень. 2010. №1(39). С. 8–12.

13. Di Gregorio, A. Land Cover Classification System: Classification Concepts and User Manual: LCCS. Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2005. 190 p.

14. Giglio, L. Detection, evaluation, and analysis of global fire activity using MODIS data: Dissertation on degree Doctor of Philosophy, University of Maryland, 2006. UMI Number: 3212607, 247 pp.

15. McCarthy M.A. Bayesian Methods for Ecology. Cambridge University Press, 2007, 310 p.

16. Zuur A.F., Ieno E.N., Smith G.M. Analysing Ecological Data. Springer New York, 2007, 685 p.

### References

1. Afonin, S.V., Belov, V.V., and Engel', M.V. (2005), “Analysis of the Regional Satellite Data MODIS PRODUCTS” *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, Vol. 2, No. 2, pp. 336–342.

2. Baranovskiy, N.V. (2014), and Yankovich, E.P. “Methodical and Technical Basis of Use of Forest Inventory for Quantifying the Forest Fire Danger”, *Ekologicheskie sistemy i pribory*, No. 3, pp. 3–12.

3. Bartalev, S.A., Egorov, V.A., Ershov, D.V., Isaev, A.S., Lupyan, E.A., Plotnikov, D.E., and Uvarov, I.A., (2011), “Satellite Mapping of Vegetation on the Russian Territory by MODIS Spectroradiometer Data”, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, Vol. 8, No. 4, pp. 285–302.

4. Venttsel', E.S., and Ovcharov, L.A. (2003), “*Teoriya veroyatnostey i ee inzhenernye prilozheniya*” [Probability Theory and its Engineering Applications], Moscow, Russia.

5. Galeev, A.A., Kotel'nikov, R.V., Krasheninnikova, Yu.S., Lupyan, E.A., Sementin, V.L., Flitman, E.V., and Shcherbenko, E.V. (2008), “Comparison of Information on Forest Fires, According to Satellite, Terrestrial and Airborne observation ISDM–FFA”, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, Vol. 5, No. 2, pp. 458–468.

6. Gubenko, I.M., and Rubinshteyn, K.G. (2012), “Comparative Analysis of Methods of Fire Danger Indexes Calculation”, *Trudy Gidrometeorologicheskogo nauchno-issledovatel'skogo tsentra Rossiyskoy Federatsii* [Proceedings of Hydrometcentre of Russia], Vol. 347, pp. 180–193.

7. Ponomarchuk, A.I. (2013), "Optimization Parameters of the Contextual Algorithm for the Detection of Forest Fires Using Remote Sensing Data", *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*, No. 1, available at: <http://www.science-education.ru/107-8220> ( Accessed December 18, 2015).
8. Ponomarchuk, A.I., and Shikhov, A.N. (2011), "Detection of Forest Fires in the Perm Region Using Remote Sensing Data", *Geoinformatsionnoe obespechenie prostranstvennogo razvitiya Permskogo kraja: sb. nauch. tr.* [Geoinformatics for Spatial Development of Perm Region], Vol. 4, Perm State University, Perm, Russia, pp. 15–24.
9. Rybchak, N.V., and Utrobin, M.G. (2010), "Analysis of the Forest Fire Situation in the Murmansk Region in 2010 with the Use of Satellite Information", *Zemlya iz Kosmosa – naibolee effektivnye resheniya*, No. 7, pp. 60–66.
10. Sukhova, O.V. (2013), "Creating a Map of Forest Vegetation for Modeling of Snow Accumulation in the Perm Region", *Vestnik Udmurtskogo universiteta, ser. Biologiya. Nauki o Zemle*, No. 4, Izhevsk, Russia, pp. 132–139.
11. Tyurin, Yu.N., and Makarov, A.A. (2002), "Analiz dannykh na komp'yutere" [Data Analysis on the Computer], Moscow, Russia.
12. Shishalov, I.S., and Pypina, O.I. (2010), "'Forest Watch' – an Effective System for Early Detection of Forest Fires", *Lesnoi Byulleten'*, No. 1 (39), pp. 8–12.
13. Di Gregorio, A. (2005), "Land Cover Classification System: Classification Concepts and User Manual : LCCS". Food and Agriculture Organization of the United Nations.
14. Giglio, L. (2006), "Detection, evaluation, and analysis of global fire activity using MODIS data", Dissertation on degree Doctor of Philosophy, University of Maryland, UMI Number: 3212607.
15. McCarthy, M.A. (2007), "Bayesian Methods for Ecology" Cambridge University Press, , 310 p.
16. Zuur A.F., Ieno, E.N., and Smith, G.M. (2007), "Analysing Ecological Data". Springer New York,

Поступила в редакцию: 06.07.2016

#### Сведения об авторах

**Пономарчук Алексей Иванович**,  
кандидат физико-математических наук,  
доцент кафедры картографии и  
геоинформатики Пермского государственного  
национального исследовательского  
университета;  
Россия, 614990, Пермь, ул. Букирева, 15;  
email: aiponomarchuk@gmail.com

**Пьянков Сергей Васильевич**  
доктор географических наук, доцент,  
заведующий кафедрой картографии и  
геоинформатики Пермского государственного  
национального исследовательского  
университета;  
Россия, 614990, Пермь, ул. Букирева, 15;  
email: pyankovsv@gmail.com

#### About the authors

**Alexey I. Ponomarchuk**  
Candidate of Physico-mathematical Sciences,  
Associate Professor of Department of  
Cartography and Geoinformatics, Perm State  
University;  
15, Bukireva Str., Perm, 614990, Russia;  
email: aiponomarchuk@gmail.com

**Sergey V. Pyankov**  
Doctor of Geographical Sciences, Associate  
Professor, the Head of Department of  
Cartography and Geoinformatics;  
Perm State University;  
15, Bukireva Str., Perm, Russia;  
email: pyankovsv@gmail.com

#### Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Пономарчук А.И., Пьянков С.В. Оценка дискриминирующего влияния пространственных факторов на риски возникновения лесных пожаров // Географический вестник = Geographical bulletin. 2016. № 4 (39). С. 118–128. doi 10.17072/2079-7877-2016-4-118-128

#### Please cite this article in English as:

Ponomarchuk A.I., Pyankov S.V. Evaluation of the discriminating impact of spatial factors on forest fire risks // Geographical bulletin. 2016. № 4 (39). P. 118–128. doi 10.17072/2079-7877-2016-4-118-128