

## ОЦЕНКА ПОЖАРООПАСНОСТИ ЛЕСОВ ПОСРЕДСТВОМ ПРИМЕНЕНИЯ КЛАСТЕРИЗАЦИИ И НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ В УСЛОВИЯХ НЕСТАЦИОНАРНОСТИ И НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ<sup>1</sup>

*Т. С. Станкевич*

*Калининградский государственный технический университет,  
Калининград, Российская Федерация*

Информация о появлении лесных пожаров и выявление ключевых природных и антропогенных факторов, влияющих на их возникновение, имеют решающее значение для управления лесами, в первую очередь для формирования и реализации мер пожарной безопасности. В последнее десятилетие наблюдается рост экологического, социального и экономического ущерба от лесных пожаров в глобальном масштабе, что потребовало усиления управления лесными пожарами, особенно в направлении профилактической оценки риска. При всем разнообразии современных подходов, направленных на оценку пожароопасности лесов с учетом влияния факторов среды, большинство из них базируется на упрощенных расчетах и не учитывает определенный ряд факторов, в основном антропологических. Цель исследования заключается в оценке пожароопасности лесов в зависимости от влияния факторов внешней среды путем применения кластеризации данных глобального дистанционного зондирования в условиях нестационарности и неопределенности. Это позволит использовать комплексный подход к оценке пожароопасности лесов для учета и природных, и антропогенных факторов в сложных условиях. Для оценки риска возникновения лесного пожара использованы данные, полученные спектрорадиометром MODIS с 01.01.2014 г. по 24.11.2019 г.: широта, долгота, дата и время получения данных. В качестве дополнительных параметров применены Canadian Forest Fire Weather Index, минимальное расстояние до населенного пункта, минимальное расстояние до дороги (автомобильной или железнодорожной), минимальное расстояние до акватории, праздничный/выходной день, потенциальная стоимость древесины. По результатам пространственного распределения лесных пожаров с учетом данных о факторах среды сформированы три кластера, между вероятностью возникновения лесного пожара и расположением вблизи к населенного пункта выявлена ключевая зависимость. Предложен к рассмотрению и применению разработанный индекс оценки пожарной опасности лесов, который учитывает природное и антропогенное воздействия среды, – индекс Fire Weather and Human Index (FWHI). Построение индекса выполнено с использованием нейронной сети ANFIS. Выявление социальных и биофизических аспектов подверженности сообществ пожарам и адаптации существующей противопожарной стратегии позволит совершенствовать систему обеспечения пожарной безопасности лесов.

**Ключевые слова:** лесной пожар, оценка пожароопасности лесов, глобальное дистанционное зондирование, кластеризация, метод k-means, нейронная сеть ANFIS, природные и антропогенные факторы, неопределенность, нестационарность.

**Для цитирования:** Станкевич Т. С. Оценка пожароопасности лесов посредством применения кластеризации и нейронных сетей в условиях нестационарности и неопределенности // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2020. № 2. С. 56–69. DOI: 10.24143/2072-9502-2020-2-56-69.

### Введение

Согласно действующим в Российской Федерации стандартам [1, 2] под лесным пожаром понимается неконтролируемое горение, развивающееся во времени и пространстве и распространяющееся по лесной площади. Как отмечают исследователи в [3], лесной пожар представляет угрозу для жизни и здоровья людей, оказывает разрушительное воздействие на функционирование лесных экосистем и наносит значительный социально-экологический ущерб. Например,

<sup>1</sup> Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-37-00035 «мол\_а».

результаты анализа статистических данных Федерального агентства лесного хозяйства Российской Федерации и МЧС России [4] демонстрируют, что в России в течение 2018 г. материальные потери, непосредственно связанные с лесными пожарами, составили примерно 19,8 млрд руб. и превысили ущерб от техносферных пожаров более чем на 5,6 млрд руб. При этом с 2009 по 2018 гг. произошел двукратный рост расходов на защиту лесов от пожаров – с 3,6 до 7,1 млрд руб.

Разрушительное воздействие пожара приводит к сокращению количества и разнообразия микро- и макрофауны леса, а также негативно влияет на физико-химические свойства почвы (уменьшает содержание органических веществ, изменяет структуру и пористость почвы, повышает pH [5–7]) и ослабляет ферментативную активность почвы из-за роста температуры и гибели микроорганизмов, являющихся источником ферментов [8, 9]. Согласно [10] пожар истощает плодородие почвы: несмотря на то, что сразу после пожара наблюдается кратковременное увеличение фертильности почвы, через некоторое время питательные вещества из почвы вымываются. Кроме того, исследователи в работах [11–13] указывают, что пожары способны значительно увеличить восприимчивость ландшафта к наводнениям, эрозии, оползням. Исследователи в работах [14, 15] отмечают, что при пожаре выделяются большие объемы аэрозольных загрязняющих веществ (CO, CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> и др.), которые значительно влияют на химический состав атмосферы Земли, изменяя качество воздуха, усиливая парниковый эффект и вызывая обеспокоенность по поводу рисков для здоровья человека.

С другой стороны, несмотря на негативные эффекты указанного явления, исследователи отмечают [16, 17], что лесные пожары являются частью естественной динамики лесных экосистем и представляют собой мощную эволюционную силу, формирующую ландшафты, растительность и биоразнообразие систем. Однако при этом многие ученые сообщают об изменениях пожарного режима территорий в сторону роста повторяемости пожаров и увеличения частоты крупных пожаров. Например, авторы [18] проанализировали данные о площадях пожаров на западе США за 1984–2015 гг., выявили увеличение площади пожаров на 4,2 млн га и сделали вывод, что тенденция к росту площадей лесных пожаров обусловлена изменением климата.

Увеличение риска возникновения лесных пожаров во многих регионах, снижение регулирующей функции данного явления и рост его деструктивной функции вызвало озабоченность во всем мировом пространстве и стало причиной всестороннего обсуждения проблем адаптации к этим изменениям и выполнения профилактической оценки риска лесных пожаров.

Факторы, которые вызывают возникновение лесного пожара, делятся на две группы: антропогенные и природные. Согласно данным [19], в большинстве случаев (95 %) лесные пожары вызваны антропогенными факторами, и только небольшая часть пожаров возникает из-за влияния природных факторов среды. Подобное распределение обусловлено тем, что люди активно управляют ландшафтами, используя огонь в качестве инструмента воздействия для расчистки территорий [20], уничтожают отходы, в том числе и сельскохозяйственные [21], случайно поджигают леса в процессе своей повседневной деятельности, а также злонамеренно поджигают леса с целью нанесения ущерба частной и/или государственной собственности. Необходимо отметить, что в Российской Федерации, согласно данным Федерального агентства лесного хозяйства [4], доля лесных пожаров, возникших вследствие антропогенного воздействия, от общего количества лесных пожаров за 2016 г. составила 46,7 %, т. е. для лесов России характерно равномерное распределение причин, вызывающих лесные пожары, без преобладания антропогенного фактора.

Современные подходы к оценке пожароопасности лесов с учетом влияния природных и антропогенных факторов среды в странах существенно различаются. Так, в Австралии применяют индекс лесной пожарной опасности МакАртура (McArthur Forest Fire Danger Index, FFDI) [22] и таблицы поведения лесного пожара (Forest Fire Behaviour Tables, FFBT) [23]. В Канаде, ряде штатов США, в Европе, Мексике, в Новой Зеландии и в странах Юго-Восточной Азии используется индекс лесной пожарной опасности погоды (Canadian Forest Fire Weather Index, FWI) [24]. В США разработана и функционирует Национальная рейтинговая система пожарной опасности (National Fire Danger Rating System, NFDRS) [25]. Кроме того, как указано в [26], в США существуют карты Wildland – Urban Interface (WUI), охватывающие более двух десятилетий. Подобные национальные карты также разработаны и для других стран (например, Канады [27],

некоторых стран Европы [28]). В России оценка пожароопасности лесов осуществляется с использованием классификации природной пожарной опасности лесов [29], которая использует данные о лесе, вырубке, лесном насаждении или безлесном пространстве: о типе территории и ее расположении относительно автомобильных дорог общего пользования и железных дорог. Классификация пожарной опасности в лесах по условиям погоды базируется на расчете комплексного показателя В. Г. Нестерова по требованиям [29, 30].

Исходя из анализа применяемых на практике методов оценки пожарной опасности лесов, можно сделать вывод, что существующие подходы разнообразны, в большинстве случаев несводимы, базируются на упрощенных расчетах и учитывают ограниченный ряд факторов, в основном природных. Однако разнообразие факторов, которые влияют на возможность возникновения лесного пожара, диктует необходимость использования комплексного подхода для учета и природных, и антропогенных факторов.

В последнее десятилетие стало доступно большое количество данных о распространении лесных пожаров [31, 32], в первую очередь благодаря глобальному дистанционному зондированию. Дистанционное зондирование, являясь передовой спутниковой технологией, применяется в различных областях (например, гидроэкологических исследованиях [33]). Спутниковое зондирование играет очень важную роль в обнаружении лесного пожара, оценке его воздействия, оповещении, управлении и разработке плана восстановления после пожара [34], т. е. на всех этапах обеспечения пожарной безопасности в лесах. Увеличение количества спутников, их пространственного разрешения, количества одновременно наблюдаемых спектральных полос обеспечивает устойчивый рост объемов данных. В настоящее время спутниковые данные о лесных пожарах широко используются исследователями.

Лесной пожар как сложная природная система подчиняется внешним условиям формирования неопределенности и характеризуется способностью к самоорганизации. Самоорганизация, с одной стороны, делает возможной адаптацию системы к меняющейся обстановке, с другой стороны, указанная способность системы обуславливает динамизм лесного пожара и присущую ему неопределенность. При оценке пожароопасной ситуации в лесных массивах и принятии управленческого решения формируется общая неопределенность, включающая неопределенность 1-го рода (среды), 2-го рода (неопределенность выбора решения) и 3-го рода (неопределенность реализации в будущем решения).

Учитывая динамизм и неопределенность пожара, данные дистанционного зондирования требуют использования современных математических и информационных инструментов, например методов интеллектуального анализа данных и машинного обучения.

Таким образом, *цель исследования* заключается в разработке подхода к оценке пожароопасности лесов в зависимости от влияния факторов внешней среды (природных и антропогенных) в условиях нестационарности и неопределенности.

### **Методы исследования**

Машинное обучение включает в себя разнообразные методы, такие как регрессионный анализ, методы отбора и классификацию. При этом в классификацию, как указано в [35], входят три группы: контролируемая, полуконтролируемая и неконтролируемая (кластеризация). Выбор кластеризации в качестве основного метода обусловлен тем, что, хотя методы кластеризации, как правило, более требовательные, чем контролируемые подходы, они дают больше информации о неполных и выборочных данных в сложных условиях, что характерно для данных о лесных пожарах.

Современные исследователи [36, 37] отмечают, что кластеризация данных – сложная задача, предполагающая выбор между различными методами, параметрами и показателями эффективности. Следовательно, особое внимание необходимо уделять выбору алгоритма кластеризации. В работе предложено использовать один из наиболее эффективных и широко применяемых в практике методов – метод k-means [38].

Математическая модель кластеризации объектов с использованием метода k-means в виде блок-схемы представлена на рис. 1, где под объектами понимаются лесные пожары.

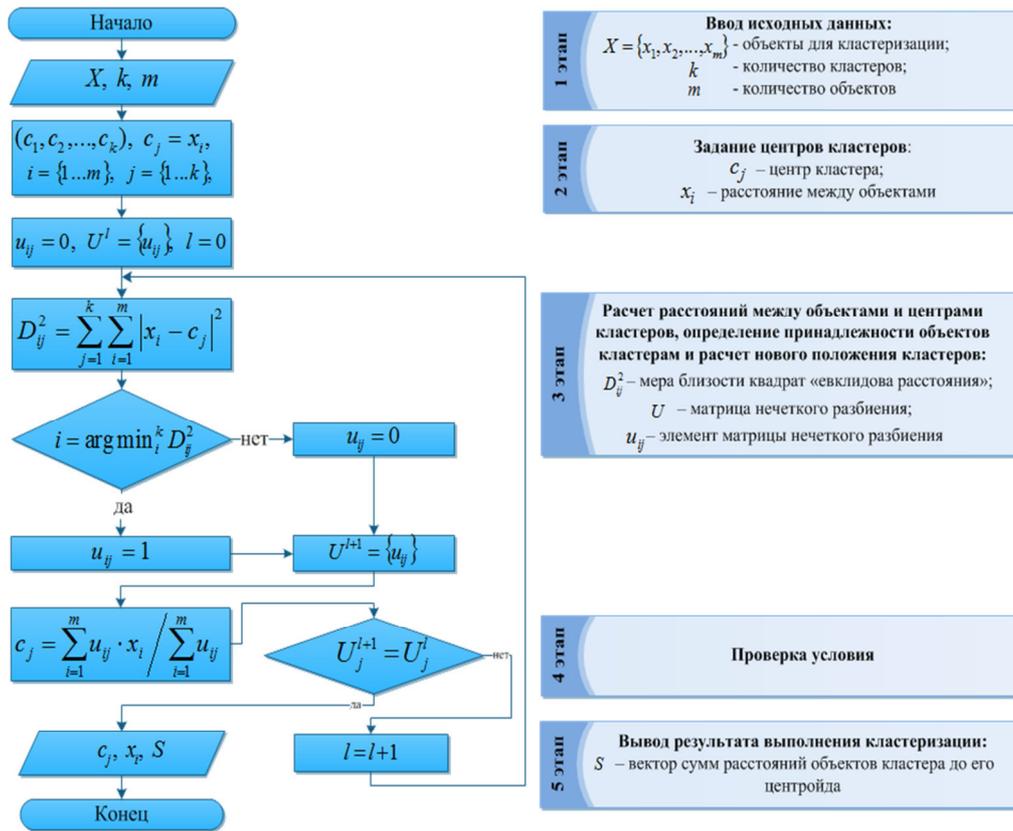


Рис. 1. Блок-схема алгоритма по кластеризации лесных пожаров на базе метода кластеризации k-means

На первом этапе выполняется ввод данных; на втором этапе задается случайным образом начальное положение центров кластеров  $(c_1, c_2, \dots, c_k)$ ; на третьем этапе выполняются расчет меры близости между объектами и центрами кластеров (квадрата евклидова расстояния  $D_{ij}^2$ ), определение принадлежности объектов кластерам и расчет нового положения кластеров  $c_j$ ; на четвертом этапе – проверка условия итерации: в случае выполнения условия итерации осуществляется переход на пятый этап, в случае невыполнения осуществляется переход на третий этап; на пятом этапе – вывод результатов.

Для оценки пожароопасности лесов в зависимости от влияния факторов внешней среды (природных и антропогенных) при нестационарности и неопределенности предложено сформировать кластеры лесных пожаров, используя данные глобального дистанционного зондирования. Основные данные получены от 36-канального спектрорадиометра с умеренным спектральным разрешением MODIS, предоставляемым EFFIS [39], и содержат следующие параметры: широта, долгота, дата и время получения данных.

Набор данных содержит 300 записей за период с 01.01.2014 г. по 24.11.2019 г. для таких стран, как Италия, Испания, Франция, Греция, Португалия, Северная Македония, Хорватия, Босния и Герцеговина, Турция, Алжир, Марокко, Тунис, Швейцария и Люксембург. При этом использованы впервые полученные данные об обнаружении так называемой «горячей точки» с максимальной оценкой достоверности, когда пожар определен с высокой достоверностью, т. е. со значением «confidence», равным 100.

В качестве дополнительных параметров, используемых при кластеризации для оценки влияния внешней среды на возможность успешного воспламенения, применены Fire Weather Index (6 классов: «1» – очень низкий уровень опасности; «2» – низкий уровень опасности; «3» – средний уровень опасности; «4» – высокий уровень опасности; «5» – очень высокий уровень опасности; «6» – экстремально высокий уровень опасности); минимальное расстояние до насе-

ленного пункта, м; минимальное расстояние до дороги (автомобильной или железнодорожной), м; минимальное расстояние до акватории, м; праздничный/выходной день (2 класса: «1» – рабочий день; «2» – праздничный или выходной день); потенциальная стоимость древесины (3 класса: «1» – потенциально низкая стоимость; «2» – потенциально средняя стоимость; «3» – потенциально высокая стоимость).

Данные о коэффициенте Canadian Forest Fire Weather Index получены с использованием инструмента Current Situation Viewer, предоставляемого EFFIS (рис. 2).

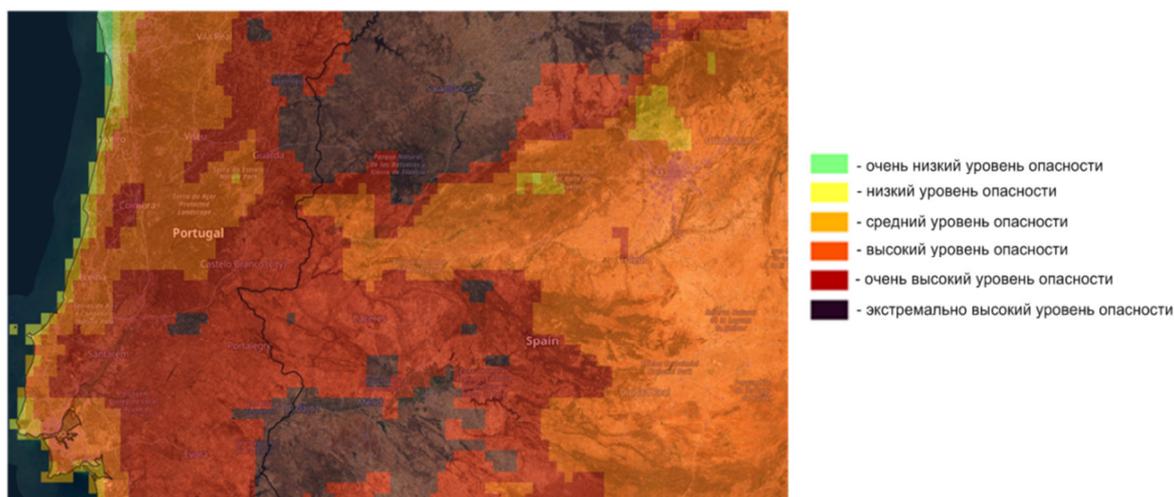


Рис. 2. Данные об индексе Canadian Forest Fire Weather Index, Current Situation Viewer (12 октября 2019 г.)

Помимо прочего, этот инструмент позволил собрать данные о типе растительности на территории (рис. 3), где возник пожар, для последующей оценки потенциальной стоимости древесины на участке.

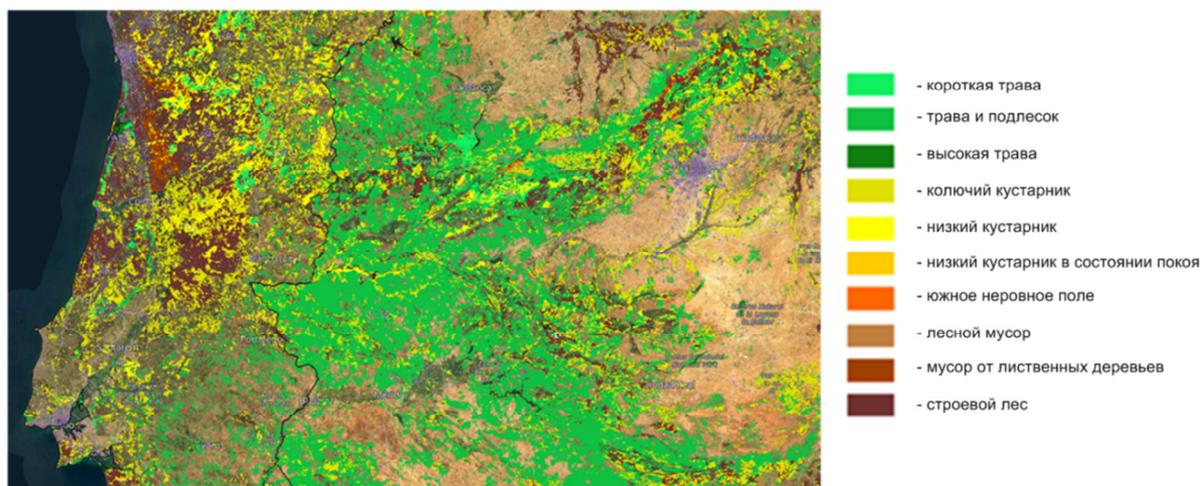


Рис. 3. Данные о типе растительности, Current Situation Viewer (12 октября 2019 г.)

К классу «3» по потенциальной стоимости отнесен тип растительности «строевой лес», «мусор лиственных деревьев» и «лесной мусор», «южное неровное поле»; к классу «2» – типы растительности «колючий кустарник», «низкий кустарник», «низкий кустарник в состоянии покоя»; к классу «1» – типы растительности «короткая трава», «трава и подлесок», «высокая трава». Данные о расстояниях (до населенного пункта, дороги, акватории) получены посредством применения Google Maps. Итоговый набор данных представлен в табл. 1.

Данные для кластеризации лесных пожаров

№ п/п	Широта	Долгота	Дата получения данных (номер дня)	Время получения данных (мин)	Canadian Forest Fire Weather Index	Минимальное расстояние до населенного пункта, м	Минимальное расстояние до дороги, м	Минимальное расстояние до акватории, м	Праздничный / выходной день	Потенциальная стоимость древесины
1	45,145	9,945	24	110	1	40	41	92	1	2
2	37,734	15,071	26	100	1	3 610	1 500	5 730	2	2
3	39,778	-0,443	35	760	4	858	650	286	1	2
4	37,732	14,960	37	1 210	1	12 310	1 390	14 240	1	3
5	43,446	4,891	53	80	1	33	96	165	2	1
6	37,744	15,043	60	90	1	5 710	2 710	7 740	2	3
7	41,446	21,949	68	35	2	408	391	2 360	2	3
8	40,330	-6,908	68	135	2	3 620	12	12 858	2	3
9	43,376	-6,614	73	155	1	2 060	261	101	1	3
10	37,749	15,042	76	90	1	2 350	2 350	8 380	1	2
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
300	41,423	21,205	302	60	5	388	2 980	6 380	3	1

Совокупность факторов природного и антропогенного характера влияет на возникновение лесного пожара. Наиболее полный перечень факторов, влияющих на вероятность возникновения пожара, приведен в работе [40]. При этом чтобы избежать информационной перегрузки, для анализа ученые выделяют следующие ключевые параметры [41]: тип растительности, солнечная радиация, температура воздуха, количество осадков, влажность воздуха, расстояние до дороги, расстояние до населенного пункта.

В данной работе сформирован набор данных (табл. 1), который включает 10 природных и антропогенных факторов. В табл. 1 учитываются все стандартные факторы, применяемые для оценки пожароопасности лесов (тип растительности, солнечная радиация, температура воздуха, количество осадков, влажность воздуха, расстояние до дороги, расстояние до населенного пункта), при этом природные факторы – благодаря использованию индекса Canadian Forest Fire Weather Index. Также в наборе использованы данные о расстоянии до акватории, поскольку ряд исследователей [42] доказали их влияние на вероятность возникновения лесного пожара. Впервые использован параметр, учитывающий потенциальную стоимость древесины и направленный на выявление областей возможных поджогов.

### Результаты исследования

На основании математической модели (см. рис. 1) разработан программный продукт, осуществляющий оценку пожарного риска территории посредством применения метода кластеризации. Параметры кластеризации заданы следующие: количество кластеров – 3; количество итераций – 100; количество объектов для кластеризации – 300. Результаты кластеризации представлены в табл. 2 и на рис. 4.

## Результаты кластеризации

№ п/п	Широта	Долгота	Дата получения данных (номер дня)	Время получения данных (мин)	Canadian Forest Fire Weather Index	Минимальное расстояние до населенного пункта, м	Минимальное расстояние до дороги, м	Минимальное расстояние до акватории, м	Праздничный / выходной день	Потенциальная стоимость древесины	Кластер
1	45,145	9,945	24	110	1	40	41	92	1	2	1
2	37,734	15,071	26	100	1	3610	1 500	5 730	2	2	2
3	39,778	-0,443	35	760	4	858	650	286	1	2	3
4	37,732	14,960	37	1 210	1	12 310	1 390	14 240	1	3	1
5	43,446	4,891	53	80	1	33	96	165	2	1	3
6	37,744	15,043	60	90	1	5 710	2 710	7 740	2	3	1
7	41,446	21,949	68	35	2	408	391	2 360	2	3	1
8	40,330	-6,908	68	135	2	3 620	12	12 858	2	3	1
9	43,376	-6,614	73	155	1	2 060	261	101	1	3	1
10	37,749	15,042	76	90	1	2 350	2 350	8 380	1	2	1
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
300	41,423	21,205	302	60	5	388	2980	6 380	1	3	1

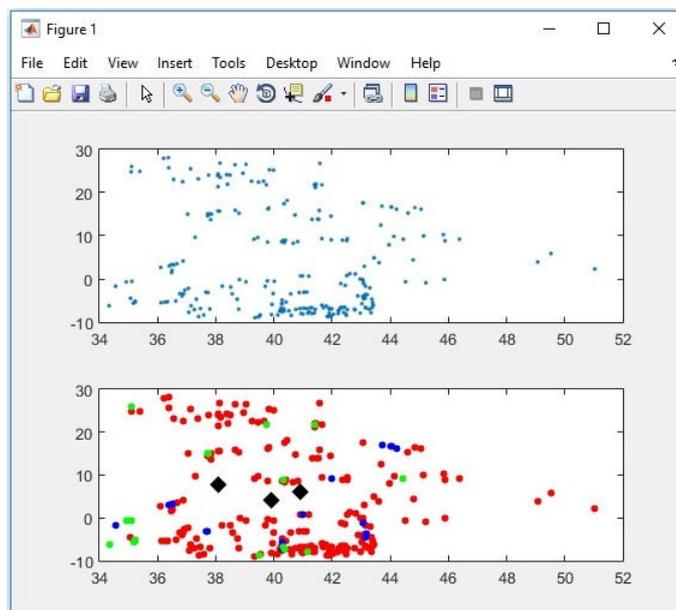


Рис. 4. Результаты кластеризации данных: верхний график – распределение входных данных; нижний график – результаты распределения на кластеры с указанием центров кластеров

С учетом полученных результатов автором предложено разработать индекс оценки пожарной опасности лесов, учитывающий природное и антропогенное воздействия среды, – индекс Fire Weather and Human Index (FWHI). Для построения индекса использована нейронная сеть ANFIS [43].

Набор данных для построения и обучения сети включает в себя результаты кластеризации, представленные в табл. 2 (входные параметры: индекс Canadian Forest Fire Weather Index; минимальное расстояние до населенного пункта, м; минимальное расстояние до дороги (автомобильной или железнодорожной), м; минимальное расстояние до акватории, м; праздничный/выходной день; потенциальная стоимость древесины; выходной параметр – номер кластера), и содержит 200 записей, набор данных для тестирования сети состоит из 100 записей; количество итераций – 100. Выполнено сравнение типовых функций принадлежности сети и различных методов обучения (гибридный метод обучения и метод обратного распространения ошибки) (рис. 5, 6).

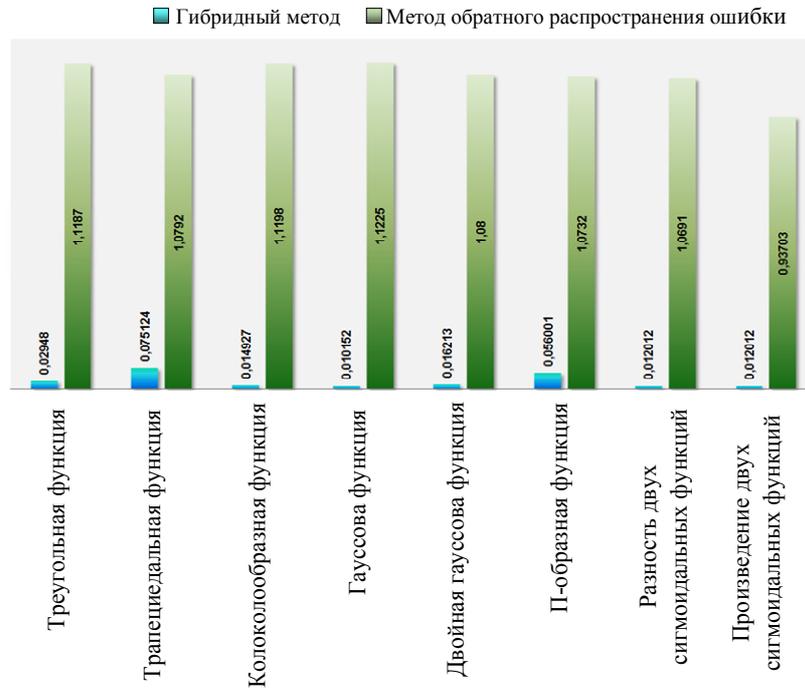


Рис. 5. Результаты обучения сети ANFIS

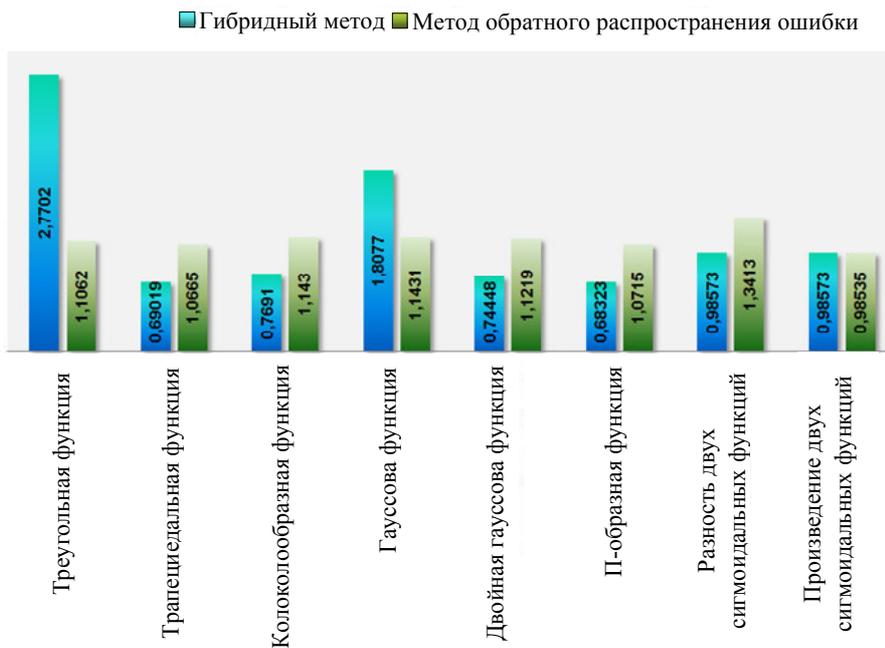


Рис. 6. Результаты тестирования сети ANFIS

В статье выполнена оценка риска возникновения лесного пожара в зависимости от влияния факторов внешней среды посредством кластеризации данных глобального дистанционного зондирования. Как видно из табл. 2, в результате применения кластеризации данных глобального дистанционного зондирования сформированы три кластера: первый кластер включает в себя 257 объектов, второй кластер – 19 объектов, третий кластер – 24 объекта. Большинство объектов (лесных пожаров) вошло в первый кластер и характеризуется незначительным удалением от населенных пунктов, что наглядно демонстрирует ключевую роль антропогенных факторов в возникновении лесного пожара для сформированного набора данных.

В ходе обучения и тестирования сети ANFIS (рис. 5 и 6) выявлено, что оптимальный вид функции принадлежности – П-образная функция, метод обучения – гибридный.

### **Заключение**

В работе выполнена оценка пожароопасности лесов в зависимости от совокупного влияния природных и антропогенных факторов в сложных условиях посредством использования кластеризации данных глобального дистанционного зондирования. Для оценки риска возникновения лесного пожара использованы следующие данные: широта, долгота, дата и время получения данных, индекс Canadian Forest Fire Weather Index, минимальное расстояние до населенного пункта, минимальное расстояние до дороги (автомобильной или железнодорожной), минимальное расстояние до акватории, праздничный/выходной день, потенциальная стоимость древесины. Получены результаты пространственного распределения лесных пожаров с учетом данных о факторах среды в виде трех кластеров и выявлена ключевая зависимость между вероятностью возникновения лесного пожара и близостью к населенному пункту.

В работе предложен индекс оценки пожарной опасности лесов, учитывающий природное и антропогенное воздействия среды (FWHI – Fire Weather and Human Index), и произведено построение нейронной сети ANFIS для расчета разработанного индекса. В ходе обучения и тестирования сети ANFIS выявлено, что оптимальный вид функции принадлежности – П-образная функция; метод обучения – гибридный.

Результаты исследования направлены на совершенствование системы обеспечения пожарной безопасности лесов, которая в настоящее время многими исследователями характеризуется как неэффективная в смягчении существующих негативных тенденций, посредством выявления социальных и биофизических аспектов подверженности сообществ пожарам и адаптации современной противопожарной стратегии. Применение полученных результатов исследования, в первую очередь нейронной сети ANFIS для определения индекса FWHI, позволит сформировать конкретный набор жизнеспособных мер по управлению лесными пожарами и смягчению их последствий в зависимости от факторов внешней среды в сложных условиях динамизма и неопределенности, в отличие от слишком общих существующих рекомендаций, которые не учитывают разнообразие формирующих риск пожара социальных и экологических факторов. Сотрудники соответствующих служб и правоохранительных органов смогут с определенной точностью предсказать количество ожидаемых лесных пожаров в предстоящий период планирования путем применения предложенного инструмента прогнозирования.

К ограничениям данного исследования относится то, что для кластеризации данных использован ограниченный набор данных о лесных пожарах, который содержит сведения только о 14 странах за короткий промежуток времени. Для преодоления указанного ограничения планируется дополнительный сбор данных, в первую очередь данных о лесных пожарах на территории Российской Федерации, Канады, США. Ограничением исследования является также то, что в работе не учитываются усилия правоохранительных органов и разнообразные профилактические образовательные мероприятия среди населения по предупреждению возникновения лесных пожаров.

### *СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ*

1. *ГОСТ 17.6.1.01-83*. Охрана природы (ССОП). Охрана и защита лесов. Термины и определения. М.: ИПК Изд-во стандартов, 2002. С. 77–82.
2. *ГОСТ 12.3.046-91*. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Установки пожаротушения автоматические. Общие технические требования. М.: ИПК Изд-во стандартов, 2002. 4 с.

3. *Moreno J. M.* Spatial distribution of forest fires in Sierra de Gredos (central Spain) // *Forest Ecology Management*. 2001. N. 147. P. 55–65.
4. *ЕМИСС*. Государственная статистика. Ведомства. URL: <https://www.fedstat.ru/organizations/> (дата обращения: 21.12.2019).
5. *Certini G.* Effect of fire on properties of soil – A review // *Oecologia*. 2005. V. 143. N. 1. P. 1–10.
6. *Gonet S. S., Dziadowiec H., Bueko M.* Profile morphology, chemical properties and organic matter stocks in soils after pine forest fire // *Roczniki Gleboznawcze – Soil Science Annual*. 2009. V. 60. N. 2. P. 32–38.
7. *Miesel J. R., Goebel P. C., Corace R. G., Hix D. M., Kolka R., Palik B., Mladenoff D.* Fire effects on soils in Lake States Forests: A Compilation of published research to facilitate long-term investigations // *Forests*. 2012. V. 3. N. 4. P. 1034–1070.
8. *Bartkowiak A., Lemanowicz J.* Effect of forest fire on changes in the content of total and available forms of selected heavy metals and catalase activity in soil // *Soil Science Annual*. 2017. V. 68. N. 3. P. 140–148.
9. *Predecka A., Chojnicki J., Russel S.* The effect of spring grass burning on the bacteria count and the soil dehydrogenases activity // *Science Nature Technologies*. 2010. V. 4. N. 6. 9 p.
10. *Brais S., David P., Quimer R.* Impacts of wild fire severity and salvage harvesting on the nutrient balance of jack pine and black spruce boreal stands // *Forest Ecology and Management*. 2000. V. 137. N. 1. P. 231–243.
11. *Moody J. A., Shakesby R. A., Robichaud P. R., Cannond S. H., Martin D. A.* Current research issues related to post-wildfire runoff and erosion processes // *Earth-Science Reviews*. 2013. V. 122. P. 10–37.
12. *Soulis K. X., Dercas N., Valiantzas J. D.* Wildfires impact on hydrological response – the case of Lykorrema experimental watershed // *Global NEST Journal*. 2012. V. 14. N. 3. P. 303–310.
13. *Shakesby R. A.* Post-wildfire soil erosion in the Mediterranean: Review and future research directions // *Earth-Science Reviews*. 2011. V. 105. P. 71–100.
14. *Hardy C. C., Ottmar R. D., Peterson J. L., Core J. E., Seamon P.* Smoke management guide for prescribed and wild land fire // *National Wildfire Coordination Group PMS 420-2, NFES 1279*, 2001. 226 p.
15. *Andreae O., Merlet P.* Emission of trace gases and aerosols from biomass burning // *Global Biogeochemical Cycles*. 2001. V. 15. N. 11. 955 p.
16. *Bond W. J., Keeley J. E.* Fire as a global ‘herbivore’: the ecology and evolution of flammable ecosystems // *Trends Ecol. Evol.* 2005. V. 20. P. 387–394.
17. *Johnstone J. F., Allen C. D., Franklin J. F., Frelich L. E., Harvey B. J., Higuera P. E., Mack M. C., Meentemeyer R. K., Metz M. R., Perry G. L., Schoennagel T., Turner M. G.* Changing disturbance regimes, ecological memory, and forest resilience // *Front. Ecol. Environ.* 2016. V. 14. N. 7. P. 369–378.
18. *Abatzoglou J. T., Williams A. P.* Impact of anthropogenic climate change on wildfire across western US forests // *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2016. V. 113. N. 42. P. 11770–11775.
19. *Wotton B. M.* Interpreting and using outputs from the Canadian Forest Fire Danger Rating System in research applications // *Environmental and Ecological Statistics*. 2009. V. 16. N. 2. P. 107–131.
20. *Cochrane M. A.* Fire science for rainforests // *Nature*. 2003. V. 421. P. 913–919.
21. *Yevich R., Logan J. A.* An assessment of biofuel use and burning of agricultural waste in the developing world // *Glob. Biogeochem. Cycles*. 2003. V. 17. 1095 p.
22. *Dowdy A. J., Mills G. A., 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. V. 10. 91 p.
23. *Stuart M.* A comparison of fire danger rating systems for use in forests // *Australian Meteorological and Oceanographic Journal*. 2009. N. 58. P. 41–48.
24. *Natural Resources Canada.* Background Information. Canadian Forest Fire Weather Index (FWI) System. URL: <http://cwffis.cfs.nrcan.gc.ca/background/summary/fwi> (дата обращения: 20.12.2019).
25. *Coos Forest Protective Association.* National Fire Danger Rating System (NFDRS). URL: <https://www.coosfpa.net/nfdrs> (дата обращения: 20.12.2019).
26. *Radeloff V. C., Helmers D. P., Kramer H. A., Mockrin M. H., Alexandre P. M., Bar-Massada A., Van Butsch, Hawbaker T. J., Martinuzzi S., Syphard A. D., Stewart S. I.* Rapid growth of the US wildland-urban interface raises wildfire risk // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2018. V. 115. N. 13. P. 3314–3319.
27. *Johnston L. M., Flannigan M. D.* Mapping Canadian wildland fire interface areas // *International Journal of Wildland Fire*. 2018. V. 27. N. 1. P. 1–14.
28. *Modugno S., Balzter H., Cole B., Borrelli P.* Mapping regional patterns of large forest fires in Wildland-Urban Interface areas in Europe // *Journal of Environmental Management*. 2016. V. 172. P. 112–126.
29. *Об утверждении классификации природной пожарной опасности лесов и классификации пожарной опасности в лесах в зависимости от условий погоды: приказ Рослесхоза от 5 июля 2011 г. № 287.* URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_118509/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_118509/) (дата обращения: 20.12.2019).

30. ГОСТ Р 22.1.09-99. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Мониторинг и прогнозирование лесных пожаров. Общие требования. М.: ИПК Изд-во стандартов, 1999. 11 с.
31. Archibald S., Lehmann C. E. R., Gómez-Dans J. L., Bradstock R. A. Defining pyromes and global syndromes of fire regimes // PNAS. 2013. V. 110. N. 16. P. 6442–6447.
32. Krawchuk M. E., Moritz M. A., Parisien M. A., Van Dorn J., Hayhoe K. Global Pyrogeography: the Current and Future Distribution of Wildfire // Plos ONE. 2009. V. 4. N. 4. 12 p.
33. Беломелова Д. В. Динамика концентрации фитопланктона Каспийского моря по данным спутников SEAWIFS, MODIS // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. 2008. № 3 (44). С. 135–137.
34. Bustamante Rúa M. O., Daza Aragón A. J., Bustamante Baena P., Osorio Botero J. D. Statistical analysis to establish an ignition scenario based on extrinsic and intrinsic variables of coal seams that affect spontaneous combustion // International Journal of Mining Science and Technology. 2019. V. 29. P. 731–737.
35. Jing L., Ng M. K., Huang J. Z. An entropy weighting k-means algorithm for subspace clustering of high-dimensional sparse data // IEEE Transactions on knowledge and data engineering. 2007. V. 19. N. 8. P. 1026–1041.
36. Raykov Y. P., Boukouvalas A., Baig F., Little M. A. What to Do When K-Means Clustering Fails: A Simple yet Principled Alternative Algorithm // PLoS ONE. 2016. V. 11. N. 9. P. 1–28.
37. Arruda G. F., Costa L. F., Rodrigues F. A. A complex networks approach for data clustering // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. 2012. V. 391. N. 23. P. 6174–6183.
38. Fung G. A Comprehensive Overview of Basic Clustering Algorithms // IEEE. 2001. June. P. 1–37.
39. Data and services. EFFIS. URL: <https://effis.jrc.ec.europa.eu/applications/data-and-services/> (дата обращения: 21.12.2019).
40. Jennings C. R. Social and economic characteristics as determinants of residential fire risk in urban neighborhoods: A review of the literature // Fire Saf. J. 2013. V. 62. P. 13–19.
41. Gigović L., Jakovljević G., Sekulović D., Regodić M. GIS Multi-Criteria Analysis for Identifying and Mapping Forest Fire Hazard: Nevesinje, Bosnia and Herzegovina // Technical Vestnik. 2015. V. 25. N. 3. P. 891–897.
42. Yiping Li, Jianjun Zhao, Xiaoyi Guo, Zhengxiang Zhang, Gang Tan, Jihong Yang. The Influence of Land Use on the Grassland Fire Occurrence in the Northeastern Inner Mongolia Autonomous Region, China // Sensors. 2017. V. 17. 19 p.
43. Jang J. S. R. ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system // IEEE Trans Syst Man Cybern. 1993. V. 23. P. 665–685.

Статья поступила в редакцию 29.01.2020

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

**Станкевич Татьяна Сергеевна** – Россия, 236022, Калининград; Калининградский государственный технический университет; канд. техн. наук; доцент секции защиты в чрезвычайных ситуациях кафедры техносферной безопасности; [tatiana.stankevich@klgtu.ru](mailto:tatiana.stankevich@klgtu.ru).



## FOREST FIRE HAZARD ASSESSMENT BY CLUSTERING AND USING NEURAL NETWORKS UNDER UNSTABILITY AND UNCERTAINTY

**T. S. Stankevich**

*Kaliningrad State Technical University,  
Kaliningrad, Russian Federation*

**Abstract.** The paper focuses on the data on forest fires and identification of key natural and anthropogenic factors that are crucial for forest management, especially, for developing and implementing the fire safety measures. In recent decades, there have been observed the increased environmental, social and economic losses from the forest fires on a global scale, which has

required stepped-up fire-fighting surveillance, especially in the preventive forest fire risk assessment. In all the variety of modern approaches aimed at assessing the fire hazards to the forests and taking into account the effecting environmental factors, most of them are based on simplified calculations and do not take into account different factors, mainly anthropological ones. The purpose of the study is to assess the forest fire risk depending on the environmental factors by using cluster analysis in conditions of instability and uncertainty. It could help applying the integrated approach to forest fire risk assessing in order to take into account both natural and anthropogenic factors in difficult conditions. To assess the forest fire risk, there were used the data obtained by MODIS spectroradiometer from January 1, 2014 to November 24, 2019: latitude; longitude; acquisition time and date. The following parameters were used as additional: Fire Weather Index; minimum distance to an inhabited locality; minimum distance to the road (highway or railway); minimum distance to the water area; holiday / day off; potential value. According to the results of the spatial distribution of forest fires and taking into account the data on the environmental factors there have been formed three clusters; there has been revealed a key relationship between the probability of a forest fire and proximity to the inhabited locality. There has been submitted the index of forest fire risk assessment (the Fire Weather and Human Index (FWHI)) based on the natural and anthropogenic impacts. Identification of social and biophysical aspects of the community exposure to fires and the adaptation of the existing fire prevention strategy will improve the forest fire safety system.

**Key words:** forest fire, forest fire risk assessment, global remote sensing, clustering, k-means method; ANFIS neural network, natural and anthropogenic factors, uncertainty, nonstationarity.

**For citation:** Stankevich T. S. Forest fire hazard assessment by clustering and using neural networks under unstability and uncertainty. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Science and Informatics*. 2020;2:56-69. (In Russ.) DOI: 10.24143/2072-9502-2020-2-56-69.

#### REFERENCES

1. GOST 17.6.1.01-83. *Okhrana prirody (SSOP). Okhrana i zashchita lesov. Terminy i opredeleniia* [GOST 17.6.1.01-83. Nature Conservation (MTSOP). Forest conservation and protection. Terms and Definitions]. Moscow, IPK Izd-vo standartov, 2002. Pp. 77-82.
2. GOST 12.3.046-91. *Sistema standartov bezopasnosti truda (SSBT). Ustanovki pozharotusheniia avtomaticheskije. Obshchie tekhnicheskie trebovaniia* [GOST 12.3.046-91. Occupational safety standards system (OSSS). Automatic fire extinguishing units. General technical requirements]. Moscow, IPK Izd-vo standartov, 2002. 4 p.
3. Moreno J. M. Spatial distribution of forest fires in Sierra de Gredos (central Spain). *Forest Ecology Management*, 2001, no. 147, pp. 55-65.
4. *EMISS. Gosudarstvennaia statistika. Vedomstva* [Unified interdepartmental information and statistical system. State statistics. Governmental agencies]. Available at: <https://www.fedstat.ru/organizations/> (accessed: 21.12.2019).
5. Certini G. Effect of fire on properties of soil – A review. *Oecologia*, 2005, vol. 143, no. 1, pp. 1-10.
6. Gonet S. S., Dziadowiec H., Buæko M. Profile morphology, chemical properties and organic matter stocks in soils after pine forest fire. *Roczniki Gleboznawcze – Soil Science Annual*, 2009, vol. 60, no. 2, pp. 32-38.
7. Miesel J. R., Goebel P. C., Corace R. G., Hix D. M., Kolka R., Palik B., Mladenoff D. Fire effects on soils in Lake States Forests: A Compilation of published research to facilitate long-term investigations. *Forests*, 2012, vol. 3, no. 4, pp. 1034-1070.
8. Bartkowiak A., Lemanowicz J. Effect of forest fire on changes in the content of total and available forms of selected heavy metals and catalase activity in soil. *Soil Science Annual*, 2017, vol. 68, no. 3, pp. 140-148.
9. Predecka A., Chojnicki J., Russel S. The effect of spring grass burning on the bacteria count and the soil dehydrogenases activity. *Science Nature Technologies*, 2010, vol. 4, no. 6, p. 9.
10. Brais S., David P., Quimer R. Impacts of wild fire severity and salvage harvesting on the nutrient balance of jack pine and black spruce boreal stands. *Forest Ecology and Management*, 2000, vol. 137, no. 1, pp. 231-243.
11. Moody J. A., Shakesby R. A., Robichaud P. R., Cannond S. H., Martin D. A. Current research issues related to post-wildfire runoff and erosion processes. *Earth-Science Reviews*, 2013, vol. 122, pp. 10-37.
12. Soulis K. X., Dercas N., Valiantzas J. D. Wildfires impact on hydrological response – the case of Lykorrema experimental watershed. *Global NEST Journal*, 2012, vol. 14, no. 3, pp. 303-310.
13. Shakesby R. A. Post-wildfire soil erosion in the Mediterranean: Review and future research directions. *Earth-Science Reviews*, 2011, vol. 105, pp. 71-100.
14. Hardy C. C., Ottmar R. D., Peterson J. L., Core J. E., Seamon P. Smoke management guide for prescribed and wild land fire. *National Wildfire Coordination Group PMS 420-2, NFES 1279*, 2001. 226 p.

15. Andreae O., Merlet P. Emission of trace gases and aerosols from biomass burning. *Global Biogeochemical Cycles*, 2001, vol. 15, no. 11, p. 955-966.
16. Bond W. J., Keeley J. E. Fire as a global 'herbivore': the ecology and evolution of flammable ecosystems. *Trends in Ecology & Evolution*, 2005, vol. 20, pp. 387-394.
17. Johnstone J. F., Allen C. D., Franklin J. F., Frelich L. E., Harvey B. J., Higuera P. E., Mack M. C., Meentemeyer R. K., Metz M. R., Perry G. L., Schoennagel T., Turner M. G. Changing disturbance regimes, ecological memory, and forest resilience. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2016, vol. 14, no. 7, pp. 369-378.
18. Abatzoglou J. T., Williams A. P. Impact of anthropogenic climate change on wildfire across western US forests. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2016, vol. 113, no. 42, pp. 11770-11775.
19. Wotton B. M. Interpreting and using outputs from the Canadian Forest Fire Danger Rating System in research applications. *Environmental and Ecological Statistics*, 2009, vol. 16, no. 2, pp. 107-131.
20. Cochrane M. A. Fire science for rainforests. *Nature*, 2003, vol. 421, pp. 913-919.
21. Yevich R., Logan J. A. An assessment of biofuel use and burning of agricultural waste in the developing world. *Global Biogeochemical Cycles*, 2003, vol. 17, 1095 p.
22. Dowdy A. J., Mills G. A., 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, vol. 10, 91 p.
23. Stuart M. A comparison of fire danger rating systems for use in forests. *Australian Meteorological and Oceanographic Journal*, 2009, no. 58, pp. 41-48.
24. *Natural Resources Canada. Background Information. Canadian Forest Fire Weather Index (FWI) System.* Available at: <http://cwffis.cfs.nrcan.gc.ca/background/summary/fwi> (accessed: 20.12.2019).
25. *Coos Forest Protective Association. National Fire Danger Rating System (NFDRS).* Available at: <https://www.coosfpa.net/nfdrs> (accessed: 20.12.2019).
26. Radeloff V. C., Halmers D. P., Kramer H. A., Mockrin M. H., Alexandre P. M., Bar-Massada A., Van Butsic, Hawbaker T. J., Martinuzzi S., Syphard A. D., Stewart S. I. Rapid growth of the US wildland-urban interface raises wildfire risk. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2018, vol. 115, no. 13, pp. 3314-3319.
27. Johnston L. M., Flannigan M. D. Mapping Canadian wildland fire interface areas. *International Journal of Wildland Fire*, 2018, vol. 27, no. 1, pp. 1-14.
28. Modugno S., Balzter H., Cole B., Borrelli P. Mapping regional patterns of large forest fires in Wildland-Urban Interface areas in Europe. *Journal of Environmental Management*, 2016, vol. 172, pp. 112-126.
29. *Ob utverzhenii klassifikatsii prirodnoi pozharnoi opasnosti lesov i klassifikatsii pozharnoi opasnosti v lesakh v zavisimosti ot uslovii pogody: prikaz Rosleskhoza ot 5 iulija 2011 g. № 287* [On approval of classification of natural fire hazard of forests and classification of fire hazard in forests depending on weather conditions: Order of the Federal Forestry Agency No. 287 dated July 5, 2011]. Available at: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_118509/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_118509/) (accessed: 20.12.2019).
30. GOST R 22.1.09-99. *Bezopasnost' v chrezvychainykh situatsiiakh. Monitoring i prognozirovaniye lesnykh pozharov. Obshchie trebovaniia* [GOST R 22.1.09-99. Safety in emergency situations. Monitoring and forecasting forest fires. General requirements]. Moscow, IPK Izd-vo standartov, 1999. 11 p.
31. Archibald S., Lehmann C. E. R., Gómez-Dans J. L., Bradstock R. A. Defining pyromes and global syndromes of fire regimes. *PNAS*, 2013, vol. 110, no. 16, pp. 6442-6447.
32. Krawchuk M. E., Moritz M. A., Parisien M. A., Van Dorn J., Hayhoe K. Global Pyrogeography: the Current and Future Distribution of Wildfire. *Plos ONE*, 2009, vol. 4, no. 4, 12 p.
33. Belotelova D. V. Dinamika kontsentratsii fitoplanktona Kaspiiskogo moria po dannym sputnikov SEAWIFS, MODIS [Dynamics of the Caspian Sea phytoplankton concentration according to data from SEAWIFS and MODIS]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2008, no. 3 (44), pp. 135-137.
34. Bustamante Rúa M. O., Daza Aragón A. J., Bustamante Baena P., Osorio Botero J. D. Statistical analysis to establish an ignition scenario based on extrinsic and intrinsic variables of coal seams that affect spontaneous combustion. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2019, vol. 29, pp. 731-737.
35. Jing L., Ng M. K., Huang J. Z. An entropy weighting k-means algorithm for subspace clustering of highdimensional sparse data. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 2007, vol. 19, no. 8, pp. 1026-1041.
36. Raykov Y. P., Boukouvalas A., Baig F., Little M. A. What to Do When K-Means Clustering Fails: A Simple yet Principled Alternative Algorithm. *PLoS ONE*, 2016, vol. 11, no. 9, pp. 1-28.
37. Arruda G. F., Costa L. F., Rodrigues F. A. A complex networks approach for data clustering. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2012, vol. 391, no. 23, pp. 6174-6183.
38. Fung G. A Comprehensive Overview of Basic Clustering Algorithms. *IEEE*, 2001, June, pp. 1-37.
39. *Data and services. EFFIS.* Available at: <https://effis.jrc.ec.europa.eu/applications/data-and-services/> (accessed: 21.12.2019).

40. Jennings C. R. Social and economic characteristics as determinants of residential fire risk in urban neighborhoods: A review of the literature. *Fire Safety Journal*, 2013, vol. 62, pp. 13-19.
41. Gigović L., Jakovljević G., Sekulović D., Regodić M. GIS Multi-Criteria Analysis for Identifying and Mapping Forest Fire Hazard: Nevesinje, Bosnia and Herzegovina. *Technical Vestnik*, 2015, vol. 25, no. 3, pp. 891-897.
42. Yiping Li, Jianjun Zhao, Xiaoyi Guo, Zhengxiang Zhang, Gang Tan, Jihong Yang. The Influence of Land Use on the Grassland Fire Occurrence in the Northeastern Inner Mongolia Autonomous Region, China. *Sensors*, 2017, vol. 17, 19 p.
43. Jang J. S. R. ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system. *IEEE Trans Syst Man Cybern*, 1993, vol. 23, pp. 665-685.

The article submitted to the editors 29.01.2020

### ***INFORMATION ABOUT THE AUTHOR***

***Stankevich Tatiana Sergeevna*** – Russia, 236022, Kaliningrad; Kaliningrad State Technical University; Candidate of Technical Sciences; Assistant Professor of the Department of Technosphere Safety; [tatiana.stankevich@klgtu.ru](mailto:tatiana.stankevich@klgtu.ru).

