

УДК 614.841.42

DOI: 10.37482/0536-1036-2021-1-20-34

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ПОВЕДЕНИЯ ЛЕСНОГО ПОЖАРА ПРИ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ И НЕСТАЦИОНАРНОСТИ ПРОЦЕССА

*Т.С. Станкевич, канд. техн. наук; ResearcherID: [O-7418-2017](https://orcid.org/0000-0002-8707-7187)*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8707-7187>*

Калининградский государственный технический университет, Советский просп., д. 1,  
г. Калининград, Россия, 236022; e-mail: [tatiana.stankevich@klgtu.ru](mailto:tatiana.stankevich@klgtu.ru)

**Аннотация.** Лесной фонд России, являясь достоянием народа и федеральной собственностью особого рода, требует устойчивого управления на национальном уровне. Один из ключевых принципов управления лесами – это обеспечение охраны и защиты лесов от угроз, в первую очередь от лесных пожаров. Хотя лесные пожары являются естественным компонентом лесных экосистем и не могут быть полностью устранены, в настоящее время выявлено снижение регулирующей функции лесного пожара и рост деструктивной. Понимание взаимосвязей факторов природной среды и динамики развития лесного пожара необходимо для разработки эффективных и научно обоснованных планов обеспечения безопасности лесов. Основной целью исследования является повышение эффективности формирования оперативного прогноза лесного пожара в сложных реальных условиях (при нестационарности и неопределенности). Проанализированы статистические данные о лесных пожарах в США, Канаде, России и пяти южных государствах – членах Европейского союза (Португалии, Испании, Франции, Италии и Греции) и подтвержден вывод об увеличении частоты возникновения крупных лесных пожаров. Представлены наиболее широко применяемые на практике модели прогнозирования динамики лесных пожаров (Van Wagner, Rothermel, Finney, Cruz и др.) и их компьютерные реализации (Prometheus, FlamMap, FARSITE, VISUAL-SEVEIF, WILDFIRE ANALYST). Предложена интеллектуальная система, предназначенная для построения оперативного прогноза лесного пожара посредством сверточных нейронных сетей CNN. Описана структура данной системы, включающая три основных подсистемы: информационную, интеллектуальную и пользовательского интерфейса. Ключевой элемент интеллектуальной подсистемы – это модель распространения лесных пожаров, которая распознает данные из последовательных изображений, прогнозирует динамику развития лесного пожара и генерирует изображение с прогнозом его распространения. Описана схема предлагаемой модели, включающая следующие этапы: ввод входных данных; предобработка входных данных; распознавание объектов с использованием сверточных нейронных сетей; прогнозирование динамики развития лесного пожара; вывод оперативного прогноза. Подробно представлены особенности реализации этапа «распознавание объектов с использованием сверточных нейронных сетей»: размер ядра для каждого сверточного слоя 3×3, функция активации ReLu(x), фильтр в слоях пулинга 2×2 с шагом 2, метод пулинга – max-pooling, на выходе сетей – методы Object recognition и Semantic segmentation.

**Для цитирования:** Станкевич Т.С. Прогнозирование пространственного поведения лесного пожара при неопределенности и нестационарности процесса // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 1. С. 20–34. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-1-20-34

**Финансирование:** Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 18-37-00035 «мол\_а».

**Ключевые слова:** лес, лесной пожар, оперативный прогноз, неопределенность, нестационарность, сверточные нейронные сети, интеллектуальная система.

*Введение*

Понятие «лес» в Лесном кодексе Российской Федерации (РФ) имеет два значения: с одной стороны [8], лес – это один из важнейших возобновляемых природных ресурсов страны, реализующий удовлетворение потребностей общества при условии обеспечения многоцелевого, рационального, непрерывного, неистощительного его использования, с другой – это естественные экологические системы, реализующие средообразующие и средозащитные функции. При этом лесной фонд страны, как выполняющий критически важную и разностороннюю роль для населения, что указано в нормах действующего российского законодательства [7, 8], подлежит охране и требует обеспечения устойчивого развития и рационального использования.

Россия, являясь страной-участницей Монреальского процесса [10], реализует политику по сохранению и устойчивому управлению бореальными лесами и лесами умеренного пояса. Для оценки и анализа национальных трендов в области устойчивого управления лесами в России применяется ряд критериев и соответствующих им индикаторов – количественных и качественных характеристик оценки степени выполнения указных критериев. При этом устойчивое управление лесами включает в себя задачу обеспечения охраны и защиты лесов от широкого перечня угроз, в том числе и от лесных пожаров.

Согласно законодательству РФ [1, 2], под лесным пожаром понимается неконтролируемое горение, развивающееся во времени и пространстве и распространяющееся по лесной площади. Лесные пожары представляют собой неконтролируемое движение огня по территории леса и относятся к наиболее разрушительным стихийным бедствиям [43].

Как указано в [25], на земном шаре в течение последних двух столетий около 6 млн км<sup>2</sup> лесов погибли по различным причинам, основная из них – лесные пожары, которые являются естественным компонентом лесных экосистем и не могут быть полностью устранены [24].

В последние десятилетия во всем мире лесные пожары из эффективного эволюционно-экологического фактора, регулирующего структуру и динамику лесов, превращаются в катастрофическое явление, приносящее значительный ущерб [20]. Так, авторы [23] указывают, что в случае продолжения процесса изменения климата в соответствии с прогнозом возрастет частота появления крупных лесных пожаров. При этом, как считают ученые, увеличение частоты возникновения этих пожаров повлечет за собой рост ежегодных затрат на обеспечение пожарной безопасности лесов и борьбу с пожарами. Исследователи [32] отмечают, что частота лесных пожаров значительно возросла во всем мире за последние десятилетия. Кроме того, ученые [31] утверждают, что лесные пожары становятся все более распространенными, отчасти из-за глобального потепления. Как отмечено в работе [31], летние периоды стали жарче и суше, чем раньше, ветры усиливаются и стабильность дождливых периодов нарушается, но прежде всего эти изменения являются результатом влияния человеческого фактора.

Статистические данные Рослесхоза [5], EFFIS [26], US Wildfires [45] и National Forestry Database [30], представленные в табл. 1, 2, подтверждают сформулированные выше выводы. Как видно из табл. 1, с 2009 по 2018 г. площадь лесных земель, пострадавших в результате лесных пожаров, в РФ увеличилась приблизительно в 3 раза. В тот же период зарегистрировано снижение количества пожаров на территории России более чем на 50 % (табл. 2).

Согласно табл. 1 и 2, общероссийский тренд соответствует ситуации, сложившейся в США, Европе и Канаде: в США с 2009 по 2018 г. площадь земель, уничтоженных в результате лесных пожаров, увеличилась примерно в 1,5 раза, а их количество с 2000 по 2018 г. сократилось в 1,7 раза; в странах Европейского Союза (ЕС) (Португалия, Испания, Франция, Италия и Греция) с 2009 по 2018 г. площадь уничтоженных земель выросла в 2,7 раза, а их количество с 1992 по 2017 г. снизилось в 2 раза; в Канаде с 2009 по 2018 г. площадь лесных пожаров возросла в 2,9 раза, а их количество с 1992 по 2018 г. сократилось в 1,3 раза.

Таблица 1

**Площадь лесных земель (га), уничтоженная пожарами с 2009 по 2018 г.**

Год	РФ [5]	США [45]	Канада [30]	ЕС* [26]
2009	2 565 765	2 393 643	775 025	333 207
2010	1 962 333	1 385 167	3 052 473	253 664
2011	1 367 467	3 525 365	2 428 798	286 522
2012	2 054 025	3 731 865	2 003 270	535 694
2013	1 158 024	1 743 052	4 210 137	291 101
2014	3 190 697	1 451 834	4 563 327	136 114
2015	2 748 920	4 097 502	3 861 647	227 410
2016	2 508 264	2 204 128	1 416 034	317 989
2017	3 282 089	3 958 255	3 419 856	895 738
2018	7 408 409	3 473 259	2 272 274	109 808

\*Здесь и далее, в табл. 2: Португалия, Испания, Франция, Италия, Греция.

Согласно [11, 26], социальный ущерб от лесных пожаров также значителен. Так, на территории РФ от лесных пожаров в период с 2016 по 2018 г. погибло 14 человек, 31 человек пострадал при тушении лесных пожаров; в пяти южных государствах – членах ЕС (Португалии, Испании, Франции, Италии и Греции) с 2016 по 2017 г. погибло 88 человек, при тушении пострадало 84 человека.

Хотя возникновение и развитие лесных пожаров обусловлено региональными метеорологическими и климатическими особенностями и типом региональной лесной растительности, в настоящее время глобальная статистика лесных пожаров позволяет проследить тенденцию к сокращению количества пожаров при параллельном росте ущерба. Таким образом, вывод исследователей об увеличении частоты возникновения крупных лесных пожаров, озвученный в статьях [20, 23, 31, 32], подтверждается.

Хотя усилия по предотвращению лесных пожаров являются основной задачей охраны и защиты лесов и играют критически важную роль в устойчивом управлении лесным фондом [35], необходимо иметь инструменты по подготовке эффективных управленческих решений, направленных на сдерживание уже начавшегося пожара [36]. Понимание взаимосвязей основополагающих факторов природной среды и пространственного поведения лесного пожара имеет решающее значение для разработки эффективных и научно обоснованных планов борьбы с лесными пожарами.

Таблица 2

## Число случаев лесных пожаров с 1992 по 2018 г.

Год	РФ [5]	США [45]	Канада [30]	ЕС* [26]
1992	25 777	–	9 068	52 134
1993	18 428	–	6 043	51 942
1994	20 287	–	9 763	57 215
1995	25 951	–	8 486	75 322
1996	32 834	–	6 349	62 399
1997	31 300	–	6 148	67 707
1998	26 663	–	10 723	74 793
1999	36 673	–	7 633	57 092
2000	22 421	92 250	5 349	74 006
2001	23 700	83 996	7 753	60 058
2002	43 418	73 423	7 861	56 256
2003	33 050	63 269	8 230	62 983
2004	27 171	65 878	6 680	55 217
2005	19 249	66 546	7 542	75 382
2006	32 524	96 326	9 820	47 942
2007	17 812	85 583	6 917	45 644
2008	26 285	76 753	6 278	36 235
2009	23 245	79 513	7 210	53 047
2010	34 812	71 839	7 291	43 583
2011	21 074	74 126	4 723	55 926
2012	20 238	67 265	7 956	52 595
2013	9 991	46 615	6 264	35 938
2014	16 865	63 345	5 158	23 425
2015	12 337	61 922	7 140	38 171
2016	11 025	65 575	5 203	31 933
2017	10 922	66 131	5 652	48 136
2018	12 125	55 911	7 067	26 434

Цель исследования – повышение эффективности формирования оперативного прогноза лесного пожара в условиях нестационарности и неопределенности. Для этого предложено разработать интеллектуальную систему, предназначенную для построения оперативного прогноза лесного пожара посредством сверточных нейронных сетей CNN.

*Объекты и методы исследования*

Лесные пожары, как указано в [44], являются результатом взаимодействия различных элементов социально-экономического, политического и культурного характера, при этом масштаб и интенсивность пожаров определяют климатические факторы.

Прогнозирование возникновения и распространения лесных пожаров – ключевая проблема для разработки стратегий управления ими. Основные исследования ученых сосредоточены на построении моделей прогнозирования возникновения пожаров. В последнее десятилетие для этого активно используются современные информационные технологии. Для оценки вероятности возникновения лесных пожаров предлагается применять технологии географической информационной системы (ГИС) и дистанционного зондирования земли (ДЗЗ) [17, 21, 42], а также искусственные нейронные сети [34], нечеткую логику [18] и адаптивную нейро-нечеткую систему логического вывода [19].

Однако необходимо иметь инструменты прогнозирования поведения лесного пожара в зависимости от факторов среды, что позволит принимать эффективные решения при борьбе с огнем. Понимание пространственных закономерностей распространения пожаров в сложных условиях (при неопределенности, нестационарности и ограниченности временных ресурсов) является ключевым для совершенствования управления лесной безопасностью, особенно в ситуации глобальных изменений климата.

К наиболее широко используемым моделям инициирования и распространения пожара относятся следующие: Van Wagner, 1977 [46]; Rothermel, 1991 [41]; Finney, 1998 [28]; Cruz, 2005 [22]. В последние годы ученые предлагают новые модели. Например, в работах [12, 38] рассматривается математическая модель распространения и воздействия поверхностных и кроновых лесных пожаров на базе 3-мерной многофазной физической модели. В публикации [4] описаны новые подходы к моделированию лесных пожаров и предложены новые способы их тушения, в [6] изучены процессы инициирования и пространственного распространения пожара в условиях многослойности и двухтемпературности для гористой местности. Особенности моделирования распространения лучистого теплового потока в случае лесного пожара при неоднородном рельефе местности исследованы в работе [9].

В последнее десятилетие широкое распространение получила интеграция моделей прогнозирования распространения лесного пожара в компьютерные системы для упрощения их использования в практической деятельности различных служб. К наиболее популярным компьютерным системам относятся: Prometheus [39]; FlamMap [29]; FARSITE [27]; VISUAL-SEVEIF [40] и WILDFIRE ANALYST [48].

Существующие традиционные модели прогнозирования лесного пожара имеют ряд существенных недостатков: ограниченную функциональность в условиях нестационарности и неопределенности; низкую точность прогноза; значительные временные и вычислительные затраты, что делает их малоприменимыми в условиях оперативного прогнозирования; возможность учета только ограниченного набора факторов окружающей среды [16], что обуславливает определенные ограничения при их применении.

Прорыв в области информационных технологий стал причиной активного использования элементов AI, Big Data и Deep machine learning для решения разнообразных задач и в области обеспечения пожарной безопасности. В работе

[16] обоснована возможность применения сверточных нейронных сетей CNN в качестве эффективного инструмента формирования оперативного прогноза пространственного распространения лесного пожара в реальных условиях (при неопределенности и нестационарности).

#### *Результаты исследования и их обсуждение*

Предложено разработать интеллектуальную систему прогнозирования динамики развития лесного пожара, состоящую из следующих подсистем: информационной, интеллектуальной и пользовательского интерфейса.

Для эффективного функционирования информационной подсистемы по выполнению задач сбора и хранения данных, вывода в удобном виде требуемых данных для пользователя и обмена данными между подсистемами системы построена база визуальных данных [15]. Визуальные данные получены следующим образом: данные о распространении пожара – через систему управления ресурсами FIRMS NASA [37], содержащую сведения от 36-канального спектрорадиометра с умеренным спектральным разрешением MODIS и 22-канального радиометра VIIRS; данные о характере лесных насаждений – из глобальной годовой карты Land Cover Map Европейского космического агентства European Space Agency (ESA) Climate Change Initiative (CCI) [33], построенной благодаря 15-канальному спектрометру со средним спектральным разрешением MERIS (с полным разрешением FR и уменьшенным разрешением RR), 6-канальному радиометру с высоким спектральным разрешением AVHRR, системе визуализации, работающей в четырех спектральных диапазонах (синем, красном, ближнем инфракрасном и коротковолновом инфракрасном), SPOT-Vegetation на спутнике PROBA-V; данные о факторах окружающей среды (о температуре воздуха на высоте 2 м над поверхностью земли, относительной влажности воздуха, скорости ветра на высоте 10 м над поверхностью земли) – с использованием Ventusky InMeteo [47], применяющим основные глобальные и региональные метеорологические модели погоды (глобальные модели – ICON, GFS и GEM; региональные модели – ICON, HRRR и COSMO). Пример расчетных параметров приведен на рис. 1.

Планируется, что в процессе реализации подсистемы пользовательского интерфейса будет осуществляться взаимодействие между пользователем и элементами системы через диалоговые окна при решении управленческих задач, в процессе приобретения знаний и объяснения результатов.

Интеллектуальная подсистема – это рабочий модуль всей системы, содержащий соответствующую модель динамики развития лесного пожара и блок построения сетей CNN.

На рис. 2 представлена модель пространственного развития лесного пожара, включающая следующие этапы.

Ввод входных данных в виде изображений в формате JPEG.

Этап 1 – Предобработка входных данных.

Этап 2 – Распознавание объектов с использованием сверточных нейронных сетей.

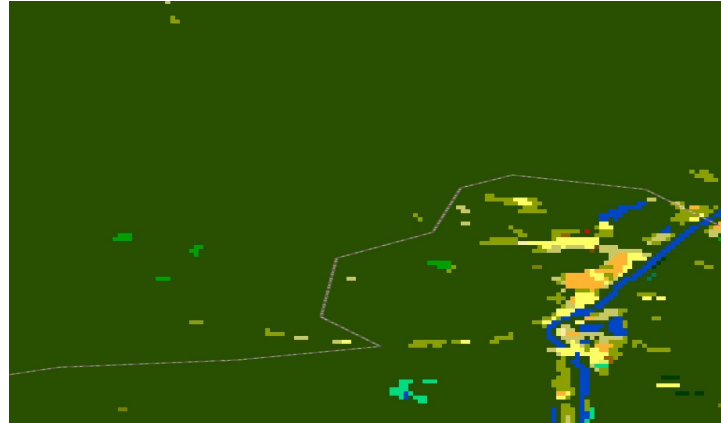
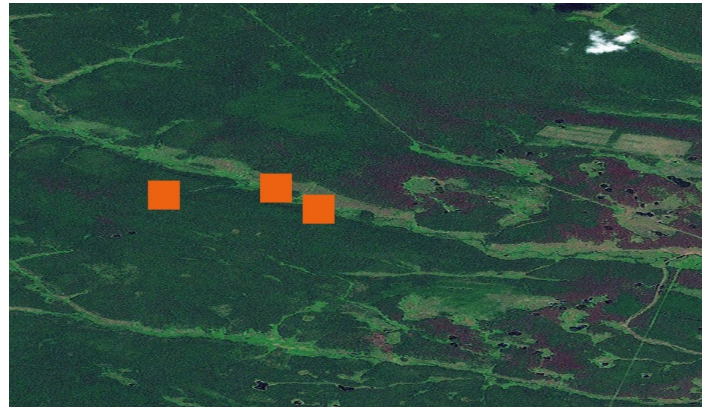
*а**б*

Рис. 1. Расчетные параметры прогнозирования динамики развития лесного пожара: *а* – данные о характере лесных насаждений из глобальной годовой карты Land Cover Map; *б* – данные о распространении лесного пожара через систему управления ресурсами FIRMS NASA (при температуре воздуха 5 °С на высоте 2 м над поверхностью земли, относительной влажности воздуха 70 % и скорости ветра 4 м/с на высоте 10 м над поверхностью земли)

Fig. 1. Calculated parameters for forecasting the forest fire dynamics: *a* – data on the nature of forest plantations from the annual global Land Cover Map; *b* – data on the spread of forest fire through the NASA's Fire Information for Resource Management System (at an air temperature of 5 °C and 2 m above the ground, relative humidity of 70 % and wind speed of 4 m/s at 10 m above the ground)

2.1. Распознавание данных о пожаре: на вход подается преобработанное цветное 3-канальное изображение разрешением 400×400 пикселей. Сверточная нейронная сеть для распознавания объектов на изображении (данных о лесном пожаре) содержит вход, сверточные слои, слои пулинга, полносвязные слои, выход. При этом размер ядра для каждого сверточного слоя равен 3×3, а в качестве функции активации применена функция ReLu(x). В слоях пулинга использован фильтр 2×2 с шагом 2, в качестве метода пулинга выбран метод max-pooling. На выходе сверточной нейронной сети использован метод Object recognition.

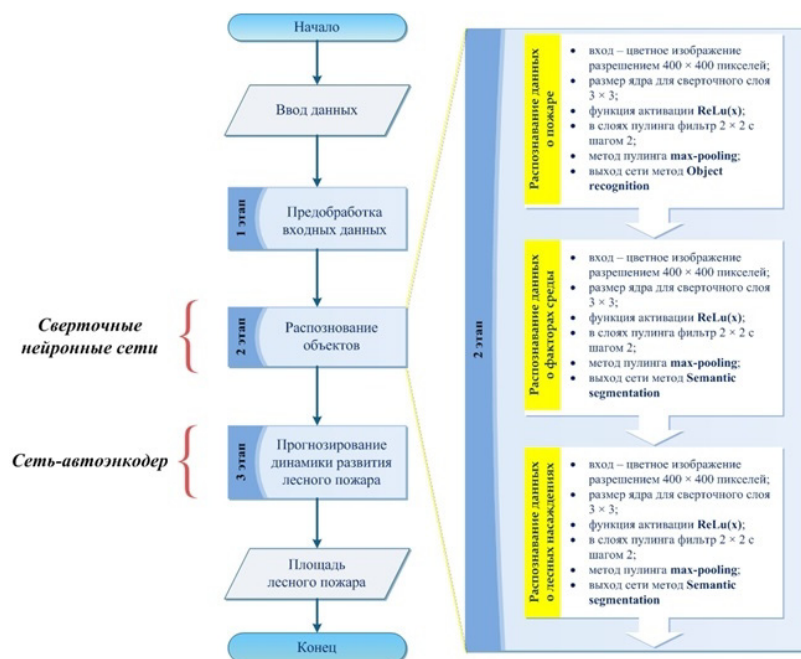


Рис. 2. Блок-схема прогнозирования динамики развития лесного пожара с использованием сверточных нейронных сетей и сети-автоэнкодера

Fig. 2. Flowchart of forecasting the forest fire dynamics using convolutional neural networks and an autoencoder

В сверточных слоях выполняется операция свертки, где на ввод подается изображение, а вывод представляет собой карту признаков. Выбор функции  $\text{ReLU}(x)$  в сверточных слоях обусловлен тем, что функция  $\text{ReLU}(x)$  устраняет проблему крайне малого градиента при больших значениях  $x$ , увеличивает разреженность значений у внутренних слоев сети для обеспечения нелинейности. Слои пулинга выполняют операцию уменьшения размера карты признаков и ориентированы на поиск более глобальных признаков в изображении. Выбор метода  $\text{max-pooling}$  в слоях пулинга обеспечивает ускорение сходимости во время обучения параметров сети. Полносвязная нейронная сеть типа персептрон используется для вывода результата распознавания объекта – лесного пожара. Метод обучения – метод обратного распространения ошибки, в качестве обучающего и тестового набора применены данные из визуальной базы данных [15].

2.2. Распознавание данных о факторах окружающей среды (температуре воздуха на высоте 2 м над поверхностью земли, относительной влажности воздуха, скорости ветра на высоте 10 м над поверхностью земли). Содержание пункта 2.2 соответствует пункту 2.1, однако цель распознавания – решение задачи определения цвета фона (а не объекта, как для описанной выше сверточной нейронной сети). Для этого разрабатывается сверточная нейронная сеть, схожая с сетью из пункта 2.1, но ее отличительной особенностью является использование на выходе сети *Semantic segmentation* вместо *Object recognition*. Предложено выполнить построение ансамбля из трех сверточных нейронных сетей. Первая сеть выполняет распознавание фона для оценки температуры воздуха на высоте 2 м над поверхностью земли. Возможный диапазон цветов фона, демонстрирующего в визуальном виде данные



о температуре воздуха:  $-40$  °С – светло-серый,  $-30$  °С – светло-сиреневый,  $-20$  °С – фиолетовый,  $-15$  °С – темно-синий,  $-10$  °С – синий,  $-5$  °С – голубой,  $0$  °С – бирюзовый,  $5$  °С – зеленый,  $10$  °С – светло-зеленый,  $15$  °С – желтый,  $20$  °С – песочный,  $25$  °С – оранжевый,  $30$  °С – лиловый,  $40$  °С – темно-фиолетовый,  $50$  °С – темно-коричневый. Вторая сверточная нейронная сеть выполняет распознавание фона для оценки скорости ветра на высоте  $10$  м над поверхностью земли. Возможный диапазон цветов фона, демонстрирующего в визуальном виде данные о скорости воздуха следующий:  $0$  м/с – серо-синий,  $2$  м/с – сине-фиолетовый,  $4$  м/с – синий,  $6$  м/с – светло-синий,  $18$  м/с – бирюзовый,  $10$  м/с – травяной,  $12$  м/с – зеленый,  $14$  м/с – светло-зеленый,  $18$  м/с – желтый,  $22$  м/с – песочный,  $26$  м/с – оранжевый,  $30$  м/с – лиловый,  $34$  м/с – фиолетовый,  $38$  м/с – темно-фиолетовый,  $42$  м/с – темно-коричневый. Третья сверточная нейронная сеть осуществляет распознавание фона для оценки относительной влажности воздуха. Возможный диапазон цветов фона, демонстрирующего в визуальном виде данные об относительной влажности воздуха: хаки соответствует значению от  $0$  до  $40$  %; серый хаки –  $50$  %; серый –  $60$  %; серебряный –  $70$  %; светло-серый –  $80$  %; циркон –  $90$  %; белый –  $100$  %.

2.3. Распознавание данных о характере лесных насаждений: содержание пункта 2.3 аналогично содержанию пункта 2.2. Возможный диапазон цветов фона, демонстрирующего в визуальном виде данные о характере лесных насаждений: светло-желтый, оранжевый, светло-оранжевый, армейский хаки, светло-голубой, темно-коричневый, коричневый соответствуют траве, лугу; желтый, ярко-желтый – кустарникам; зеленый, ярко-зеленый – деревьям лиственным, лесу лиственному; темно-зеленый – деревьям вечнозеленым, лесу хвойному; травяной – деревьям лиственным и вечнозеленым, смешанному лесу.

Этап 3 – Прогнозирование динамики развития лесного пожара.

Формирование оперативного прогноза в условиях неопределенности и нестационарности в зависимости от влияния параметров среды. Для построения прогноза разработана сеть, сходная по структуре с сетью-автоэнкодером (искусственной нейронной сетью, обеспечивающей воспроизведение на выходе входных данных) и содержащая сверточные и разверточные слои. Используемый метод обучения – обучение без учителя, в качестве обучающего и тестового набора применены данные из визуальной базы данных [15].

Вывод сгенерированного изображения с оперативным прогнозом (карта местности с выделенной областью с координатами области распространения пожара во времени).

В ходе оценки экономической эффективности интеллектуальной системы, предназначенной для построения оперативного прогноза лесного пожара посредством сверточных нейронных сетей CNN, использована методика [3]. Она направлена на сравнение затрат на разработку / приобретение предлагаемой системы с последующим ее обслуживанием и ущерба, наносимого лесным пожаром. Входные параметры и полученные результаты представлены в табл. 3.

Выполнена оценка только прямого ущерба, без учета косвенного ущерба от лесного пожара. Затраты на функционирование системы составили  $5$  % от стоимости разработки/приобретения программного продукта, а дополнительные затраты на эксплуатацию системы –  $3$  %, как рекомендовано в [13]. Для оценки затрат на устранение негативного воздействия на окружающую природную среду, согласно [14], применено значение показателя  $5,5$  тыс. р./га, а на ликви-

дацию последствий пожара путем восстановления качества окружающей природной среды – 156 тыс. р./га. Расчет стоимости сохраненных материальных ценностей в результате использования программного продукта выполнен с учетом уменьшения времени тушения верхового пожара на 1 ч, что позволит сократить площадь уничтоженного леса при скорости ветра 4 м/с примерно на 3,5 га (при начальном периметре пожара 400 м и времени от возникновения до его ликвидации 1 сут). Снижение временных затрат обусловлено высокой производительностью предварительно обученной системы, поскольку пользователь не расходует время на обучение сетей, а сразу выполняет прогнозирование.

Таблица 3

**Результаты оценки экономической эффективности интеллектуальной системы построения оперативного прогноза лесного пожара**

Параметр	Значение, тыс. р.
Общие затраты на разработку / приобретение и эксплуатацию программы с учетом круглосуточной работы в течение 1-го года	730
В том числе:	
на разработку / приобретение программного продукта	300
на приобретение необходимого для функционирования программы оборудования	50
на установку программы	0
на эксплуатацию программы	0
на содержание персонала по обслуживанию программы	300
на функционирование программы	50
дополнительные – на эксплуатацию программы	30
Социально-экономический ущерб от 1-го лесного пожара	80 750
В том числе:	
на ликвидацию последствий негативного воздействия на окружающую природную среду	2 750
на восстановление качества окружающей природной среды	78 000
Затраты на тушение 1-го лесного пожара	1 000
В том числе:	
на эвакуацию людей из зоны поражения	0
на проведение работ по локализации и ликвидации пожара	1 000
Социально-экономический ущерб из-за поражения людей опасными факторами пожара	0
Общая сумма ущерба от 1-го лесного пожара	83 290
Стоимость сохраненных материальных ценностей в результате использования программного продукта	1 000
Прибыль от применения программы в течение 1-го года	270
Экономическая эффективность внедрения системы, %	+37

*Заключение*

Таким образом, для решения управленческой задачи локализации и ликвидации лесного пожара в сложных условиях предложено разработать и внедрить интеллектуальную систему прогнозирования динамики развития лесного пожара, базирующуюся на применении элементов искусственного интеллекта и глубокого машинного обучения (сверточных нейронных сетей).

Выполнено построение структурной схемы такой системы. Согласно представленной схеме, в состав интеллектуальной системы, предназначенной для построения оперативного прогноза лесного пожара посредством сверточных нейронных сетей CNN, входят информационная подсистема, интеллектуальная подсистема и подсистема пользовательского интерфейса.

Информационная подсистема базируется на визуальной базе данных, в которой содержатся данные о распространении пожара, характере лесных насаждений и факторах окружающей среды. Подсистема пользовательского интерфейса реализует взаимодействие с программой. Интеллектуальная подсистема системы включает разработку модели распространения лесных пожаров, которая распознает данные из последовательных изображений, прогнозирует динамику развития лесного пожара и генерирует изображение с прогнозом распространения пожара. Описана схема предлагаемой модели, включающая следующие этапы: ввод входных данных; предобработка входных данных; распознавание объектов с использованием сверточных нейронных сетей; прогнозирование динамики развития лесного пожара; вывод оперативного прогноза. Подробно представлены особенности реализации этапа «распознавание объектов с использованием сверточных нейронных сетей»: размер ядра для каждого сверточного слоя  $3 \times 3$ , функция активации  $\text{ReLu}(x)$ , фильтр в слоях пулинга  $2 \times 2$  с шагом 2, метод пулинга  $\text{max-pooling}$ , на выходе сетей методы Object recognition и Semantic segmentation.

В качестве конечной продукции, которая будет производиться с применением результатов научного исследования, рассматривается интеллектуальная система прогнозирования динамики развития лесного пожара. Она будет использоваться для предварительного планирования организации тактики тушения лесного пожара и в процессе координации действий соответствующих подразделений при тушении лесного пожара в режиме реального времени. Предусматривается возможность применения программного продукта в научных и образовательных целях.

В настоящее время планируются дополнительная настройка входящих в состав модели искусственных нейронных сетей и подача заявки на государственную регистрацию программы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. ГОСТ 17.6.1.01–83. Охрана природы. Охрана и защита лесов. Термины и определения: дата введения 1985–01–01. М.: Изд-во стандартов, 2002. 6 с. [*State Standard. GOST 17.6.1.01–83. Nature Protection. Forest Protection and Preservation. Terms and Definitions.* Moscow, Izdatel'stvo standartov, 2002, 6 p.]
2. ГОСТ 12.3.046–91. Система стандартов безопасности труда. Установки пожаротушения автоматические. Общие технические требования: дата введения 1993–01–01. М.: Изд-во стандартов, 2002. 4 с. [*State Standard. GOST 12.3.046–91. Occupational Safety Standards System. Automatic Fire Fighting Systems. General Technical Requirements.* Moscow, Izdatel'stvo standartov, 2002. 4 p.]
3. ГОСТ Р ИСО / МЭК 9126–93. Информационная технология. Оценка программной продукции. Характеристики качества и руководства по их применению: дата введения 1994–07–01. М.: Изд-во стандартов, 2004. 10 с. [*State Standard RF ISO/IEC. GOST R ISO/IEC 9126–93. Information Technology. Software Product Evaluation. Quality Characteristics and Guidelines for Their Use.* Moscow, Izdatel'stvo standartov, 2004. 10 p.]
4. Гришин А.М. Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1992. 405 с. [Grishin A.M. *Math-*

*emational Modeling of Forest Fires and New Fire Fighting Techniques*. Novosibirsk, Nauka Publ., 1992. 405 p.].

5. ЕМИСС. Режим доступа: <https://fedstat.ru> (дата обращения: 06.11.19). [*Website of the Unified Interdepartmental Statistical Information System (UISIS)*].

6. Катаева Л.Ю. Анализ динамических процессов аварийных ситуаций природного и техногенного характера: дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Н. Новгород, 2009. 328 с. [Katayeva L.Yu. *Analysis of Dynamic Processes of Natural and Technogenic Emergency Situations*: Dr. Phys.-Math. Sci. Diss. Nizhny Novgorod, 2009. 328 p.].

7. Конституция Российской Федерации: от 12.12.1993 г. Режим доступа: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_28399/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_28399/) (дата обращения: 06.11.19). [*Constitution of the Russian Federation Dated December 12, 1993*].

8. Лесной кодекс Российской Федерации: федер. закон от 04.12.2006 г. № 200-ФЗ: принят Гос. Думой 08.11.2006 г. Режим доступа: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_64299/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_64299/) (дата обращения: 06.11.19). [*Forest Code of the Russian Federation Dated December 4, 2006: the Federal Law No. 200-FZ*].

9. Масленников Д.А. Особенности математического моделирования распространения лучистого теплового потока от очага горения при лесных пожарах на неоднородном рельефе: дис. ... канд. физ.-мат. наук. Н. Новгород, 2012. 109 с. [Maslennikov D.A. *Features of Mathematical Modeling of Radiant Heat Flux Propagation from Burning Source in Case of Forest Fires on Heterogeneous Relief*: Cand. Phys.-Math. Sci. Diss. Nizhny Novgorod, 2012. 109 p.].

10. Национальный доклад Российской Федерации по критериям и индикаторам сохранения и устойчивого управления умеренными и бореальными лесами (Монреальский процесс 2003 г.) // The Montreal Process. Режим доступа: [https://www.montreal-process.org/documents/publications/general/2003/RussiaR/main.html#\\_Toc45611963](https://www.montreal-process.org/documents/publications/general/2003/RussiaR/main.html#_Toc45611963) (дата обращения: 06.11.19). [*Russia's Report on the Montreal Process. Criteria and Indicators for the Conservation and Sustainable Management of Temperate and Boreal Forests*. 2003].

11. Ответ Федерального агентства лесного хозяйства № НК-09-50/8211 от 13.05.2019 г. [*The Answer of the Federal Agency for Forestry No. NK-09-50/8211 Dated May 13, 2019*].

12. Перминов В.А. Математическое моделирование возникновения верховых и массовых лесных пожаров: дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Томск, 2010. 282 с. [Perminov V.A. *Mathematical Modeling of the Occurrence of Crown and Large Forest Fires*: Dr. Phys.-Math. Sci. Diss. Tomsk, 2010. 282 p.].

13. Поддубный А. Расчет экономического эффекта от внедрения системы автоматизации // Antegra consulting. Режим доступа: [http://www.antegra.ru/news/experts/\\_det-experts/4/](http://www.antegra.ru/news/experts/_det-experts/4/) (дата обращения: 06.11.19). [Poddubnyy A. Calculation of the Economic Effect from the Automation System Implementation. *Antegra Consulting*].

14. Порфирьев Б. Пожар по приказу // Эксперт. 2019. № 34(1130). Режим доступа: <https://expert.ru/expert/2019/34/pozhar-po-prikazu/> (дата обращения: 06.11.19). [Porfiriev B.N. Fire by Order. *Ekspert* [Expert], no. 34(1130)].

15. Свидетельство о регистрации базы данных «Лесные пожары» № 2019620918 от 30.05.2019 г. / Станкевич Т.С. № 2019620843: заявл. 13.05.2019: опубл. 30.05.2019 [Stankevich T.S. *Forest Fires*. Certificate of State Registration of the Database No. RU2019620918, 2019].

16. Станкевич Т.С. Применение сверточных нейронных сетей для решения задачи оперативного прогнозирования динамики распространения лесных пожаров // Бизнес-информатика. 2018. № 4(46). С. 17–27. [Stankevich T.S. The Use of Convolutional Neural Networks to Forecast the Dynamics of Spreading Forest Fires in Real Time. *Biznes-informatika* [Business Informatics], 2018, vol. 4(46), pp. 17–27]. DOI: [10.17323/1998-0663.2018.4.17.27](https://doi.org/10.17323/1998-0663.2018.4.17.27)

17. Adab H., Kanniah K.D., Solaimani K. Modeling Forest Fire Risk in the North-east of Iran Using Remote Sensing and GIS Techniques. *Natural Hazards*, 2013, vol. 65, pp. 1723–1743. DOI: [10.1007/s11069-012-0450-8](https://doi.org/10.1007/s11069-012-0450-8)
18. Agarwal P.K., Patil P.K., Mehal R. A Methodology for Ranking Road Safety Hazardous Locations Using Analytical Hierarchy Process. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*, 2013, vol. 104, pp. 1030–1037. DOI: [10.1016/j.sbspro.2013.11.198](https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.11.198)
19. Angayarkkani K., Radhakrishnan N. An Effective Technique to Detect Forest Fire Region through ANFIS with Spatial Data. *3rd International Conference on Electronics Computer Technology, Kanyakumari, April 8–10, 2011*. Kanyakumari, India, IEEE, 2011, pp. 24–30. DOI: [10.1109/ICECTECH.2011.5941794](https://doi.org/10.1109/ICECTECH.2011.5941794)
20. Byram G.M. Combustion of Forest Fuels. *Forest Fire: Control and Use*. Ed. by K.P. Davis. New York, McGraw-Hill, 1959, pp. 61–89.
21. Chuvieco E., Aguadoa I., Yebraa M., Nieto H., Salas J., Martín M.P. et al. Development of a Framework for Fire Risk Assessment Using Remote Sensing and Geographic Information System Technologies. *Ecological Modelling*, 2010, vol. 221, iss. 1, pp. 46–58.
22. Cruz M.G., Alexander M.E., Wakimoto R.H. Development and Testing of Models for Predicting Crown Fire Rate of Spread in Conifer Forest Stands. *Canadian Journal of Forest Research*, 2005, vol. 35, no. 7, pp. 1626–1639. DOI: [10.1139/x05-085](https://doi.org/10.1139/x05-085)
23. Davis R., Yang Z., Yost A., Belongie C., Cohen W. The Normal Fire Environment – Modeling Environmental Suitability for Large Forest Wildfires Using Past, Present, and Future Climate Normals. *Forest Ecology and Management*, 2017, vol. 390, pp. 173–186. DOI: [10.1016/j.foreco.2017.01.027](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.01.027)
24. Dimopoulou M., Giannikos I. Spatial Optimization of Resources Deployment for Forest Fire Management. *International Transactions in Operational Research*, 2001, vol. 8, iss. 5, pp. 523–534. DOI: [10.1111/1475-3995.00330](https://doi.org/10.1111/1475-3995.00330)
25. Dimopoulou M., Giannikos I. Towards an Integrated Framework for Forest Fire Control. *European Journal of Operational Research*, 2002, vol. 152, iss. 2, pp. 476–486. DOI: [10.1016/S0377-2217\(03\)00038-9](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(03)00038-9)
26. *European Forest Fire Information System (EFFIS)*. Available at: <http://effis.jrc.ec.europa.eu> (accessed 06.11.19).
27. *FARSITE. Fire Area Simulator*. Available at: <https://www.firelab.org/project/farsite> (accessed 06.11.19).
28. Finney M.A. *FARSITE: Fire Area Simulator – Model Development and Evaluation*. Research Paper RMRS-RP-4. Ogden, UT, Rocky Mountain Research Station, 1998. 47 p. DOI: [10.2737/RMRS-RP-4](https://doi.org/10.2737/RMRS-RP-4)
29. *FlamMap. Fire Analysis Desktop Application*. Available at: <https://www.firelab.org/project/flammap> (accessed 06.11.19).
30. Forest Fires Data. *National Forestry Database*. Available at: <http://nfdp.ccfm.org/en/data/fires.php#tab311> (accessed 06.11.19).
31. Gigović L., Pourghasemi H.R., Drobnjak S., Bai S. Testing a New Ensemble Model Based on SVM and Random Forest in Forest Fire Susceptibility Assessment and Its Mapping in Serbia's Tara National Park. *Forests*, 2019, vol. 10, iss. 5, art. 408. DOI: [10.3390/f10050408](https://doi.org/10.3390/f10050408)
32. Guo F., Selvaraj S., Lin F., Wang G., Wang W., Su Z., Liu A. Geospatial Information on Geographical and Human Factors Improved Anthropogenic Fire Occurrence Modeling in the Chinese Boreal Forest. *Canadian Journal of Forest Research*, 2016, vol. 46, no. 4, pp. 582–594. DOI: [10.1139/cjfr-2015-0373](https://doi.org/10.1139/cjfr-2015-0373)
33. *Land Cover Map ESA/CCI*. Available at: <http://maps.elie.ucl.ac.be/CCI/viewer/> (accessed 06.11.19).
34. Maeda E.E., Formaggio A.R., Shimabukuro Y.E., Arcoverde G.F.B, Hansen M.C. Predicting Forest Fire in the Brazilian Amazon Using MODIS Imagery and Artificial Neural

Networks. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2009, vol. 11, iss. 4, pp. 265–272. DOI: [10.1016/j.jag.2009.03.003](https://doi.org/10.1016/j.jag.2009.03.003)

35. Martínez J., Vega-García C., Chuvieco E. Human-Caused Wildfire Risk Rating for Prevention Planning in Spain. *Journal of Environmental Management*, 2009, vol. 90(2), pp. 1241–1252. DOI: [10.1016/j.jenvman.2008.07.005](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.07.005)

36. Mavsar R., Cabán A.G., Varela E. The State of Development of Fire Management Decision Support Systems in America and Europe. *Forest Policy and Economics*, 2013, vol. 29, pp. 45–55. DOI: [10.1016/j.forpol.2012.11.009](https://doi.org/10.1016/j.forpol.2012.11.009)

37. *NASA's Fire Information for Resource Management System (FIRMS)*. Available at: <https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/map/#z:3.0;c:44.286,17.596> (accessed 06.11.19).

38. Perminov V., Goudov A. Mathematical Modeling of Forest Fires Initiation, Spread and Impact on Environment. *International Journal of GEOMATE*, 2017, vol. 13, iss. 35, pp. 93–99. DOI: [10.21660/2017.35.6704](https://doi.org/10.21660/2017.35.6704)

39. *Prometheus. Canadian Wildland Fire Growth Simulation Model*. Available at: [http://www.firegrowthmodel.ca/prometheus/overview\\_e.php](http://www.firegrowthmodel.ca/prometheus/overview_e.php) (accessed 06.11.19).

40. Rodríguez y Silva F., Martínez J.R.M., Machuca M.Á.H., Leal J.M.R. VISUAL-SEVEIF, a Tool for Integrating the Behavior Simulation and Economic Evaluation of the Impacts of Wildfires. *Proceedings of the Fourth International Symposium on Fire Economics, Planning, and Policy: Climate Change and Wildfires*. General Technical Report 245. Albany, CA, USDA, 2013, pp. 163–178. DOI: [10.2737/PSW-GTR-245](https://doi.org/10.2737/PSW-GTR-245)

41. Rothermel R.C. *Predicting Behavior and Size of Crown Fires in the Northern Rocky Mountains*. Research Paper INT-438. Ogden, UT, Intermountain Forest Experiment Station, 1991. 46 p. DOI: [10.2737/INT-RP-438](https://doi.org/10.2737/INT-RP-438)

42. Safi Y., Bouroumi A. Prediction of Forest Fires Using Artificial Neural Networks. *Applied Mathematical Sciences*, 2013, vol. 7, no. 5-8, pp. 271–286. DOI: [10.12988/ams.2013.13025](https://doi.org/10.12988/ams.2013.13025)

43. Satir O., Berberoglu S., Donmez C. Mapping Regional Forest Fire Probability Using Artificial Neural Network Model in a Mediterranean Forest Ecosystem. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 2016, vol. 7, iss. 5, pp. 1645–1658. DOI: [10.1080/19475705.2015.1084541](https://doi.org/10.1080/19475705.2015.1084541)

44. Sánchez J. *Los incendios forestales y las prioridades de investigación en México*. Tomo II. México, Congreso Forestal Mexicano, 1989, pp. 719–723.

45. US Wildfires. *NOAA's National Centers for Environmental Information (NCEI)*. Available at: <https://www.ncdc.noaa.gov> (accessed 06.11.19).

46. Van Wagner C.E. Conditions for the Start and Spread of Crown Fire. *Canadian Journal of Forest Research*, 1977, vol. 7, no. 1, pp. 23–34. DOI: [10.1139/x77-004](https://doi.org/10.1139/x77-004)

47. *Ventusky Application*. In *Meteo*. Available at: <https://www.ventusky.com> (accessed 06.11.19).

48. *Wildfire Analyst Software*. Available at: <https://www.wildfireanalyst.com/> (accessed 06.11.19).

## FORECASTING THE SPATIAL BEHAVIOR OF A FOREST FIRE AT UNCERTAINTY AND INSTABILITY OF THE PROCESS

*Tatiana S. Stankevich*, Candidate of Engineering; ResearcherID: [O-7418-2017](https://orcid.org/0000-0002-8707-7187).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8707-7187>

Kaliningrad State Technical University, Sovetskiy prosp., 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation; e-mail: [tatiana.stankevich@klgtu.ru](mailto:tatiana.stankevich@klgtu.ru)

**Abstract.** The Russian forest fund, being a public domain of the people and a special kind of federal property, requires sustainable management at the national level. One of the key principles of forest management is to ensure that forests are conserved and protected against a wide range of threats, primarily forest fires. Although forest fires are a natural component of forest ecosystems and cannot be completely eliminated, researchers have currently revealed

a decrease in the regulatory function and an increase in the destructive function of forest fires. Understanding the interrelations between the environmental factors and forest fire history is necessary for the development of effective and scientifically sound forest safety plans. The main purpose of the study is to increase the efficiency of the formation of an operational forecast of a forest fire in difficult conditions of a real fire (at instability and uncertainty). The author analyzed statistical data on forest fires the USA, Canada, Russia and the five southern European Union member states (Portugal, Spain, France, Italy and Greece) and confirmed the conclusion on the increase in the frequency of large forest fires. The most widely used in practice forecasting models of forest fire dynamics (Van Wagner, Rothermel, Finney, Cruz, etc.) and their computer implementations (Prometheus, FlamMap, FARSITE, VISUAL-SEVEIF, WILDFIRE ANALYST) are presented in the article. It is proposed to develop an intelligent system designed to create an operational forecast of a forest fire using convolutional neural networks (CNN). The structure of this system is described. It includes three main subsystems: information, intelligent and user interface. A key element of the intelligent subsystem is a forest fire propagation model, which recognizes data from sequential images, predicts the forest fire dynamics, and generates an image with a fire spread forecast. The scheme of the proposed model is described. It includes the following stages: data input; preprocessing of input data; recognition of objects using CNNs; forecasting the forest fire dynamics; output of operational forecast. The implementation features of the stage “recognition of objects using CNNs” are presented in detail: core size for each convolutional layer 3×3, activation function ReLu(x), filter in 2×2 pooling layers with step 2, max-pooling method, Object recognition and Semantic segmentation methods at the networks output.

**For citation:** Stankevich T.S. Forecasting the Spatial Behavior of a Forest Fire at Uncertainty and Instability of the Process. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2021, no. 1, pp. 20–34. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-1-20-34

**Acknowledgements:** The research was carried out with the financial support from the Russian Foundation for Basic Research, project No. 18-37-00035 mol\_a.

*Keywords:* forest, forest fire, operational forecast, uncertainty, instability, convolutional neural networks, intelligent system.

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов*

*The authors declare that there is no conflict of interest*

Поступила 06.11.19 / Received on November 6, 2019

---