



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Пермский государственный национальный исследовательский университет»
Географический факультет



Картографирование природной пожарной опасности на территории Среднего Урала на основе метода случайного леса



Авторы:

студентка 2 курса магистратуры
Климина Елизавета Алексеевна

klimina.ea2002@yandex.ru

д.г.н

Шихов Андрей Николаевич
and3131@inbox.ru

к.т.н.

Тарасов Андрей Владимирович
andrew.tarasov1993@gmail.com

Пермь, 2025

Введение

Лесные пожары являются одной из важнейших причин потерь лесного покрова в России, в том числе и на Среднем Урале. В среднем по территории России на пожары приходится около двух третей всех потерь лесного покрова, причем площадь пожаров на лесопокрытых территориях в XXI веке растет.

В практике оценки природной пожарной опасности обычно учитывают до 15-20 различных предикторов. К ним относятся климатические, параметры рельефа, свойства растительности и показатели антропогенной освоенности. В качестве зависимой (прогнозируемой) переменной обычно рассматривают вероятность возникновения лесного пожара или число пожаров на единицу площади. Таким образом, картографирование природной пожароопасности является стандартной задачей для машинного обучения. Метод случайного леса наиболее широко используется для прогнозирования возникновения пожаров, оценки подверженности лесов пожарам и риска пожаров.

Для территории Урала ранее уже создавались карты подверженности лесов пожарам, однако при этом учитывалось недостаточное количество факторов, а методика построения была основана на простых корреляционных зависимостях пространственного распределения пожаров с характеристиками лесного покрова, рельефа и климата. Использованный набор данных о пожарах также имел ряд недостатков. Целью настоящей работы является обучение модели (на основе метода случайного леса) для оценки природной пожароопасности территории на материалах, собранных для Пермского края, и ее применение для оценки пожароопасности на независимом наборе данных. В качестве такого рассмотрена территория Свердловской области, которая существенно отличается от Пермского края по условиям возникновения и распространения природных пожаров. Так, на территории Свердловской области общая площадь лесов, погибших от пожаров за 2001-2024 гг. по данным Global Forest Loss Due to Fires составляет около 300 тыс. га, тогда как в Пермском крае – 42 тыс. га (различие в 7,1 раза). При этом площадь лесов в Свердловской области больше, чем в Пермском крае всего в 1,2 раза.



Данные и методы

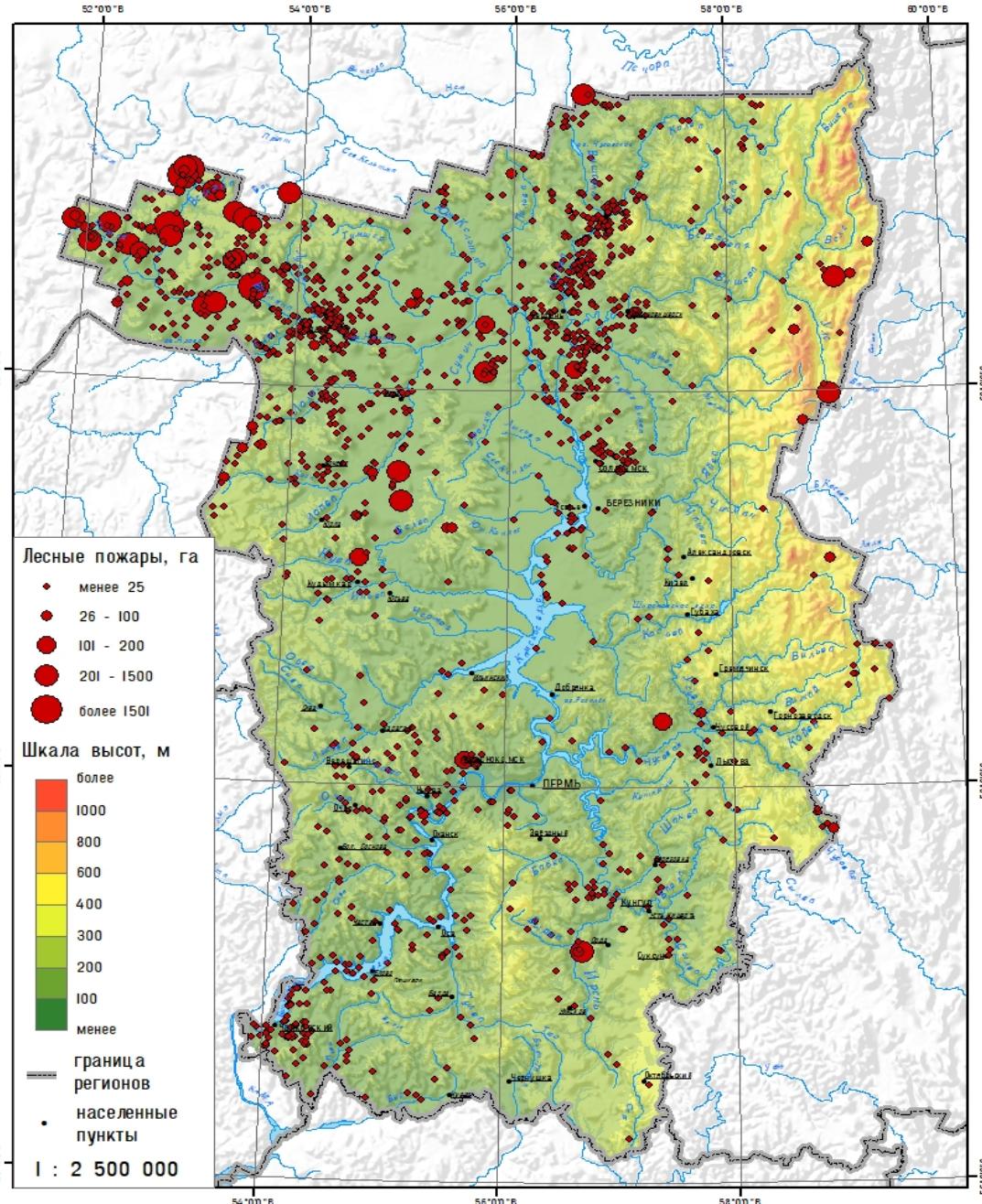
Картографическая база данных случаев лесных пожаров в Пермском крае создана по материалам, ежегодно публикуемым на сайте регионального Министерства природных ресурсов. Данные доступны за период с 2010 г. в формате MS Excel. Использованы материалы за 13 лет (2010–2022 гг.), всего база данных включает 1717 пожаров на общей площади 29129 га (рис. 1). Данные содержат ряд характеристик пожаров, включая координаты, номера кварталов и выделов; дату, время и площадь обнаружения, локализации и ликвидации пожара; характер пройденной огнем площади (лесная или нелесная), категорию лесов, вид пожара (верховой, низовой или подземный) и причину его возникновения, интенсивность пожара, способ его обнаружения, расстояние до ближайшего населенного пункта. Но они имеют и определённые недостатки: отсутствие для некоторых пожаров географических координат и данных о пройденной ими площади, или некорректность данных о площади для некоторых крупных пожаров, в частности наблюдавшихся в 2010 г.

Крупные пожары (свыше 200 га) в Пермском крае достаточно редки, и наблюдались только в 2010, 2015 и 2021 гг. При этом наибольшее число пожаров (407 случаев за сезон) отмечено летом 2010 г., как и в других регионах Европейской части России. В 2019 г. отмечено наименьшее число пожаров (21 случай).

Подготовка данных о независимых переменных (предикторах)

Для оценки факторов, определяющих природную пожароопасность территории, была создана сетка с размером ячейки 5×5 км на всю территорию края – всего 6752 ячейки, в том числе 944 ячейки с пожарами (14,3%). Выбор такого размера ячейки обусловлен необходимостью соблюдения баланса между детальностью данных и сбалансированностью выборки, то есть долей ячеек с ненулевым числом пожаров. Среднее расстояние между пожарами в выборке составляет 2950 м.

Пространственное распределение лесных пожаров на территории Пермского края за 2010–2022 гг.



В качестве целевых (зависимых) переменных рассмотрены три характеристики природных пожаров: количество пожаров, попадающих в каждую ячейку, суммарная площадь всех пожаров в ячейке и суммарная площадь пожаров, имеющих площадь свыше 1 га. Также в каждой ячейке были осреднены по площади значения независимых переменных, перечисленных ниже:

- Климатические переменные – количество осадков, средняя температура воздуха и среднее значение гидротермического коэффициента Селянинова (ГТК) за летний период, рассчитанные по данным WorldClim 2.0 с шагом сетки 30''.
- Геоморфологические переменные – высота, уклон и экспозиция склонов, а также потенциальная солнечная радиация в июле без учета облачности (рассчитанная средствами ГИС SAGA, при условии 70% прозрачности атмосферы). Все расчеты выполнены на основе глобальной цифровой модели рельефа GEBCO с размером ячейки 420 м.
- Характеристики лесов – преобладающая лесообразующая порода по данным Карты растительности Пермского края с размером ячейки 30 м , высота древостоя по данным Global Forest Canopy Height и потери лесного покрова по данным Global Forest Change.
- Характеристики антропогенной освоенности – расстояние до ближайшей дороги и до ближайшего населенного пункта, рассчитанные для каждой ячейки по картографической основе Роскартографии масштаба 1:200 000.



Данные и методы

Для Свердловской области данные получены по карте растительности России с ячейками 250 м и OpenStreetMap для дорог и населенных пунктов. Показатели переведены в числовой формат, включая доли разных пород леса и болота, высоту местности, расстояние до населенного пункта и осадки.

Предварительный анализ включал проверку на выбросы и нормальность (тест Шапиро-Уилка), а также корреляционный анализ с коэффициентом Спирмена. Для оценки пространственного распределения пожарной опасности использован алгоритм Random Forest с библиотекой Scikit-learn на языке программирования Python. В результате обучения выделены 7 предикторов: доля сосновых лесов, темнохвойных лесов, смешанных лесов и болот в ячейке, а также высота местности, расстояние до ближайшего населенного пункта и среднее многолетнее количество осадков за летний период.

Для Свердловской области применена модель, обученная на данных Пермского края. Оценка результатов моделирования выполнена на основе сведений из Реестра природных пожаров по данным формы 1Т-ИСДМ Рослесхоз за период с 2000 по 2024 гг., где зафиксировано 8998 пожаров на 941401 га. Прогнозируемые количественные показатели переведены в качественные пороговые значения.



Границы классов природной пожароопасности территории, выделенные для Пермского края и Свердловской области

Расчетное число пожаров в ячейке сетки за 13-ти летний период	Процентиль (от всей совокупности ячеек)	Название класса пожароопасности территории на карте
Более 3,3	90%	очень высокая
0,84 – 3,3	75%	высокая
0,28 – 0,84	50%	умеренная
0,07 - 0,28	25%	низкая
Менее 0,07	10%	очень низкая

Результаты и обсуждение

Коэффициенты корреляции Спирмена между целевыми и независимыми переменными представлены в табл. 2. Наиболее сильные положительные корреляции с характеристиками пожаров имеют доля сосновых лесов и доля болот в ячейке, а отрицательные – средняя высота местности и плотность населенных пунктов. Связь частоты возникновения и площади пожаров с площадью сосновых лесов в Пермском крае хорошо известна. Большинство пожаров, особенно крупных, происходит на северо-западе края, где распространены сосновые леса и обширные верховые болота. Число населенных пунктов в этом районе минимально, что и обуславливает отрицательную корреляцию частоты возникновения и площади пожаров с плотностью населения. Области с наибольшей частотой возникновения пожаров расположены на низменностях, что обуславливает отрицательную корреляцию возникновения пожаров с высотой местности. В горной части края возникновению лесных пожаров препятствует большое количество осадков и отсутствие сосновых лесов.

Коэффициенты корреляции Спирмена между целевыми и независимыми переменными. Выделены статистически значимые корреляции при уровне значимости 0,05

Целевая переменная	<i>Доля сосновых лесов в ячейке</i>	<i>Доля вторичных хвойных лесов в ячейке</i>	<i>Доля болот в ячейке</i>	<i>Доля вырубок, гарей и ветровалов в ячейке</i>	<i>Доля темнохвойных лесов в ячейке</i>	<i>Доля смешанных лесов в ячейке</i>	<i>Средняя высота местности</i>	<i>Экспозиция склона</i>	<i>Средняя высота древостоя</i>	<i>Плотность населенных пунктов</i>	<i>Плотность дорожной сети</i>	<i>ГТК Селянникова</i>	<i>Солнечная радиация</i>
<i>Количество пожаров в ячейке</i>	0,26	0,05	0,20	0,04	0,06	-0,01	-0,26	0,07	-0,08	0,02	0,03	0,00	-0,17
<i>Суммарная площадь пожаров в ячейке</i>	0,24	0,01	0,21	0,22	0,07	0,02	-0,09	0,07	0,03	-0,15	-0,08	0,07	-0,13
<i>Суммарная площадь пожаров в ячейке ($S > 1$ га)</i>	0,17	0,06	0,15	0,23	0,17	0,09	0,03	0,07	0,14	-0,24	-0,15	0,20	-0,24

Результаты и обсуждение

Положительная корреляция числа крупных пожаров со значением ГТК Селянинова выглядит парадоксально, но объясняется тем, что такие пожары чаще происходят в удаленных и труднодоступных районах на севере. Здесь, несмотря на более низкие температуры и большее количество осадков, пожары сложнее вовремя обнаружить и ликвидировать. Этим же объясняется и отрицательная корреляция пространственного распределения пожаров с поступлением солнечной радиации. Результаты оценки значимости признаков (feature importance) с помощью метода случайного леса оказались очень похожими. Во всех экспериментах наиболее значимыми переменными оказались доля сосновых лесов и доля болот в ячейке сетки, а также высота местности.

В каждой ячейке рассчитаны значения ошибок для расчетного количества пожаров. Средняя относительная ошибка результатов моделирования составила 0,345. Наиболее высокие значения абсолютных ошибок получены в тех ячейках сетки, где ожидаемое (по модели) число пожаров наибольшее. В целом результаты моделирования хорошо соответствуют фактическому распределению пожаров.

Сопоставление результатов моделирования природной пожароопасности в Пермском крае с фактическими характеристиками пожаров

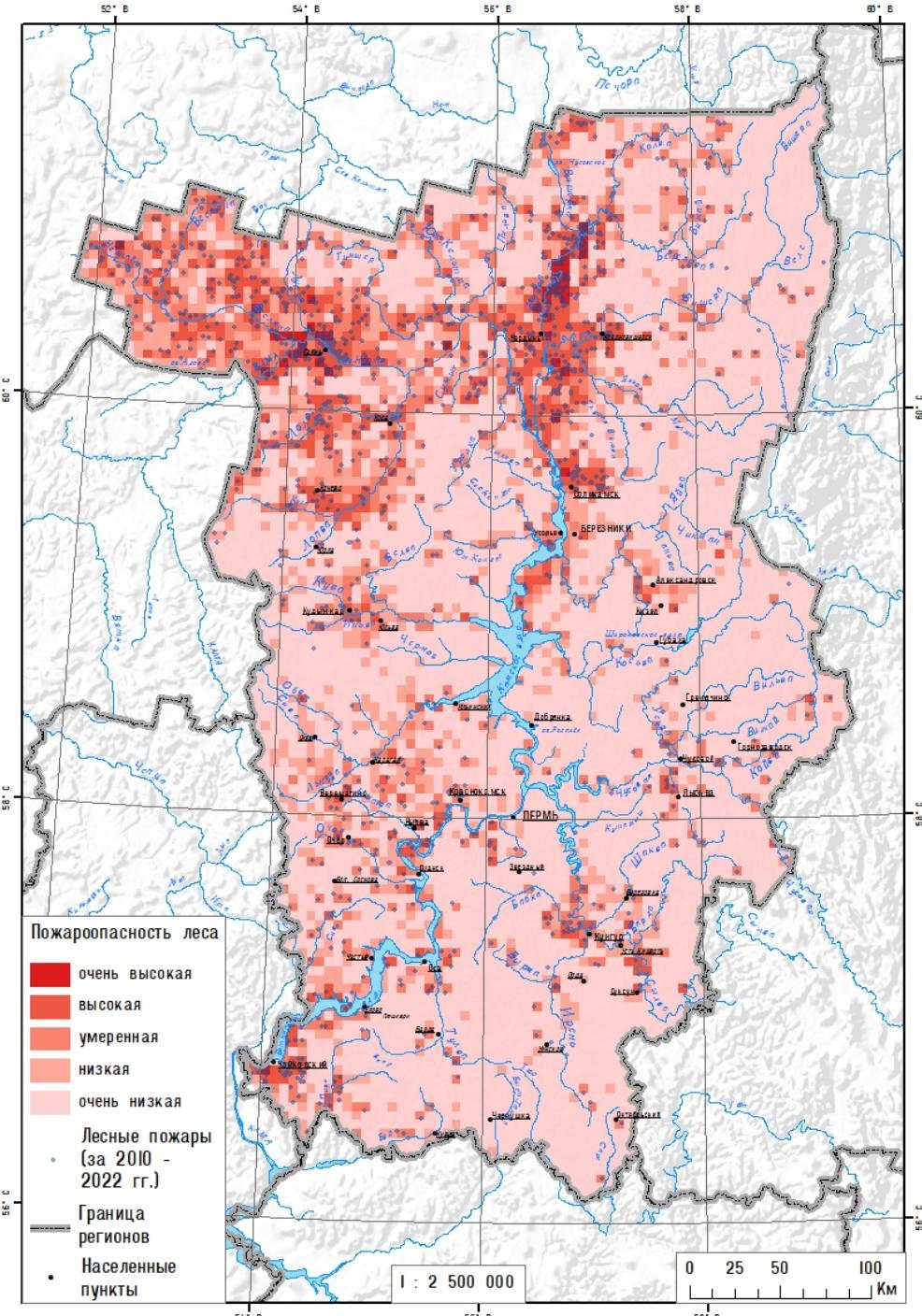
Класс природной пожарной опасности по результатам моделирования	Общая площадь (% от площади Пермского края)	% от общего числа пожаров по Пермскому краю	% от общей площади пожаров по Пермскому краю	% от общей площади гарей по Пермскому краю
Очень низкая	68,2	2,0	0,7	12,3
Низкая	13,3	4,8	1,1	25,4
Средняя	10,2	24,9	30,5	27,3
Высокая	1,2	50,9	56,8	33,8
Очень высокая	0,67	17,3	10,7	0,9

Результаты и обсуждение

Большая часть территории Пермского края (70,5%) относится к классу с очень низкой пожарной опасностью. Она характерна для смешанных и мелколиственных лесов в южной и центральной части края, а на востоке – и для темнохвойных лесов (что обусловлено большим количеством осадков в горной части края). В пределах этой территории за 2010-2022 гг. произошло всего 2% от всех лесных пожаров. Однако некоторые из этих пожаров, которые произошли в удаленной северо-восточной части края летом 2010 г. были крупными, в результате чего свыше 12% площади гарей, выявленных на территории края по данным Global Forest Loss Due to Fires приходятся на участки с очень низкой пожароопасностью.

Очень высокая пожарная опасность характерна всего для двух небольших участков на севере края – части территории Весьянской низменности западнее пос. Гайны, а также долины р. Колвы в ее нижнем течении (севернее г. Чердынь). На обоих участках распространены сосновые боры-беломошники. Количество зарегистрированных пожаров здесь превышает среднее значение по краю в 25 раз. Участки с высокой пожароопасностью представлены также в основном на севере и северо-западе края. На этот класс приходится свыше 50% всех зарегистрированных пожаров, в том числе большинство крупных пожаров, а также 33,8% от всей площади гарей. Локально этот класс представлен и в юго-западной части края, на участках распространения сосновых лесов и песчаных почв в долине р. Камы. Класс средней пожароопасности представлен также в основном на севере и северо-западе края, а на остальной территории – в виде локальных участков. Таким образом, результаты моделирования хорошо соответствуют фактическому пространственному распределению как самих пожаров, так и гарей от них по территории края.

Результаты моделирования природной пожароопасности лесов в Пермском крае на основе модели Random Forest

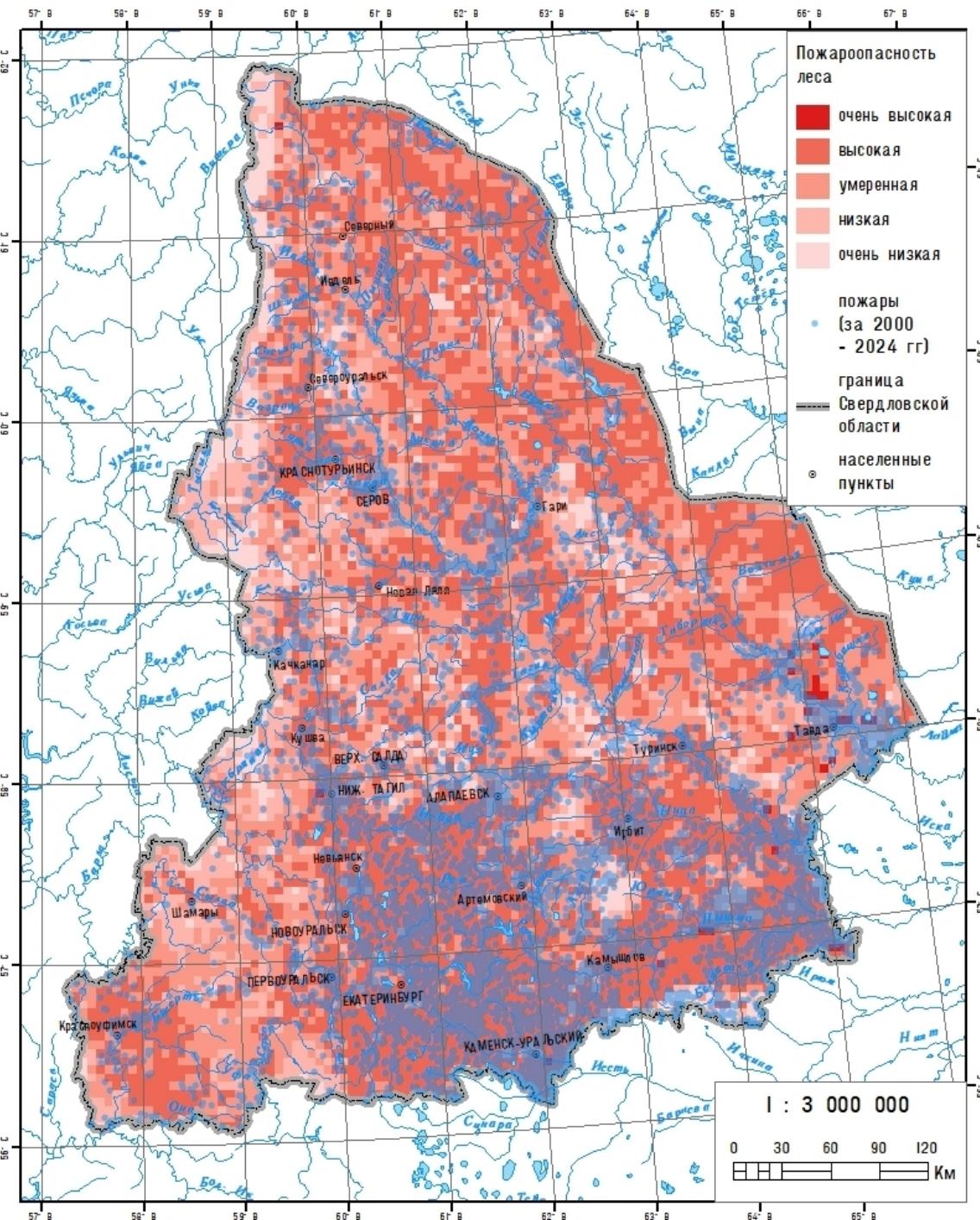


В целом для Свердловской области характерна более высокая природная пожароопасность, чем для Пермского края, что обусловлено более благоприятными для возникновения пожаров климатическими условиями (в частности, меньшим количеством осадков), а также широким распространением сосновых лесов. По результатам моделирования пожароопасности, более 80% территории Свердловской области отнесены к классам средней и высокой пожароопасности. Низкая пожароопасность характерна только для восточного склона гор Северного Урала на крайнем северо-западе территории. Но в 2010 г. здесь, как и в Пермском крае, отмечались крупные пожары, что объясняет значительную площадь гарей в пределах этого класса. Наиболее высокая пожароопасность характерна для южных и юго-восточных районов области, где крупные пожары происходят в основном в весенний период и не всегда приводят к гибели лесов. Этим объясняется большое расхождение между площадью пожаров и площадью гарей в Свердловской. Наибольшая плотность лесных пожаров отмечается к юго-востоку от Екатеринбурга. Наибольшие площади гарей по данным Global Forest Loss Due to Fires характерны для северной части. Относительно низкой пожароопасностью (в основном 2-й класс) характеризуются также западные склоны Среднего Урала, что подтверждается небольшой площадью гарей на данной территории.

Сопоставление результатов моделирования природной пожароопасности в Свердловской области с фактическими характеристиками пожаров

Класс природной пожарной опасности по результатам моделирования	Общая площадь (% от площади региона)	% от общего числа пожаров по региону	% от общей площади пожаров по региону	% от общей площади гарей по региону
Очень низкая	2,1	1,1	1,8	7,3
Низкая	10,9	4,5	9,7	5,9
Средняя	39,3	30,8	22,7	27,3
Высокая	47,3	62,5	64,6	58,5
Очень высокая	0,4	1,0	1,1	0,8

Результаты моделирования природной пожароопасности лесов в Свердловской области на основе модели Random Forest



Заключение

Основным результатом проведенного исследования являются карты природной пожароопасности территории Пермского края и Свердловской области, построенные на основе алгоритма Random Forest Regressor. Созданная модель машинного обучения требует лишь минимальной адаптации для моделирования пожароопасности территории соседних регионов, поскольку в качестве предикторов используются открытые данные о характеристиках лесного покрова, рельефа и климата территории, а также о степени антропогенного влияния. Установлено, что ключевыми факторами, определяющими пожароопасность территории, являются доля площади сосновых лесов и болот (положительная корреляция), а также высота местности (отрицательная корреляция). Эти результаты хорошо согласуются с ранее опубликованными.

Для территории Пермского края результаты моделирования пожароопасности территории хорошо соответствуют фактическому пространственному распределению лесных пожаров и гибели лесов от них, хорошо выраженный максимум отмечается на северо-западе края. Для Свердловской области также получено хорошее соответствие расчетной пожароопасности лесов и фактического пространственного распределения лесных пожаров за 2000-2024 гг. Свыше 62% от общего числа пожаров и свыше 64% от их общей площади попадает в класс высокой пожароопасности. При этом наибольшая площадь гарей приходится на территорию с высокой пожароопасностью по результатам моделирования, что указывает на удовлетворительный результат моделирования. Основным ограничением полученных результатов является то, что в них не учитываются погодные факторы пожароопасности, что не позволяет использовать их непосредственно для прогноза. Однако совместное использование созданных карт и метеорологических индексов пожароопасности (индекса Нестерова или его аналогов) может обеспечить совершенствование оперативного прогноза лесных пожаров.

Исследование выполнено при поддержке РНФ и Пермского края (проект № 24-27-20111)



Список литературы

1. Барталев С. А., Егоров В. А., Жарко В. О., Лупян Е. А., Плотников Д. Е., Хвостиков С. А., Шабанов Н. В. Спутниковое картографирование растительного покрова России – М.: ИКИ РАН, – 2016. – 208 с.
2. Лупян Е. А., Барталев С. А., Балашов И. В., Егоров В. А., Ершов Д. В., Кобец Д. А., Сенько К. С., Стыщенко Ф. В., Сычугов И. Г. Спутниковый мониторинг лесных пожаров в 21 веке на территории Российской Федерации (цифры и факты по данным детектирования активного горения) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2017. – Т. 14. – № 6. – С. 158–175. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-6-158-175.
3. Шихов А.Н., Абдуллин Р.К., Семакина А.В. Картографирование подверженности лесов гибели от пожаров и ветровалов (на примере территории Урала) // Геодезия и картография. – 2020. – № 4. – С. 19-30. DOI: 10.22389/0016-7126-2020-958-4-19-30.
4. Шихов А. Н., Семакина А. В. Картографирование растительного покрова Пермского края по спутниковым снимкам Landsat // Географический вестник. – 2022. – № 1. – С. 150–164. DOI: 10.17072/2079-7877-2022-1-150-164.
5. Cao Y., Wang M., Liu K. (2017) Wildfire Susceptibility Assessment in Southern China: A Comparison of Multiple Methods // International Journal of Disaster Risk Science. 8, pp. 164–181. DOI: 10.1007/s13753-017-0129-6.
6. Falk D. A., Miller C. M., McKenzie D., Black A. E. (2007) Cross-scale analysis of fire regimes // Ecosystems. 10, pp. 809–826. DOI: 10.1007/s10021-007-9070-7.
7. Fick S. E., Hijmans R. J. (2017) WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas // International Journal of Climatology. 37, pp. 4302–4315. DOI: 10.1002/joc.5086.
8. Giglio L., Schroeder W., Justice C. O. (2016) The collection 6 MODIS active fire detection algorithm and fire products // Remote Sensing of Environment. 178, pp. 31–41. DOI: 10.1016/j.rse.2016.02.054.
9. Gigović L., Pourghasemi H. R., Drobnjak S., Bai S. (2019) 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. 10 (5), 408 p. DOI: 10.3390/f10050408.
10. Hansen M. C., Potapov P. V., Moore R., Hancher M., Turubanova S. A., Tyukavina A., Thau D., Stehman S. V. (2013) High-resolution global maps of 21st-century forest cover change // Science. 6160, 342 , pp. 850–853. DOI: 10.1126/science.1244693.
11. Jaafari A., Pourghasemi H. R. (2019) Factors influencing regional-scale wildfire probability in Iran: an application of Random Forest and Support Vector Machine. Spatial Modeling in GIS and R for Earth and Environmental Sciences pp. 607–619. DOI: 10.1016/B978-0-12-815226-3.00028-4.

Список литературы

12. Krylov A., Potapov P., Loboda T., Tyukavina A., Turubanova S., Hansen M. C., McCarty J. L. (2014) Remote sensing estimates of stand-replacement fires in Russia, 2002–2011 // *Environmental Research Letters*. 9 (10),
13. Moritz M. A., Parisien M. A., Batllori E., Krawchuk M. A., Van Dorn J., Ganz D. J., Hayhoe K. (2012) Climate change and disruptions to global fire activity // *Ecosphere*. 3 (6), pp. 1–22. DOI: 10.1890/ES11-00345.1.
14. Novo A., Fariñas-Álvarez N., Martínez-Sánchez J., González-Jorge H., Fernández-Alonso J. M., Lorenzo H. (2020) Mapping Forest Fire Risk – A Case Study in Galicia (Spain) // *Remote Sensing*. 12 (22) 3705, DOI: 10.3390/rs12223705.
15. Oliveira S., Oehler F., San-Miguel-Ayanz J., Camia A., Pereira J. M. (2012) Modeling spatial patterns of fire occurrence in Mediterranean Europe using Multiple Regression and Random Forest // *Forest Ecology and Management*. 275, pp. 117–129. DOI: 10.1016/j.foreco.2012.03.003.
16. Piyush J., Sean C. P., Coogan S. G. S., Crowley M., Taylor S., Flannigan M. D. (2020) A review of machine learning applications in wildfire science and management // *Environmental Review*. 28 (4), pp. 478–505. DOI: 10.1139/er-2020-0019.
17. Potapov P., Li X., Hernandez-Serna A., et al. (2020) Mapping and monitoring global forest canopy height through integration of GEDI and Landsat data // *Remote Sensing of Environment*. 253 112165, DOI: 10.1016/j.rse.2020.112165.
18. Sachdeva S., Bhatia T., Verma A. K. (2018) GIS-based evolutionary optimized Gradient Boosted Decision Trees for forest fire susceptibility mapping // *Natural Hazards*. 92 (3), pp. 1399–1418. DOI: 10.1007/s11069-018-3256-5.
19. Seidl R., Fernandes P. M., Fonseca T. F., Gillet F., Jönsson A. M., Merganičová K., Netherer S., Arpacı A., Bontemps J.-D., Bugmann H., González-Olabarria J. R., Lasch P., Meredieu C., Moreira F., Schelhaas M.-J., Mohren F. (2011) Modelling natural disturbances in forest ecosystems: A review // *Ecological Modelling*. 222(4), pp. 903–924. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2010.09.040.
20. Sherstyukov B. G., Sherstyukov A. B. (2014) Assessment of increase in forest fire risk in Russia till the late 21st century based on scenario experiments with fifth-generation climate models // *Russian Meteorology and Hydrology*. 39, pp. 292–301. DOI: 10.3103/S1068373914050021.
21. Tyukavina A., Potapov P., Hansen M. C., et al. (2022) Global Trends of Forest Loss Due to Fire From 2001 to 2019 // *Frontiers in Remote Sensing*. 3 825190, DOI: 10.3389/frsen.2022.825190.
22. Vecín-Arias D., Castedo-Dorado F., Ordóñez C., Rodríguez-Pérez J. R. (2016) Biophysical and lightning characteristics drive lightning-induced fire occurrence in the central plateau of the Iberian Peninsula // *Agricultural and Forest Meteorology*. 225 (15), pp. 36–47. DOI: 10.1016/j.agrformet.2016.05.003.