

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА
ГЕОГРАФИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

На правах рукописи



Гизатуллин Алмаз Тимербулатович

**Геоинформационное моделирование пожарной опасности
природных территорий России**

1.6.20 – Геоинформатика, картография

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Научный руководитель:
кандидат географических наук,
доцент Н. А. Алексеенко

Москва – 2023

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ОЦЕНКИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ.....	13
1.1 Природные пожары в России и их исследования.....	13
1.2 Пожарная опасность: факторы возникновения природных пожаров.....	20
1.3 Методики моделирования пожарной опасности.....	28
1.3.1 Основные методические положения.....	29
1.3.2 Обзор национальных методик.....	33
1.3.3 Обзор развития прочих методик.....	43
1.4 Информационные системы мониторинга пожарной опасности.....	47
1.5 Нормативно-правовое регулирование и состояние пожарной охраны природных территорий в России.....	54
Выводы по главе 1.....	58
ГЛАВА 2. ИСХОДНЫЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ ДАННЫЕ МОДЕЛИ ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ.....	60
2.1 Данные дистанционного зондирования Земли.....	62
2.2 Метеорологические модели.....	67
2.3 Цифровые модели рельефа.....	70
2.4 Картографические материалы.....	71
Выводы по главе 2.....	74
ГЛАВА 3. МЕТОДИКА ГЕОИНФОРМАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ.....	75
3.1 Показатели пожарной опасности.....	75
3.1.1 Показатели наземных объектов как горючих материалов на основе продуктов MODIS.....	76
3.1.2 Показатели погоды на основе метеорологической модели ECMWF... ..	80
3.1.3 Показатели рельефа на основе ЦМР GMTED2010.....	82
3.1.4 Показатели антропогенной нагрузки на основе слоев OSM.....	85
3.2 Базовые составляющие модели пожарной опасности.....	87
3.3 Взаимосвязи показателей с пожарной опасностью природных территорий России.....	93
3.3.1 Введение в нейронные сети и выбор архитектуры для моделирования.....	93
3.3.2 Обучение нейронной сети и анализ полученных взаимосвязей.....	97
3.4 Анализ применимости модели: сравнение с существующими методиками оценки и прогнозирования пожарной опасности.....	106
3.4.1 Валидация модели на национальном уровне.....	107
3.4.2 Валидация модели на региональном уровне.....	111
Выводы по главе 3.....	115

ГЛАВА 4. ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА ПРОГНОЗНОГО МОНИТОРИНГА ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ.....	117
4.1 Общие положения проектирования системы.....	117
4.2 Подсистема приема исходных данных	120
4.3 Подсистема обработки данных.....	124
4.4 Подсистема визуализации результатов	127
4.5 Подсистема хранения данных.....	131
Выводы по главе 4.....	135
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	137
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	140
ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Обзорная таблица оценочных и прогнозных методик моделирования пожарной опасности.....	156
ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Базовый сценарий реализации нейронной сети с долгой краткосрочной памятью (LSTM) на языке Python.....	162
ПРИЛОЖЕНИЕ 3. Связь классов постоянных показателей пожарной опасности со случаями возникновения возгораний на территории РФ за 2001-2020 гг.	163
П3.1 Абсолютная высота.....	163
П3.2 Уклон поверхности	164
П3.3 Экспозиция поверхности.....	165
П3.4 Горизонтальная кривизна поверхности	166
П3.5 Вертикальная кривизна поверхности.....	167
П3.6 Общая кривизна поверхности	168
П3.7 Расчлененность поверхности TRI.....	169
П3.8 Индекс LS.....	170
П3.9 Индекс влажности рельефа TWI.....	171
П3.10 Индекс баланса массы MBI.....	172
П3.11 Взвешенные расстояния до населенных пунктов.....	173
П3.12 Взвешенные расстояния до элементов дорожной сети.....	174
П3.13 Промышленная нагрузка	175
П3.14 Сельскохозяйственная нагрузка	176
П3.15 Тип растительного покрова.....	177
П3.16 Географическая широта.....	178
П3.17 Географическая долгота	179
П3.18 Географическая широта и географическая долгота	180
П3.19 Временной показатель месяца	181
ПРИЛОЖЕНИЕ 4. Лицензия программного обеспечения информационной системы мониторинга пожарной опасности природных территорий России	182

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. *Природный пожар* – неконтролируемый процесс горения, стихийно возникающий и распространяющийся в *природной среде*, охватывающий различные компоненты *природного ландшафта* (ФЗ от 21.12.1994 №69 «О пожарной безопасности»). Это явление неотъемлемо от природы Земли, главным образом растительных сообществ. В то же время они относятся к стихийным бедствиям, представляя угрозу для жизни человека. При этом человек нередко сам выступает причиной возникновения природных пожаров. В совокупности все это определяет явление как *сложную природно-антропогенную систему* (по Николаеву, 1999), контроль за которой составляет глобальную проблему человечества.

В настоящее время существует большое количество научных теоретических и практических решений для исследования проблемы природных пожаров, ориентированных на их предупреждение, обнаружение и оценку последствий. Развитие области знаний в рамках первого из направлений – *предупреждение возгораний*, предопределяет тематику текущей работы. В основе этих решений лежит оперирование *пространственными данными*, отражающими интенсивность проявления факторов пожарной опасности.

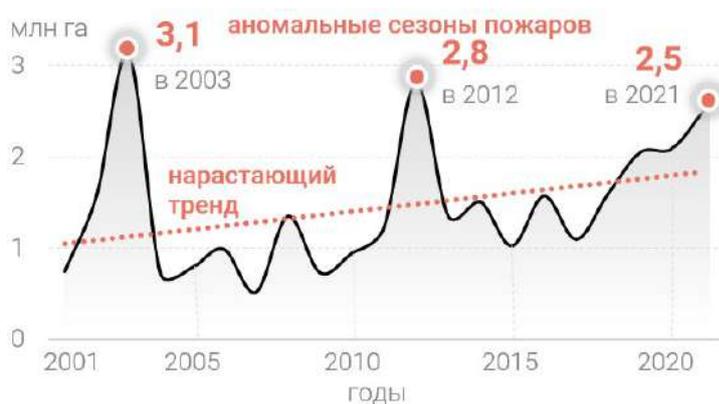


Рисунок 0.1. Изменение площади сгоревших лесов в России составлено автором по (Лупян и др., 2021)

Однако, несмотря на многообразие и комплексность решений *проблема природных пожаров является нарастающей*, в том числе и для территории России (Рисунок 0.1). В пределах активно охраняемого лесного фонда нашей страны ежегодно

происходят десятки тысяч возгораний, охватывающих миллионы гектаров и наносящих миллиарды рублей ущерба. Во многом это связано и обуславливает *необходимость обновления текущих методических подходов прогнозирования*

пожарной опасности, в части которых существуют следующие недостатки:

- *прогнозная составляющая* слабо представлена в этой области исследований;
- недостаточно применяются возможности *разнообразных пространственных данных и современных технологий геоинформационной обработки*: на официальном уровне в России используется методика оценки пожарной опасности по условиям погоды В. Г. Нестерова, разработанная в 1949 г.

Целью исследования является *разработка методики геоинформационного моделирования пожарной опасности природных территорий России*. Свойствами планируемой модели являются прогностическая направленность с ежесуточной регулярностью, открытость, интеграция различных типов пространственных данных, учет пространственно-временной специфики явления.

Для достижения цели были поставлены следующие **задачи исследования**:

- *провести аналитический обзор состояния вопроса* в рассматриваемой области знаний в научном, прикладном и нормативном аспектах исследования природных пожаров и явления пожарной опасности, в особенности на территории России;
- *обосновать выбор исходных пространственных данных* для оперативной и регулярной оценки факторов пожарной опасности;
- *составить методическую последовательность моделирования* с учетом:
 - 1) взаимосвязей факторов пожарной опасности, описываемых выбранными данными, с реальными случаями возгораний на территории России;
 - 2) современных технологий геоинформационной обработки и анализа данных;
- *протестировать методику* и получаемую на ее основе *модель* на предмет целевой пригодности для прогнозирования пожарной опасности в России, провести сравнение с существующими методиками;
- *спроектировать информационную систему прогнозного мониторинга пожарной опасности* как практическую реализацию методики и модели для распространения результатов и потенциальной поддержки принятия решений.

Объектом исследования выступают *природные территории России* как

область потенциального действия природных пожаров. Под природными территориями в диссертации рассматривается *часть природной среды* – совокупности компонентов, *природных* и *природно-антропогенных* объектов (не включает в себя продукты трудовой деятельности человека, не обладающие природными свойствами; *ФЗ от 10.01.2002 №7 «Об охране окружающей среды»*). **Предметом** исследования является *пожарная опасность в контексте готовности объекта исследования к возгоранию*, то есть моделируется исключительно первичное возникновение пожара, а не его последующее распространение.

Фактический материал, личный вклад автора. В основе работы лежат авторские исследования, осуществляемые с 2015 г. на кафедре картографии и геоинформатики географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова. В качестве основных исходных материалов используются *открытые пространственные данные* на территорию России за 2001-2021 гг. (более 100 тыс. экземпляров): продукты космической съемки MODIS, метеорологическая модель ECMWF, цифровая модель рельефа GMTED2010, картографические слои OpenStreetMap. Разработка и реализация методов их тематической обработки были выполнены лично автором путем написания сценариев на языке программирования Python. На основе анализа и обобщения результатов автором самостоятельно были получены выводы о проявлении различных факторов и показателей пожарной опасности в пределах природных территорий России, которые были использованы в процессе разработки целевой методики моделирования и ее последующей автоматизации в виде информационной системы прогнозного мониторинга.

Методология и методика. Основу работы составляют *системный* и *ситуационный* подходы; *геоинформационный*, *аэрокосмический*, *картографический* и *математические* (статистика, анализ, линейная алгебра, машинное обучение) методы исследования. Методологическую базу исследования формируют труды представителей отечественной научной школы географической картографии, геоинформатики и дистанционного зондирования (К. А. Салищев, С. Н. Сербенюк, А. М. Берлянт, В. С. Тикунов, И. К. Лурье, Ю. Ф. Книжников,

В. И. Кравцова), направления оценки пожарной опасности (В. Г. Нестеров, Н. П. Курбатский, М. А. Софронов), зарубежных школ геоинформационного моделирования (R. Tomlinson, M. Goodchild), современные достижения в области машинного обучения тематических моделей (S. Hochreiter, J. Schmidhuber).

Научную новизну работы определяют следующие результаты:

1. Впервые предложена *систематизация методического разнообразия моделирования пожарной опасности* в зависимости от критических составляющих, формирующих и всецело описывающих методику – способов интерпретации процесса возгорания, источников данных, методов их обработки и пространственного уровня. На их основе сформирована *базовая методическая последовательность*.
2. Разработана *оригинальная методика геоинформационного моделирования пожарной опасности природных территорий России*:
 - впервые проанализирован информативный набор из более 600 показателей, которые полностью описывают факторы пожарной опасности согласно системному ландшафтному подходу;
 - основу методики составляют уникальные веса показателей, отражающие их взаимосвязь с возгораемостью территории России и выявленные на основе нейросетевой обработки наблюдений природных пожаров за 2001-2020 гг.

Практическая значимость исследования. *Модель, создаваемая на основе разработанной методики, пригодна для оценки и прогнозирования пожарной опасности природных территорий России, актуализации лесоустроительных материалов на национальном и региональном уровнях картографирования. Ее практическая реализация в виде информационной системы прогностического мониторинга, спроектированной в соответствии с современными тенденциями информационного обеспечения в отрасли геоинформатики, картографии и ДЗЗ, потенциально обеспечивает открытый доступ пользователей к тематическим результатам. Прототип системы опубликован на веб-странице www.firepredict.ru.*

Основные защищаемые положения

1. В соотношении факторов пожарной опасности природных территорий России наиболее определяющими являются *условия погоды и состояние растительности*; значительное повышение точности прогноза пожарной ситуации обеспечивается за счет учета их *географической изменчивости*.
2. *Модель на базе рекуррентной нейронной сети с долгой краткосрочной памятью (LSTM)*, обученная на основе эталонной выборки в *виде однородного ряда случаев природных пожаров в России за 2001-2020 гг.*, обеспечивает достоверный (70,1%) прогноз вероятности потенциального возгорания с заблаговременностью до 5 суток.
3. *Предлагаемая методика геоинформационного моделирования пожарной опасности* позволяет усовершенствовать классические подходы (В. Г. Нестерова) и улучшить прогнозный аспект мониторинга природных пожаров в России на федеральном и региональном уровнях.

Степень достоверности полученных результатов обуславливается содержательными и формальными требованиями к выбору исходных данных, строгим математическим аппаратом их обработки и анализа. Верификация разработанной модели пожарной опасности на независимых данных природных пожаров в России показывает высокую степень соответствия прогнозов действительной пожарной ситуации (более 61%). Валидация модели демонстрирует более высокую прогностическую способность по сравнению традиционными достижениями: достоверность выявления потенциально пожароопасных природных участков выше в два раза относительно модели по методике Нестерова (около 70%). Достоверность результатов исследования также подтверждается докладами на международных и всероссийских конференциях, публикациями в рецензируемых научных изданиях.

Апробация работы. Результаты исследования были представлены на всероссийских и международных конференциях: «Ломоносов» (Москва, 2016, 2017, 2019), «География: развитие науки и образования» (Санкт-Петербург, 2016),

«Географические исследования: история, современность, перспективы (Харьков, 2016), «Аэрокосмические методы и геоинформационные технологии в лесоведении, лесном хозяйстве и экологии» (Москва, 2016), «Международный год карт в России: объединяя пространство и время» (Москва, 2016), «Practical Geography and XXI Century Challenges» (Москва, 2018, на английском языке), «Национальная картографическая конференция» (Москва, 2018), «Меридиан» (Москва, 2018), «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (Москва, 2018, 2021), «Теория и практика современных географических исследований» (Санкт-Петербург, 2019), «Интеркарто/ИнтерГИС» (Москва, 2021), «Пространственные данные: наука и технологии» (Москва, 2021, 2022).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 19 печатных работ, в том числе 4 статьи в журналах из списка RSCI Web of Science (из них 3 индексируются в базе Scopus). Одна из публикаций (*Gizatullin, Alekseenko, 2022*) включена в международный каталог Института по исследованию природных пожаров (*Wildland Fire Research University, 2022*). Во всех опубликованных работах вклад автора является определяющим. Постановка научных задач, проведение исследований, анализ и интерпретация полученных результатов, предоставление их в печать осуществлялось непосредственно соискателем.

Публикации в журналах Scopus, WoS, RSCI, а также в изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности 1.6.20:

1. *Гизатуллин А.Т., Алексеенко Н.А., Моисеева Н.А.* Разработка алгоритма превентивной оценки пожарной опасности природных территорий по данным дистанционного зондирования // Геодезия и картография. — 2019. — №1. — С. 102-109. — DOI: 10.22389/0016-7126-2019-943-1-102-109 (5-летний импакт-фактор РИНЦ: 0,374).
2. *Гизатуллин А.Т., Алексеенко Н.А., Моисеева Н.А.* Использование данных дистанционного зондирования для предупреждения возгорания торфоразработок // Вестник Московского университета. Серия 5. География. — 2020. — №2. — С. 45-52 (5-летний импакт-фактор РИНЦ: 1,146).

3. **Гизатуллин А.Т.** Разработка методов использования данных дистанционного зондирования земли для предупреждения природных пожаров // Географический вестник. — 2021. — Т. 1. — № 56. — С. 149–161. — DOI: 10.17072/2079-7877-2021-1-149-161 (5-летний импакт-фактор РИНЦ: 0,639).
4. **Gizatullin A.T., Alekseenko N.A.** Prediction of Wildfires Based on the Spatio-Temporal Variability of Fire Danger Factors // Geography, Environment, Sustainability. — 2022. — Т. 15. — №2. — С. 31-37. — DOI: 10.24057/2071-9388-2021-139 (5-летний импакт-фактор РИНЦ: 1,120).

Публикации в материалах конференций:

5. **Гизатуллин А.Т.** Выявление потенциально пожароопасных торфопоразработок по данным дистанционного зондирования // Ломоносов-2016: Материалы межд. молодеж. науч. форума. — М.: МАКС Пресс, 2016.
6. **Гизатуллин А.Т.** Методика обнаружения потенциально пожароопасных торфопоразработок на базе мониторинга по данным дистанционного зондирования // География: развитие науки и образования: Материалы ежегод. межд. науч.-практ. конф. LXIX Герценовские чтения — Т. 1. — Изд-во РПГУ имени Герцена Санкт-Петербург, 2016. — С. 126-130.
7. **Гизатуллин А.Т.** Мониторинг горимости торфопоразработок по данным дистанционного зондирования // Географические исследования: история, современность, перспективы: Материалы межд. науч. конф. студ. и асп. — Харьков, 2016.
8. **Гизатуллин А.Т.** Подходы к обнаружению пожаров на торфопоразработках и организация их мониторинга на основе космических снимков // Аэрокосмические методы и геоинформационные технологии в лесоведении, лесном хозяйстве и экологии: Материалы VI Всерос. конф. (с международным участием) — М.: ЦЭПЛ РАН, 2016. — С. 100-104.
9. **Гизатуллин А.Т., Алексеенко Н.А.** Обнаружение потенциально пожароопасных торфопоразработок на основе их мониторинга по данным дистанционного зондирования // Методы и средства исследования природы и общества: Материалы 9-ой межд. молодеж. школы-конф. «Меридиан». — М.: ИГ РАН, 2016.

10. *Моисеева Н.А., Алексеенко Н.А., Гизатуллин А.Т.* Обнаружение потенциально пожароопасных торфоразработок на основе их превентивного мониторинга по материалам космической съемки // Сборник тезисов Всерос. науч. конф. «Международный год карт в России: объединяя пространство и время». — М.: Географический факультет МГУ, 2016. — С. 215–216.
11. *Гизатуллин А. Т.* Разработка проекта системы превентивного мониторинга торфоразработок по данным дистанционного зондирования // Ломоносов-2017: Материалы межд. молодеж. науч. форума. — М.: МАКС Пресс, 2017.
12. *Гизатуллин А.Т., Алексеенко Н. А., Моисеева Н. А.* Разработка алгоритма превентивной оценки пожарной опасности природных территорий по данным дистанционного зондирования // Сборник тезисов Всерос. науч. конф. «Национальная картографическая конференция-2018». — М.: Географический факультет МГУ, 2018. — С. 64-65.
13. *Гизатуллин А.Т., Алексеенко Н.А.* Превентивное обнаружение природных пожаров по материалам космической съемки // От теории к практике в исследованиях природы и общества: Материалы 11-ой межд. молодеж. конф. «Меридиан». — М.: ИГ РАН, 2018.
14. *Гизатуллин А.Т., Алексеенко Н.А., Моисеева Н.А.* Методика прогноза возгораний торфоразработок по данным дистанционного зондирования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Материалы XVI Всерос. конф. — М.: ИКИ РАН, 2018. — С. 396.
15. *Alexeenko N.A., Moiseeva N.A., Gizatullin A.T.* The creation of preventive peat fire danger monitoring system // Practical Geography and XXI Century Challenges: IGU Thematic Conference. — Vol. 1. — Moscow, 2018.
16. *Гизатуллин А.Т.* Физико-географические факторы пожарной опасности в Оренбургской области и их метрические характеристики на основе космических снимков // Материалы межд. науч.-практ. конф. «Теория и практика современных географических исследований». — Каллиграф М, 2019. — С. 453–456.
17. *Гизатуллин А.Т.* Разработка методики предупреждения природных пожаров по данным дистанционного зондирования на примере лесов Красноярского

края // ИнтерКарто/ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: Материалы Междунар. конф. М: Географический факультет МГУ. — 2021. — Т.27. — Ч.2. — С. 340-354. — DOI: 10.35595/2414-9179-2021-2-27-340-354.

18. *Гизатуллин А.Т., Алексеенко Н.А.* Прогнозирование природных пожаров на основе пространственно-временной изменчивости факторов пожарной опасности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Материалы XIX Межд. конф. — М.: ИКИ РАН, 2021. — С. 337.

Прочие публикации:

19. *Гизатуллин А.Т., Алексеенко Н.А., Моисеева Н.А.* Обнаружение потенциально пожароопасных торфоразработок на основе превентивного мониторинга по данным дистанционного зондирования // Научные исследования молодых ученых-картографов, выполненные под руководством сотрудников кафедры картографии и геоинформатики географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова / Под ред. М.В. Зимина, П.Е. Каргашина, М.В. Кусильман и др. — М.: КДУ, 2017. — С. 25-31.

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Основной текст диссертации изложен на 182 страницах, включает 43 рисунка, 14 таблиц и 4 приложения. Список литературы содержит 285 наименований, в том числе 132 – на иностранном языке. Приложения включают 18 рисунков (карт) и 19 таблиц.

Благодарности. Автор выражает благодарность научному руководителю доц., к. г. н. Н. А. Алексеенко за руководство научной деятельностью и ценные консультации при планировании и осуществлении исследования. Также автор благодарит в. н. с, к. г. н. М. В. Зимина за профессиональные рекомендации и предоставленные материалы для тестирования разработок. Автор признателен сотрудникам кафедры картографии и геоинформатики, рецензентам в. н. с., д. г. н. В. И. Кравцовой, н. с., к. г. н. П. Г. Михайлюковой за конструктивные замечания и важные советы в рамках аттестации работы.

ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ОЦЕНКИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ

В соответствии с задачей обзорного анализа состояния вопроса в ходе текущей главы предполагается рассмотреть следующие аспекты области знаний:

- природные пожары и их типы, многообразие их исследований в России;
- пожарная опасность как основной предмет исследования с определением перечня факторов возникновения природных возгораний;
- методики моделирования, в частности, оценки и прогнозирования пожарной опасности, их критический обзор и сравнительный анализ;
- системы мониторинга пожарной опасности как практические воплощения методик, применяемые для реальных задач охраны от природных возгораний;
- нормативно-правовое регулирование и состояние деятельности по пожарной охране природных территорий в России.

Изучение этих аспектов позволит комплексно учесть существующий научно-теоретический и производственно-практический опыт и конкретизировать направления для решения последующих задач исследования.

1.1 Природные пожары в России и их исследования

Природный пожар представляет собой процесс горения, стихийно возникающий и распространяющийся на природных территориях. Ключевые определения этого явления в контексте природных территорий СССР и России формулировались Мелеховым И. С. (1934) – ландшафтные пожары, Курбатским Н. П. (1972) – лесные пожары, Софроновым М. А. и Волокитиной А. В. (1990) – пожары растительности. Однако несмотря на многообразие терминологии многие авторы включают в понятие природного пожара три содержательных компонента:

- *объект возгорания*, в качестве которого выступают элементы природной среды (главным образом – растительность), обладающие пирологическими свойствами, которые влияют на возможность его воспламенения;
- *пространственный перенос* возгорания по территории, который зависит от

внешних условий – геоморфологических и погодных, и увеличивает количество объектов возгорания и, как следствие, площади пожара;

— собственно *процесс горения* как совокупность физико-химических процессов превращения исходных веществ в продукты сгорания, сопровождающийся излучением в световом и тепловом диапазоне, а также выделением большого количества дыма (Зверев, Смирнов, 1987).

В текущей работе основное внимание уделяется первому из приведенных выше компонентов – **объекту возгорания**, состояние которого всесторонне рассматривается в рамках задач *оценки пожарной опасности территории и прогнозирования первичного возникновения природного пожара*.

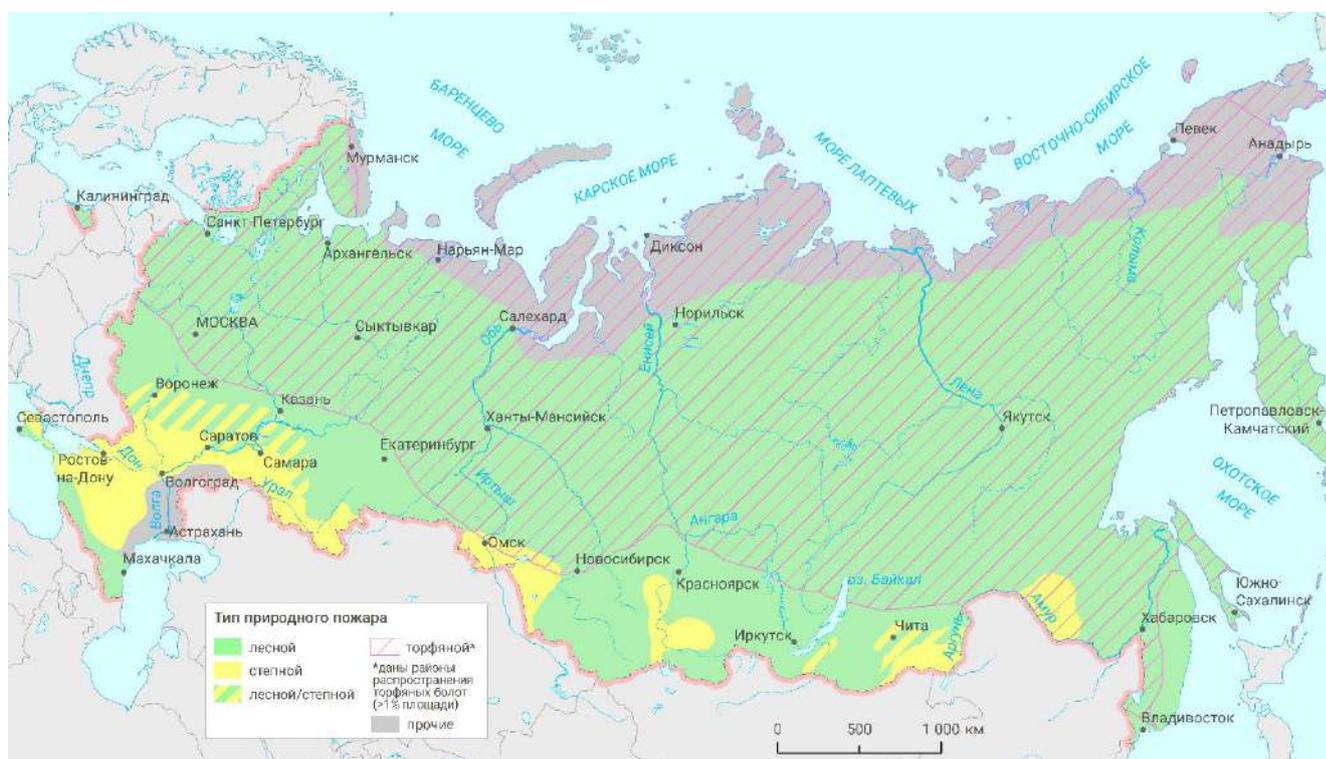


Рисунок 1.1. Территории потенциального возникновения различных типов природных пожаров¹ составлено автором путем комбинирования карт природных зон, растительности и ресурсов торфа из Национального атласа России (2005)

Объект возгорания представляет собой материал, встречающийся в природной среде и обладающий свойством горючести, то есть способностью самовозгораться

¹ здесь и далее – карты России приведены в конической равноугольной проекции Ламберта со стандартными параллелями 30° и 62° с. ш. и центральным меридианом 102° в. д., если не указано иное

или возгораться под действием внешнего источника горения и продолжать гореть самостоятельно (Софронов, Вакуров, 1981). Близким по значению понятием является *природный горючий материал (ГМ)*. По характеристикам объектов возгорания и их географического расположения на территории России выделяются три главных типа природных пожаров: *лесные, степные и торфяные* (Рисунок 1.1).

Лесной пожар – тип природного пожара, характеризующийся возгоранием материалов в лесных массивах. Он характерен для большей части территории России, представленной разнообразными по видам и составу лесами (Рисунок 1.2). Объектом возгорания являются лесные растения, их части и остатки: стволы деревьев, ветки, сучья, хвоя и листья, а также мхи и лишайники, подстилка и опад (Курбатский, 1970). По времени действия лесные возгорания начинаются с ранней весны с резким увеличением температур и продолжаются вплоть до конца осени.

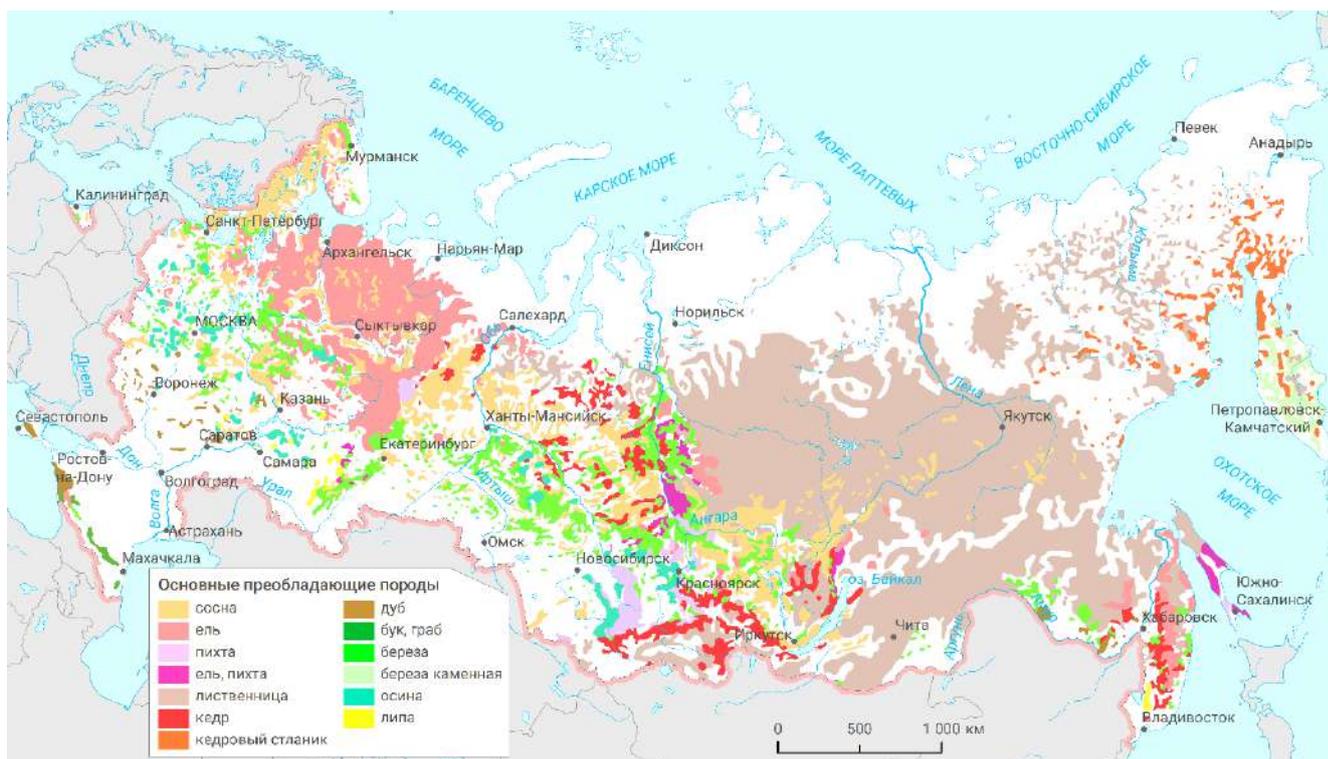


Рисунок 1.2. Леса России - объект возгорания лесных пожаров составлено автором путем генерализации карты лесов из Национального атласа России (2008)

В зависимости от ярусно-высотного расположения объекта возгорания выделяют два типа лесных пожаров (Анцышкин, 1957): *низовые* и *верховые*. При низовом типе горение поддерживают нижние ярусы растительности, лесная

подстилка и опад, тогда как верховой тип характеризуется возгоранием верхних ярусов (полога) леса. Низовые пожары составляют до 97% от всех лесных пожаров (Волокитина и др., 2020), однако наиболее опасными с точки зрения интенсивности протекания и последствий являются верховые.

Изучение лесных пожаров в России представлено рядом важнейших исследовательских направлений. В аспекте их прогнозирования начало исследованиям в нашей стране было положено в 20-30х годах XX века и представлено работами (Ожогин, 1924; 1939; Вангенгейм, 1939), которые основываются на связи влажности объектов возгорания с показателями погоды. Дальнейшее развитие этого аспекта в советские годы обеспечивалось разработками Нестерова В.Г. (1945), Анцышкина С.П. (1957), Мелехова И.С. (1947), Курбатского Н.П. (1962), Цветкова П.А. (1976), Фурьева В.В. (1978), Валендика Э.Н. (1987), Сухинина А.И. (1991), Софронова М.А. (1988), Волокитиной А.В. (1988), и др., которые многосторонне рассматривали горимость лесов России с учетом свойств ГМ, метеорологических явлений, экологической значимости, влияния населения.

На сегодняшний день сложилось несколько крупных территориально обусловленных школ по исследованию лесных пожаров, сформированных в различных институтах и отделениях Российской академии наук:

- *Институт космических исследований, Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов*, разработки которых (Барталев и др., 2008; Лупян и др., 2017; Котельников и др., 2019, Бондур и др., 2020) нацелены на научную функционально-методическую поддержку Информационной системы дистанционного мониторинга лесных пожаров в России – ИСДМ-Рослесхоз;
- *Сибирское отделение (Пономарев, Швецов, 2013; Цветков, Буряк, 2014; Волокитина и др., 2017)* – исследуются пожары в лесах Сибири как одной из крупнейших геосистем Земли, большое внимание уделяется разнообразию лесных ГМ, классификации территории по горимости;
- *Дальневосточное отделение (Коган, Глаголев, 2013; Зубарева, 2018)* – рассматривается пирологическая обстановка в лесах Дальнего Востока

с учетом географических особенностей растительности и погодных явлений.

Также это направление широко представлено в научных учреждениях уральской части России (Пономарчук, Пьянков, 2016; Шихов и др., 2020).

Степной пожар – тип природного пожара, характеризующийся горением *степных ГМ*, в частности, растительного покрова степей (Рисунок 1.3). Объект возгорания состоит из присущей степям видовой растительности – луговой, разнотравной, ковыльной, типчаковой, полынной и злаковой (Фильков, 2012), а также кустарничков, мхов и степного войлока. Изменение их состояния определяет сроки пожароопасного сезона в степях: возгорания активно происходят весной при высыхании прошлогодней травы, а также в конце лета и осени – при прекращении вегетации растительности (Павлейчик, 2016).



Рисунок 1.3. Степи России - объект возгорания степных пожаров составлено автором путем анализа карты растительности из Национального атласа России (2008)

Степные пожары схожи с лесными низовыми по типу своего распространения, однако обладают более высокими скоростями развития. Это обусловлено высокой сухостью травянистого покрова и отсутствием шероховатостей в виде рельефа или высоких ярусов растительности, создающих условия для сильных приземных

ветров, распространяющих огонь (Тшиков, 2003).

Исследования степей в аспекте анализа возникновения пожаров находятся в крайне дефицитном положении. Традиционно степные пожары считаются характерным явлением для зоны степей и одним из экзогенных факторов формирования их современного облика. В советские годы огромные участки степей намеренно выжигались для уничтожения накопившегося степного войлока, сорной растительности (Родин, 1946; 1981), тем самым улучшалось состояние угодий для развития сельскохозяйственных культур. Однако в настоящее время травяные палы законодательно запрещены, но несмотря на это приобрели бессистемный характер и в текущих масштабах являются губительными для ландшафтного многообразия (Калмыкова, 2006). Поэтому направление прогнозирования возгораний в степях только начинает развиваться. В большинстве случаев исследования нацелены на анализ степных ГМ и влияния на них внешних условий в виде погодных явлений (Горяев и др., 2020) и антропогенной нагрузки (Барановский, 2006; 2007).

Торфяной пожар – тип природного пожара, при котором объектом возгорания является *торф*, залегающий на некоторой глубине от поверхности. Иногда его относят к одному из подтипов лесных пожаров – *подземному* (Гришин, 2008), так как области распространения лесов и торфяных залежей во многом перекрываются (Рисунок 1.1), а оба типа могут инициировать и сопровождать друг друга. Однако особенности торфа как объекта возгорания позволяют выделять отдельный тип природных пожаров.

Торф – осадочная рыхлая горная порода, формирующаяся в ходе отмирания и неполного разложения растений болот в условиях повышенного увлажнения и недостатка кислорода (Вихляев, 1914). Площадь торфяников, торфяных залежей и заторфованных земель в России составляет 3,69 млн км² (Рисунок 1.4). Часть из них, главным образом в европейской части страны, используется в хозяйственной деятельности: с начала XIX века было осушено более 10 млн га (Сирин и др., 2011). Это привело к росту проявления торфяных пожаров в XX веке. Ситуация

усугубилась на фоне спада торфяных отраслей после развала СССР. На сегодняшний день более трети осушенных сельскохозяйственных угодий, большое количество бывших торфоразработок и лесоосушительных сетей находятся в заброшенном состоянии (Копенкина, Гамаюнов, 2018).

В связи с этим торфяные пожары являются предметом давних исследований, начало которых относится еще к середине XIX столетия (Шацкий, 1856). В последующем торфяные возгорания с точки зрения их прогнозирования изучались наряду с лесными как один из их подтипов (Мелехов, 1938; 1944; Курбатский, 1957). Также сложилось самостоятельное направление моделирования возгорания торфа с учетом физических условий (Конев, 1977; Удилов, 1986; Гришин, 2008, Винокуров и др., 2015). Основой этих работ является вывод систем уравнений, которые описывают различные процессы переноса теплоты и влаги во время высыхания торфа, его зажигания, тления и возможного самовозгорания.

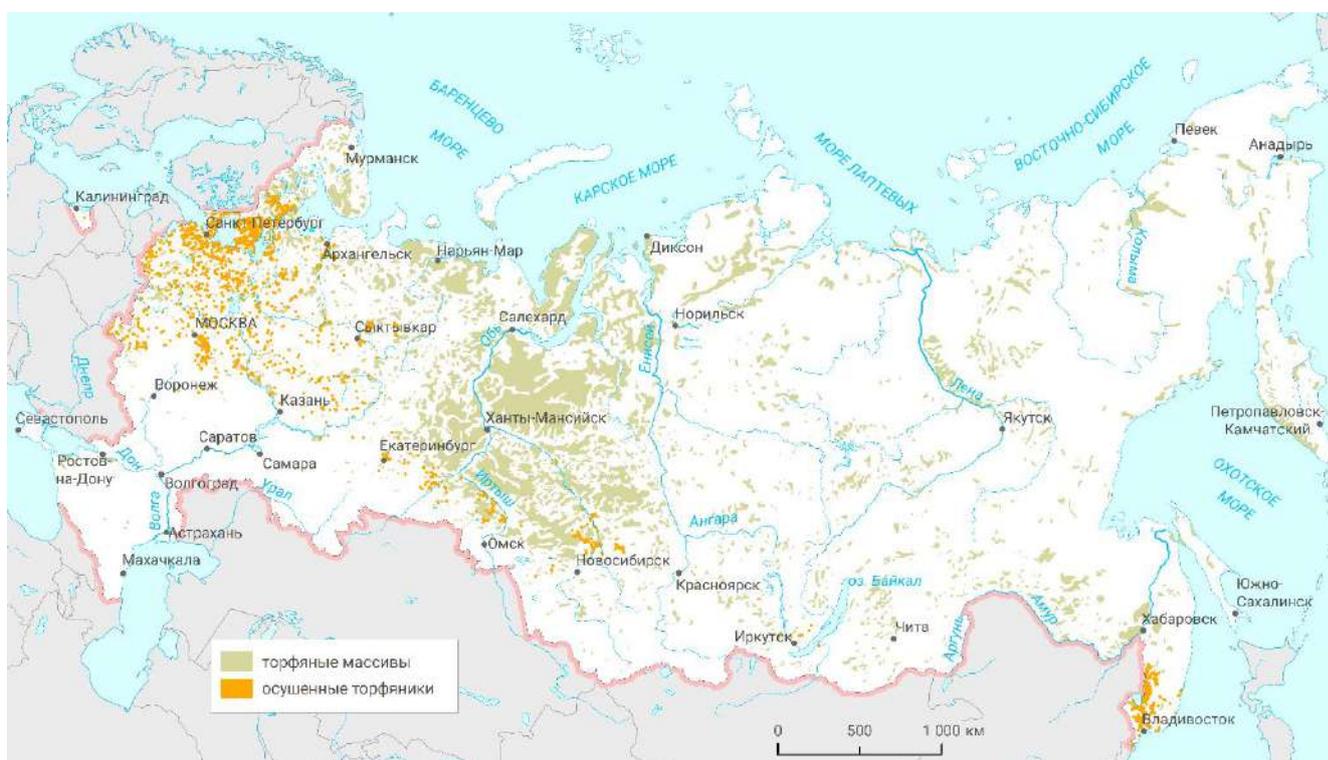


Рисунок 1.4. Торфяные массивы и осушенные торфяники России – объект возгорания торфяных пожаров составлено автором путем комбинирования карты болот из Национального атласа России (2008) и данных о границах осушенных торфяников (Greenpeace, 2020)

Таким образом, природные пожары в России имеют повсеместный характер и охватывают территории уникальных и самых больших в мире природных геосистем – бореальных лесов, степей Евразии и торфяных болот. Более того, в последнее время растет доля пожаров и в других ландшафтах, так называемых *тундровых возгораний*, которые прежде были очень редкими для арктической зоны (Коннова и др., 2020). Упомянутые в разделе исследования природных пожаров с точки зрения возможности их прогнозирования подтверждают устойчивую актуальность изучения темы и являются основой для их развития в текущей работе.

1.2 Пожарная опасность: факторы возникновения природных пожаров

Природный пожар, как и любое другое явление в природе, характеризуется причинно-следственными связями между его компонентами и внешними условиями. Возникновение возгорания определяется совокупностью природных и антропогенных предпосылок. Оценка степени проявления и воздействия этих предпосылок на вероятность возгорания является ключевой задачей при моделировании и прогнозировании природных пожаров. Результатом этой оценки является некая обобщающая мера, называемая *пожарной опасностью*.

В текущем исследовании *пожарная опасность* рассматривается как возможность возникновения природного пожара, которая количественно описывается вероятностью наступления события и качественно выражается пирологическими свойствами потенциального объекта возгорания и окружающими его условиями. Такая формулировка близка к определению Курбатского Н.П. (1972), одного из основоположников лесной пирологии в России.

Собственно пожарная опасность складывается из совокупного влияния *факторов пожарной опасности* – явлений и компонентов природной среды, которые выступают в качестве причин и условий для возникновения пожара. Рассматривая *направленность воздействия* на объект возгорания как основу для инициирования процесса горения, получим две группы факторов:

— *внутренние* – свойства и характеристики ГМ;

— *внешние факторы* – условия, в которых формируются и изменяются внутренние факторы и соответственно объект возгорания.

При этом существует множество других оснований для классификации факторов, таких как сущность возникновения, частота изменений во времени и в пространстве, континуальность воздействия и прочих (Рисунок 1.5; Гизатуллин и др., 2019). Их различие обуславливается вкладываемой в понятие пожарной опасности структурной схемой факторов, которая используется для разработки методики их моделирования. В данном случае, применяя в качестве основания направленность воздействия факторов (изнутри или извне), мы обеспечиваем их разделение по источнику этого воздействия – собственно объект возгорания или внешние природные и антропогенные компоненты окружающей среды. Это позволит пофакторно структурировать решение последующих задач исследования (изучение пожарной опасности через систему показателей, описывающих факторы, выбор данных для их описания и разработка методики их обработки).

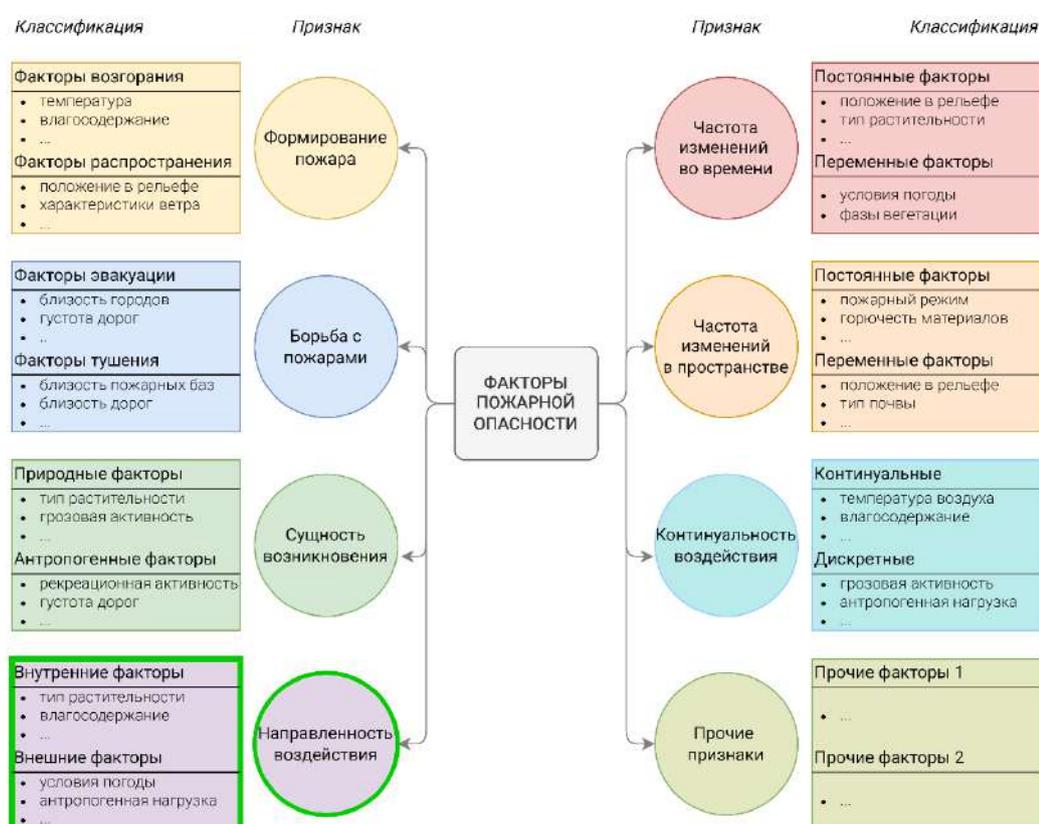


Рисунок 1.5. Типы классификаций факторов пожарной опасности (зеленой окантовкой выделена выбранная классификация)

Внутренние факторы пожарной опасности влияют на возможность возникновения пожара через внутреннее состояние объекта возгорания, а также в зависимости от его свойств. При этом внутреннее состояние объекта как физического тела, состоящего из набора химических веществ, структур и связей между ними (Глазов, 1981), определяет его идентичность, видовую принадлежность и является неизменным. Также объект обладают рядом свойств, которые могут быть объективными для всех физических тел (например, плотность) или присущими только определенным классам (количество хлорофилла для растений). Поэтому в рамках текущей группы складывается два вида факторов:

- *постоянные* – основываются на сущности объекта и его признаках;
- *переменные* – обладают изменчивостью и непосредственно отражают общее влияние внешних факторов на объект.

Постоянные внутренние факторы проявляются через видовые особенности растительности, которая в любой форме (живые организмы, отмершие остатки, торф) является основным ГМ природного пожара. Непосредственно до начала их горения происходит ряд предваряющих процессов, определяющих последующее горение (Рисунок 1.6; Комраков, Бабурин, 2014). Наиболее значительным из них является *испарение воды*, которая до последнего момента ограничивает горение. Кроме подавления источника зажигания и охлаждения ГМ вода может задержать нагревание, тем самым повысить пороговую температуру воспламенения.

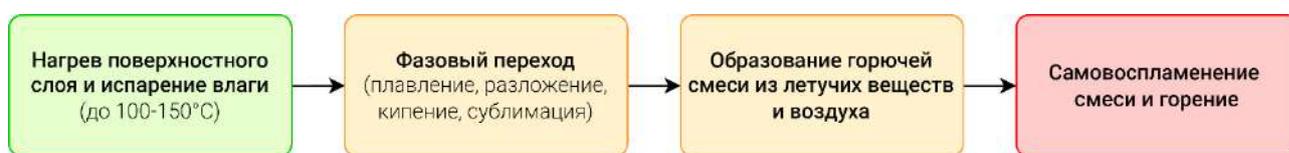


Рисунок 1.6. Процессы возгорания твердых горючих материалов составлено автором на основе (Комраков, Бабурин, 2014)

Соответственно, важнейшим фактором пожарной опасности является *содержание воды*, в данном случае *гигроскопичность* – наличие в составе веществ, способных поглощать и отдавать водяной пар, накапливать влагу (Врублевская и др., 2015). Гигроскопичные материалы могут аккумулировать количество влаги,

превышающее их массу в несколько раз. Например, древесина вмещает до 100% своей массы, а сфагновый мох – до 3000% (Софронов, Волокитина, 1990).

Обратным по воздействию фактором является *содержание* в растениях *сильно горючих веществ*, таких как смолы, эфирные масла (Мелехов, 1947). Например, за счет них часто возгорается живая хвоя несмотря на высокое содержание воды. Немаловажную роль играют также *предельный и текущий размер* жизненных форм растительности, *их объемный вес* в сухом состоянии, *плотность*: чем меньше эти показатели, тем легче возгорание (Исаева, 2001). При равных прочих условиях чаще всего возгораются мхи и лишайники, нежели деревья и кустарники.

Переменные внутренние факторы отражают текущее состояние объекта возгорания в ответ на внешние условия. Основными из этих факторов являются влагосодержание, температура, а также ведущие к ним косвенные характеристики.

Влагосодержание, которое уже упоминалось в рамках рассмотрения гигроскопичности, показывает количество воды в ГМ. Как правило, его используют относительно и выражают к массе сухого остатка (Соловьев, 2006). Косвенным фактором является *состояние вегетации*, которая также определяет предельное и текущее влагосодержание: вегетирующая растительность потребляет и накапливает гораздо больше влаги, чем ее формы вне вегетации. Например, влагосодержание вегетирующих трав составляет выше 200%, а предельное значение (весной) – 700% (Софронов, 1967). В этом случае вся вегетирующая растительность имеет практически нулевую пожарную опасность.

Температура объекта представляет собой меру его нагревания и выражает степень готовности к воспламенению. Температура является взаимно обратным фактором относительно влагосодержания: при поступлении энергии от источника зажигания температура объекта растет, однако эта же энергия может затрачиваться на испарение воды, ограничивая нагревание (Храмцов, 2007).

В совокупности все приведенные выше внутренние факторы – постоянные и переменные, выражаются в видах растительности, каждый из которых имеет свою базовую пирологическую характеристику. Следовательно, всевозможные

растительные ГМ территории могут быть классифицированы по пожарной опасности для оценки их потенциального возгорания. Эта задача является одной из основных в исследованиях рассматриваемой области знаний и представлена как «классификация или картографирование растительных горючих материалов», «fuel mapping» (Софронова, Фельде, 2011). Для природных территорий России были предложены различные подходы к решению этой задачи (Таблица 1.1).

Таблица 1.1. Подходы к классификации растительных ГМ природных территорий России

Авторы	Решение задачи классификации растительных ГМ
Курбатский, 1970	разделены природные ГМ России по отношению к горению на проводники горения, поддерживающие горение и ограничивающие горение, а также выделены 7 групп ГМ в зависимости от жизненных форм, их взаимного расположения и запасов горючей массы
Конев, 1977	классификация растительных ГМ по свойствам горючести
Яковлев, 1979	выделены группы напочвенных ГМ, для них определены значения пожарного созревания
Валендик и др., 1979	исследована приуроченность пожарной опасности к растительным ассоциациям лесов Сибири
Шешуков, 1984	генетическая классификация растительных ГМ исходя из уровня трансформации сообществ (первичные и вторичные), пожарная опасность рассмотрена как переменная от вида растительности
Софронов и др., 2005	классификация территории по степени высыхания растительных ГМ в различных биогеоценозах и времени начала пожарного созревания
Волокитина, 2017	актуализация классификаций и карт пожарной опасности природных объектов на основе данных ДЗЗ
Аброскина и др., 2012	привязка карт пожарной опасности к материалам лесоустройства

Таким образом, внутренние факторы являются непосредственным индикатором готовности природных ГМ к возгоранию. Их исследование сводится к классификации растительности и дальнейшему ее использованию в качестве пирологической основы для выделения однородных комплексов ГМ.

Внешние факторы пожарной опасности. В идеальном случае знание точного состояния внутренних факторов и отслеживание их динамики позволило бы всецело описать вероятность потенциального возгорания. Однако в реальном случае для всей территории России или даже для ограниченного участка это является затруднительным в силу колоссального объема организации таких мероприятий. Наземные измерения доступны в очень ограниченном виде, а дистанционные методы не позволяют достичь должной детальности.

Исходя из этого, а также с учетом тесных взаимосвязей в природных и природно-антропогенных системах используются *внешние факторы пожарной опасности*. С точки зрения потенциального возникновения пожара внешним фактором может являться любой объект и связанный с ним процесс, который прямо или косвенно влияет на объект возгорания и окружающие его условия.

Развитие исследований природных пожаров в России происходило в одно время со становлением учения о географическом ландшафте (*Солнцев, 1962; Арманд, 1975; Сочава, 1978*), что послужило источником системного подхода в их изучении. Поэтому при последующем рассмотрении внешних факторов пожарной опасности этот подход был применен в соответствии с компонентами природно-территориальных комплексов. В связи с этим выделяются *внешние климатические, погодные, геоморфологические, гидрологические, почвенные, а также антропогенные факторы пожарной опасности*. Воздействие *геологических и биологических* элементов ландшафта на пожарную опасность подробно не рассматривается в силу их косвенного и незначительного проявления.

Климатические факторы отражают многолетний типичный ход погоды, в зависимости от которого формируются сезонные изменения элементов ландшафта. Климат России является чувствительным к глобальному потеплению: только за последние 50 лет среднее повышение температуры составило более 1°C (*Катцов и др., 2014*). Это проявляется в изменении количества и структуры растительных ГМ, засушливости территории и ее пожарной опасности (*Гинзбург, Соколова, 2014*).

Погодные факторы тесно связаны с климатическими, но выражают текущее и непосредственное влияние атмосферных явлений на готовность возгорания ГМ, что более важно для задач оперативного прогнозирования пожарной опасности. Это влияние определяется тремя аспектами (*Глаголев, 2015*):

- суточной динамикой показателей погоды;
- балансом процессов увлажнения и высыхания – равновесное влагосодержание ГМ зависит от температуры и влажности воздуха (*Софронов и др., 2004*);
- активностью гроз, в основном сухих, которые являются основным источником

зажигания в природе (*Иванов, Матвеев, 1999; Швецов и др., 2008*).

Изучение погодных условий как фактора пожарной опасности представляет собой одно из главных направлений исследований в нашей стране и за рубежом. Оно представлено множеством успешно применяющихся методик оценки пожарной опасности по условиям погоды (*Нестеров, 1949; Стародумов, 1964; Кац и др., 1975; Софронов, Волокитина, 1990; Софронова и др., 2008; Глаголев, 2015*).

Геоморфологические факторы определяют пожарную опасность через соотношение различных форм рельефа в зависимости от абсолютных и относительных высот, уклона, экспозиции и прочих производных морфометрических показателей (*Онучин и др., 2003; Дорошенко, 2010*). Например, известно, что существенный уклон увеличивает опасность возгорания и его переноса вверх по склону в связи с большей соприкасаемостью воздушной горючей смеси с находящимися выше ГМ (*Софронов, 1967*). Кроме того, рельеф влияет на распределение потоков воды, особенности почв и растительности.

Гидрологические факторы на основе величины речного стока описывают колебания уровня запасов водоносных горизонтов – источников капиллярной влаги для растений. Чем ниже сток, тем ниже уровень воды и влагосодержание растительных ГМ, что повышает пожарную опасность (*Кулик, Лобанов, 2002*).

Почвенные факторы представляют собой дренажные свойства почв, непосредственно влияющие на удержание и движение воды в них – влагоемкость и водопроницаемость соответственно. Их значения определяют режим увлажнения растительных сообществ в зависимости от типа почв, а это формирует еще один косвенный фактор влагосодержания природных ГМ (*Зубарева, 2016*).

Антропогенные факторы как внешние по отношению к ландшафту выражаются во влиянии человека на природную среду и возможность возгорания в ней. Его участие проявляется и в качестве потенциальных источников зажигания (причин), и как факторы, ослабляющие сопротивление природных систем из-за интенсивного воздействия по мере хозяйственного и рекреационного освоения территорий (*Курбатский, 1978; Андреев, Ларченко, 1987; Андреев, 2003*). В

настоящее время по вине человека происходит около 90% всех природных пожаров (*Штигунова, Занина, 2016*).

Таким образом, внешние факторы пожарной опасности отражают взаимосвязи компонентов ландшафта с природными ГМ и определяют условия, в которых они существуют. Оценка степени их воздействия является одной из задач в исследованиях природных пожаров, результаты которых выражаются в частном и совместном вкладе отдельных компонентов в пожарную опасность территории. По типу этого вклада с учетом ландшафтных процессов, наиболее определяющих возможность возгорания, внутренние и внешние факторы объединяются в группы:

- собственно *состояние и характеристики растительности* как горючего материала (внутренние факторы);
- *условия погоды* (в долгосрочном периоде *климата*) – характеризуют радиационный и тепловой баланс (чем больше энергии, тем выше вероятность зажигания), а также составляющую прихода в водном балансе (чем больше воды, тем меньше вероятность зажигания);
- *свойства поверхности* (геоморфологические, гидрологические, почвенные, отчасти геологические факторы) – определяют перемещение, расход и аккумуляцию вещества и, главным образом, воды, ограничивающей горение.

Эта «триада» групп факторов является классической в исследованиях пожарной опасности. Отдельную группу формируют *антропогенные факторы*, которые воздействуют на все элементы ландшафта.

В текущем разделе (1.2) было рассмотрено понятие пожарной опасности, которая оценивается путем исследования внутренних и внешних факторов. Однако эти факторы в свою очередь определяются факторами более высокого (планетарного) уровня – движением Земли вокруг Солнца, собственным вращением, наклоном орбиты, которые ведут к их пространственно-временной изменчивости (*Арманд, 1975*). Это означает, что влияние факторов пожарной опасности подчиняется *зональным и аazonальным географическим закономерностям*. Также это влияние изменяется во времени в соответствии с

суточными, сезонными и многолетними циклами. Исходя из этих особенностей выделяются так называемые *метафакторы*, которые обеспечивают учет пространственно-временного характера явления пожарной опасности.

Таким образом, полученная классификация факторов пожарной опасности (Рисунок 1.7) представляет собой основу для последующей оценки и предупреждения природных пожаров. Ее использование позволит учесть множественные связи, ведущие в конечном счете к состоянию природных ГМ, и получить синтетическую меру пожарной опасности, действительно отражающую текущую пожарную обстановку на территории исследования.



Рисунок 1.7. Общая классификация факторов пожарной опасности

1.3 Методики моделирования пожарной опасности

Моделирование пожарной опасности территории представляет собой решение последовательных задач ее оценки и прогнозирования. *Оценка* предполагает пространственную дифференциацию территории по показателю пожарной опасности в текущем временном срезе, а *прогнозирование* включает предсказание ее развития во времени на основе предыдущих ее состояний и знаний об особенностях изменения факторов. В сущности, обе задачи являются предсказательными и нацелены на предупреждение возгораний: при принятии

решений рассматриваются участки с высокой пожарной опасностью.

Этот раздел исследований нацелен на:

- анализ методических основ и положений моделирования пожарной опасности;
- обзор методик в этой области знаний, демонстрирующий историю их развития в России и за рубежом, текущее состояние и их разнообразие.

1.3.1 Основные методические положения

Методические основы моделирования пожарной опасности включают ряд положений, которые определяют направление и способы дальнейшего расширения рассматриваемой тематической области с учетом существующих достижений. В их число входят *общая последовательность методик*, а также *их критические составляющие*, которые формируют *состав и структуру* их конкретных примеров.

Методическая последовательность представляет собой каркас любой методики, состоящий из пошаговых действий и инструкций применения различных методов и приемов для решения задачи. В случае моделирования для оценки и прогнозирования пожарной опасности базовая последовательность методик выглядит следующим образом (*Рисунок 1.8*).

1. *Выявление факторов пожарной опасности*, характерных для исследуемой территории. Этот шаг с точки зрения разработки методики представляет собой исследование условий, в которых существуют природные ГМ, и выбор среди них наиболее важных, определяющих возможность возникновения природных пожаров. В этой работе систематизированный перечень факторов был сформирован ранее (*Рисунок 1.7*).

2. *Оценка факторов* – этап сбора фактической информации о факторах в виде *показателей пожарной опасности*. Эта категория является производной от факторов и выражает их численную оценку на основе непосредственных или дистанционных измерений. Необходимость их введения исходит из требования к последующей обработке информации с использованием математических методов (*Левачев, 2016*), а также в связи с различием физического проявления фактора и его

инструментального восприятия. Соответственно, выбор показателей пожарной опасности, с одной стороны, определяется сущностью фактора, а с другой – доступными источниками данных.



Рисунок 1.8. Базовая методическая последовательность моделирования пожарной опасности в целях оценки и прогнозирования

Рассматриваемый этап различается в оценочных и прогнозных методиках. При оценке все показатели измеряются для одного момента времени, тогда как в случае прогнозирования производится серия измерений для возможности исследования временных трендов и их экстраполяции на будущие состояния. При этом для всего перечня факторов должен соблюдаться *принцип одновременности измерений*, что позволит достоверно оценить совокупное их воздействие в отдельные моменты.

3. *Интеграция показателей в общую пожарную опасность* – для каждой точки

пространства по единовременным показателям происходит расчет пожарной опасности. В процессе разработки авторы методик выводят весовой вклад каждого фактора на основе исследования фактической возгораемости территории, а также определяют математический способ расчета. Как правило, интегральный показатель выражается в виде вероятности возгорания в относительных единицах 0...1 или 0...100%.

4. *Дифференциация территории по классам пожарной опасности* – полученная совокупность значений в соответствии с уровнем детализации исходных данных классифицируется для пространственного разграничения участков с различной готовностью к возгоранию. Каждая методика отличается своей *шкалой пожарной опасности* – совокупностью границ классов, которые должны отражать пирологические особенности территории исследования и ее фактическую возгораемость (Софронов, Волокитина, 1990).

На этом этапе важен способ визуализации результатов. Для эффективности дальнейшего анализа используют картографический метод и составляют оценочные и прогнозные карты, одиночные или в виде серии (Берлянт, 2002).

5. *Целевая интерпретация результатов* сопровождается анализом наиболее критических участков, на которых с высокой вероятностью возможно возникновение очагов возгорания. Текущий этап является важным с точки зрения последующего принятия решений. Результаты представляют в форме рекомендательных карт, составляемых на основе оценочных и прогнозных, с указанием конкретных мер по противодействию возможным последствиям.

Состав и структура методик определяются набором критических составляющих, изменение которых ведет к изменению всей методики. В базовой методической последовательности практически на каждом этапе разработки происходит их выбор и обоснование (Гизатуллин, 2021): перечня факторов пожарной опасности как основы *интерпретации явления; источников данных; методов и технологий их обработки* для расчета интегрального показателя; *пространственного уровня исследований* (Рисунок 1.9).



Рисунок 1.9. Систематизация методического разнообразия моделирования пожарной опасности

Интерпретация явления, включая постановку проблемы, оценку ее актуальности, обзор раннего опыта исследований и его последующее изучение, предполагает составление полноценной или частичной картины о нем. Для разработки методики необходимо проанализировать сущность возникновения пожаров, причинно-следственные связи, распределение их типов на территории (что и было произведено в п. 1.1, 1.2). Результатом является перечень факторов и показателей пожарной опасности с указанием структуры их воздействия.

Источники данных и их характеристики непосредственно влияют на качество получаемой информации о явлении. На основе данных ДЗЗ, моделей рельефа, метеорологических наблюдений, наземных измерений, карт и других источников производится вычисление показателей пожарной опасности. Их доступность и регулярность определяет полноту отражения факторов пожарной опасности.

Методы и технологии обработки и анализа данных тесно связаны с математизацией и информатизацией наук и обеспечивают воспроизводимость исследований. Углубление уровня знаний, экспоненциальный рост разнообразия и объемов данных, а также качественная модернизация вычислительного оборудования ведут к совершенствованию методов и технологий (Кондратенко и

др., 2017). Это положительно сказывается на методическом развитии, в том числе моделирования пожарной опасности. Традиционными в этой области являются методы математической статистики (Софронов, Волокитина, 1985), математического анализа и теории вероятностей (Гришин, 1981), значительные улучшения были осуществлены с внедрением геоинформационных технологий (Hamilton et al., 1989), алгоритмов машинного обучения (Liang et al., 2019).

Пространственный уровень определяется территорией исследования и необходимой детальностью оценки и прогнозирования. Эта характеристика влияет на выбор источников данных исходя из их пространственного разрешения и охвата. Кроме того, пространственный уровень обуславливает границы применимости методики – *глобальные, региональные и локальные*. Например, разработана глобальная методика обнаружения активных пожаров (Giglio et al., 2016), использующаяся для выявления возгораний по всей суше. Региональные методики, в основном, создаются в рамках национальных пожарных систем. Самой многочисленной является группа локальных методик, использующихся административными или хозяйственными субъектами (Глаголев, 2015).

Таким образом, рассмотренные критические составляющие обуславливают методическое разнообразие: в соответствии с ними возможна систематизация всей совокупности методик сквозь призму различных классификаций и типологий – по аспектам интерпретации явления, типам используемых данных и методов, пространственной детальности (Рисунок 1.9). Более того, они вместе с базовой последовательностью образуют основу для разработки новых методик.

1.3.2 Обзор национальных методик

Для эффективности последующего исследования территории России в первую очередь уделяется внимание *национальным методикам* моделирования пожарной опасности: как отечественным, так и зарубежным. Эта категория методик особо выделяется в силу их признанности на официальном уровне и отличается значительно более высоким уровнем финансирования с вытекающими

возможностями для экспериментов, валидации и верификации результатов. Система показателей и обзорная таблица этих методик приведена в *Приложении 1*.

Национальная методика России. В России (СССР) методическую основу оценки и прогнозирования пожарной опасности обеспечили работы Нестерова В.Г. В изначальном виде его методика заключалась в вычислении комплексного показателя (КП) по метеорологическим элементам, определяющим изменение влагосодержания ГМ (*Нестеров, 1949*):

$$\text{КП}_n = \text{КП}_{n-1} + [t(p_d - p)]_n,$$

где КП_n и КП_{n-1} – показатели Нестерова за текущие (n) и предыдущие ($n - 1$) сутки; t – температура воздуха, °С; p_d и p – давление насыщенного и текущего водяного пара в воздухе, миллибары.

Пределами ежедневного суммирования служит период без осадков более 3 мм в сутки: в случае, когда они выпадают показатель обнуляется. Разность давлений показывает дефицит влаги в воздухе. Впоследствии эта часть уравнения была заменена разностью температур – текущей t и точки росы t_d (*Нестеров, 1968*):

$$\text{КП}_n = \text{КП}_{n-1} + [t(t - t_d)]_n.$$

Полученное температурное произведение тесно коррелирует с радиационным балансом энергии для испарения влаги ($r=0,985$; *Вонский и др., 1981*). Однако оба показателя Нестерова практически не принимают во внимание количество осадков – главного источника влаги природных ГМ. Их учет ограничивается лишь пороговым значением обнуления, который за время использования методики претерпел изменения: 5; 2,5 и 3 мм в день (*Кац и др., 1975*), что свидетельствует о его нестабильности для моделирования готовности к возгоранию. В действительности такое резкое обнуление пожарной опасности, особенно в районах, где она была высокой, только за счет выпадения осадков невозможно.

Для компенсации этого недостатка в Ленинградском институте лесного хозяйства были разработаны аналогичные показатели влажности – ПВ1 и ПВ2 (*Вонский, Жданко, 1976*), расчет которых начинается с даты устойчивого схода снежного покрова и продолжается вплоть до конца пожароопасного сезона:

$$\begin{aligned} \text{при } t > 0 \quad \text{ПВ1}_n &= \{\text{ПВ1}_{n-1} + [t(t - t_d)]_{n-1}\} \cdot K_n, \\ &\text{ПВ2}_n = \{\text{ПВ2}_{n-1}\}_{n-1} \cdot K'_n + [t(t - t_d)]_{n-1} \cdot K''_n \\ \text{при } t \leq 0 \quad \text{ПВ1}_n &= \{\text{ПВ1}_{n-1} + [t - t_d]_{n-1}\} \cdot K_n, \\ &\text{ПВ2}_n = \{\text{ПВ2}_{n-1}\}_{n-1} \cdot K'_n + [t - t_d]_{n-1} \cdot K''_n, \end{aligned}$$

где K_n, K'_n, K''_n – табличные коэффициенты поправок на выпавшие за сутки осадки: чем их больше, тем сильнее уменьшаются показатели.

Приведенные методики воспроизводят условия энергетического баланса, при котором испарение происходит со свободной водной поверхности до полного высыхания тела. Однако некоторые растительные ГМ обладают свойством гигроскопичности, испарение влаги из них происходит до уровня равновесного влагосодержания, которое не может быть ниже текущей влажности воздуха. Также это свойство обуславливает повышение влагосодержания тел без выпадения осадков из-за изменения температуры и влажности воздуха (*Жуковская, 1970*).

Учет гигроскопичности ГМ был осуществлен в методике Софронова М.А. (1992). На ее основе рассчитывается показатель ПВГ:

$$\begin{aligned} \text{ПВГ}_n &= \{\text{ПВГ}_{n-1} + [(t + 10)(t - t_d - 5)]_n\} \cdot K_n, \\ K &= 1,8/(R + 1) \quad \text{или} \quad K = 1,8/(1,3T + 1), \end{aligned}$$

где K - коэффициент учета осадков, вычисляемый на основе R – суточного количества осадков или T – суточной продолжительности осадков.

Введение в основание суммирования поправки -5°C преуменьшает показатель, тем самым вкладывая в свою структуру гигроскопическое влагосодержание как ограничивающий фактор, а $+10^\circ\text{C}$ – увеличивает диапазон применения методики до отрицательных температур -10°C . Другим преимуществом является выявленная зависимость расчета поправок на количество осадков, которая исключает неточности их табличного расчета. Эта зависимость приводится также для суточной продолжительности осадков, которая в большей степени отражает увлажнение ГМ (*Софронов, Волокитина, 1990*).

Согласно базовой последовательности после расчета общего показателя пожарной опасности происходит выделение классов, отражающих различные

вероятности возгорания. Основой для классификации служит шкала Нестерова с граничными значениями классов (Таблица 1.2). С ее помощью с учетом поправок на осадки возможно видоизменение шкалы и для показателей ПВ1, ПВ2, ПВГ. Однако, следует отметить, что при их разработке авторы опирались на процесс возгорания на *эталонных комплексах природных ГМ*. Изначально рассматривался сплошной покров из мха Шребера толщиной 5-8 см в сосняках бруснично-черничных на дренированных почвах (Нестеров, 1949; Вонский и др., 1975). Впоследствии перечень эталонов был расширен, но несмотря на это он не отражает разнообразие растительных сообществ всей территории России.

Таблица 1.2. Шкала Нестерова пожарной опасности по условиям погоды (общероссийская) составлено автором на основе (Нестеров, 1968; ГОСТ Р 22.1.09-99)

Класс	I – полная негоримость	Горимость			
		II – низкая	III – средняя	IV – высокая	V – чрезвычайная
Значение КП	менее 300	301...1 000	1 001...4 000	4 001...10 000	более 10 000

Таблица 1.3. Поправки к определению границ местных шкал

Класс	I	II	III	IV	V
Методика	по доле пожаров от общего количества, %				
Курбатский, 1978	-	5	15-20%	35-40	40-45
Коровин и др., 1977	устанавливаются в зависимости от вида распределения				
Матвеев, 2002	5	15	25	25	30
Методика	по плотности пожаров, млн га⁻¹				
Софронов, Волокитина, 1990	менее 0,2	0,2...0,8	0,81...3,2	3,21...12,8	более 12,8

Соответственно, шкала в таком виде является достаточно грубой. Поэтому для локальных участков составляют *местные шкалы* с учетом произрастающей растительности и климатических условий. Впервые такая шкала была предложена для Алтая и Западной Сибири, в ее рамках устанавливались различные границы классов для весеннего, летнего и осеннего периодов пожароопасного сезона (Скворецкий, 1955). Также эти шкалы разрабатывались для отдельных типов растительных сообществ, периодов их фенологического развития, по административным районам (Фуряев, 1963; Курбатский, 1963). На сегодняшний день в качестве пространственной единицы классификации используют

лесотаксационные кварталы и выделы (*Шур и др., 2020*), возможные для обновления по данным ДЗЗ (*Плотникова, Ершов, 2015*). Разделение шкал по однородным участкам и периодам позволяет косвенно учесть в методиках внутренние факторы состояния растительности.

Впоследствии методические рекомендации по составлению местных шкал были дополнены учетом реального количества природных возгораний. В соответствии с ними для каждой однородной единицы строится зависимость количества пожаров за последние 5-10 лет от значения показателя пожарной опасности. Границы классов выделяются таким образом, чтобы в каждом классе оказалась определенная доля возгораний или их плотность (*Таблица 1.3*).

Таким образом, рассмотренные методики расчета КП, ПВ1, ПВ2 составляют основу национального моделирования пожарной опасности, ПВГ частично внедрен в регионах Сибири. Однако при их глубокой методической проработанности и последовательном совершенствовании они обладают рядом недостатков.

1. *Смещение интерпретации пожарной опасности в сторону погодных факторов.* Безусловно, погода формирует ведущие факторы, однако упускаются внутренние: все разнообразие растительных ГМ, а также прочие внешние.

2. *Несопоставимость местных шкал,* нацеленных компенсировать приведенный выше недостаток. Они разрабатываются в зависимости от реального количества пожаров, которые в свою очередь зависят от антропогенного фактора, который не учитывается при оценке. Кроме того, шкалы субъективны в зависимости от исполнителей (*Губенко, Рубинштейн, 2012*). Как следствие, одинаковые классы в разных регионах отражают разную пожарную ситуацию.

3. *Единственный источник данных – наземные метеорологические наблюдения.* Плотность метеостанций в России достаточно низкая, что приводит к грубой пространственной точности моделирования. При современной доступности других данных использование одного источника при всех его недостатках снижает потенциал достоверности методики.

4. *Малая представленность прогнозирования пожарной опасности,* что

изначально было связано с отсутствием прогнозирования температуры точки росы и относительной влажности. Существуют подходы к предсказыванию других элементов на основе эмпирических связей с температурой воздуха (*Софронов и др., 2004*), а также метеорологические модели прогноза с множеством элементов, но их использование не предусматривается методиками.

Национальная методика Канады. В Канаде, территория которой по природным условиям близка к российской, принята система *CFFDRS (Canadian Forest Fire Danger Rating System)*, развивающаяся с 1968 г. (*Lawson et al., 1987*). Она состоит из четырех подсистем (*Stocks et al., 1989*), из которых для прогноза используются *FWI (Fire Weather Index)* и *FOP (Fire Occurrence Prediction)*.

Индекс пожарной опасности погоды *FWI* был разработан на основе 17 типовых комплексов растительных ГМ Канады (*Van Wagner, Forest, 1987*). Его вычисление воспроизводит процесс воспламенения. Сначала определяют влагосодержание разных слоев ГМ, отражающих ступени возгорания и поддержания огня (поверхностное, глубинное). На их основе оценивают интенсивность возгорания и запас ГМ, которые могут загореться. Наконец, они объединяются в *FWI*, который используется для оценки глубины прогорания ГМ и последующей сложности тушения. Карты *FWI* составляются ежедневно с прогнозом на ближайшие две недели (*Lawson, Armitage, 2008*), а также ежемесячно на ближайшие 4 месяца (*Anderson et al., 2007*).

Для связи *FWI* с реальной пожарной опасностью разрабатывается индекс *FOP*, оценивающий вероятность проявления антропогенных источников возгорания, а также наступления грозных разрядов (*Woolford et al., 2021*).

Таким образом, национальная система моделирования пожарной опасности Канады во многом схожа с российской, однако является более развитой с точки зрения критических составляющих методик:

- учитывается значительно большее количество показателей, отражающих проявление ведущего фактора – погодных условий, однако в данном случае они оцениваются с различных сторон влияния на ГМ;

- в качестве исходных данных используются те же наземные метеорологические измерения, однако количество метеостанций превышает 2500 единиц, дополнительно измерения интерполируются на основе ЦМР GTOPO30;
- широко представлена прогнозная составляющая.

Вместе с этим сохраняются недостатки в виде пригодности методики только для типовых растительных комплексов, а также субъективности местных шкал.

Национальная методика США. В более южной по отношению к Канаде стране – в США используется разработка NFDRS – National Fire Danger Rating System. Она была создана в 1972 г., в последующем обновлялась в 1978 и 1988 гг. (*Deeming et al., 1972; 1978; Burgan, 1988*). Система представляет собой абстрактную модель влияния различных факторов на возникновение природных пожаров. Объект возгорания в рамках модели подразделяется на два типа – живые растительные ГМ (*live fuel*) и мертвые остатки (*dead fuel*), по-разному поддерживающие влагосодержание в ответ на изменения внешних условий среды. В зависимости от их соотношения разработаны 20 типовых моделей растительных участков (*Rothermel, 1983*). Для них производится многосторонняя оценка пожарной опасности согласно структурированной методической последовательности (*Рисунок 1.10*) на основе описаний участка с метеорологическими, геоморфологическими и растительными элементами, составляющими структурную основу интерпретации пожарной опасности.

Модель оценивает как текущую ситуацию, так и прогнозирует возгорания на 3 дня вперед (*Bradshaw et al., 2002*). На ее основе проводится разграничение классов опасности и планирование последующих профилактических мероприятий.

Таким образом, методика NFDRS сохраняет ранее указанные недостатки в виде идеальности условий проявления пожарной опасности в пределах эталонных комплексов, которые в реальной среде осложняются многочисленными воздействиями прочих факторов. Наряду с этим она обладает некоторыми преимуществами: в ходе ее разработки и применения впервые были внедрены космические данные ДЗЗ с огромным потенциалом для последующего развития, а

также расширен перечень факторов и показателей пожарной опасности. Также в 2020-х гг. планируется обновление системы до NFDRS2016 с учетом современных источников данных и алгоритмов их обработки.

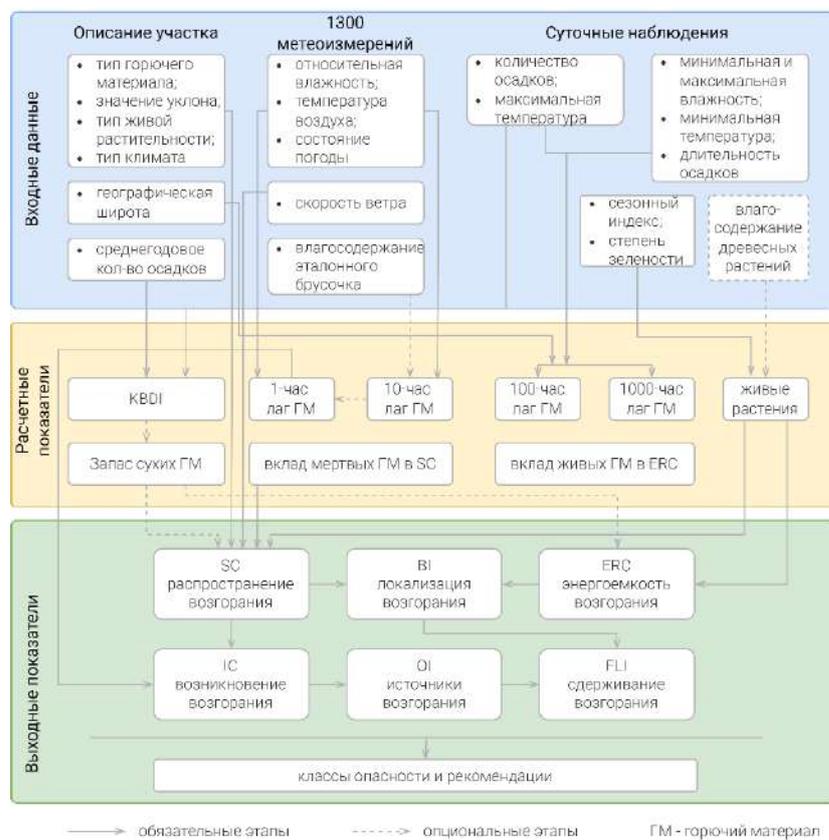


Рисунок 1.10. Последовательность вычисления показателей пожарной опасности в американской системе NFDRS, составлено автором по (Deeming et al., 1977; Burgan, 1988)

Национальная методика Австралии. В Австралии природные ГМ представлены растительностью лесов, а также саванн и редколесий. Поэтому методика моделирования пожарной опасности направлена в равной степени на лесные и степные травяные пожары. Основным показателем служит индекс МакАртура (*McArthur, 1960*) *FFDM* (Forest Fire Danger Meter), который рассчитывается на основе параметров погоды:

$$M_n = 2e^{[-0,45 + 0,987 \ln P - 0,0345V_{min} + 0,0338t_{max} + 0,0234W_{avg}]n},$$

$$P_n = \frac{1,9[KBDI + 104] \cdot (d_n + 1)^{1,5}}{3,52 \cdot (d_n + 1)^{1,5} + (s - 1)},$$

где n – текущие сутки; P – влагосодержание ГМ; V_{min} – минимальная суточная

относительная влажность воздуха, %; t_{max} – максимальная суточная температура, °С; W_{avg} – среднесуточная скорость ветра, км/ч; $KBDI$ – индекс засухи Китча-Байрама (как и в NFDRS); d_n – число суток после выпадения осадков.

Уравнение и границы классов показателя были выведены по данным наблюдений более 800 пожаров в эвкалиптовых лесах с участками кустарниковой и травянистой пустоши (*Dowdy et al., 2009*). В их основе лежит критерий сложности ликвидации прогнозируемых возгораний.

Национальные методики европейских стран. Представленность традиционных лесных ГМ здесь варьирует в среднем от 15 до 60% территории (*Tedim et al., 2015*). Исходя из этого многие страны Европы располагают собственными службами пожарной охраны, развивающими национальные методики оценки пожарной опасности. Во многом они повторяют и адаптируют вышерассмотренные модели более крупных стран (Таблица 1.4), в связи с чем наследуют их преимущества и недостатки. Более подробно особенности методик Италии, Греции, Испании, Португалии, Франции, Германии, Норвегии, Швеции, Финляндии приведены в *Приложении 1*.

Таблица 1.4. Применение наиболее эффективных национальных методик моделирования пожарной опасности в других странах

Методика	Некоторые страны их адаптации
российская (индекс Нестерова)	страны СНГ, Германия, Португалия, Норвегия, Швеция
канадская (CFFDRS)	Италия, Швеция, Индонезия, Малайзия, Мексика,
американская (NFDRS)	ЮАР, Франция, Новая Зеландия
австралийская (McArthur Index)	Италия, Танзания, Замбия

Таким образом, национальные методики моделирования пожарной опасности обладают общими чертами, которые складываются в ряд выводов.

1. Достаточно четкая *территориальная привязка* как следствие разнообразия территорий стран и нацеленности на описание пожарной опасности на ограниченном участке какого-либо государства. Она выражается в разрабатываемых эталонных и типовых комплексах, которые обладают следующими недостатками:

- даже при их большом количестве (в методиках крупных стран их насчитываются десятки) и поправках местных шкал они не передают свойства всего множества растительных сообществ, что приводит к сильному сглаживанию и усреднению действительной ситуации, то есть учет пространственно-временных метафакторов практически отсутствует;
- соответственно, изменение каких-либо начальных условий и применение для других территорий предполагает дополнительные исследования для адаптации к новым параметрам.

2. *Доминирование погодных факторов* в интерпретации явления и, как следствие, *наземных метеорологических измерений* в числе источников данных. Эти черты находят корни в начале их разработки: ко второй половине XX века метеорологические измерения были единственным источником пространственных данных, обладающих оперативностью, высокой временной частотой и регулярностью, а также объективностью в силу использования единых протоколов и инструментов (*Williams, 1967*). Это приводит к неполноте учета факторов опасности, а низкая плотность метеостанций и нерегулярность их расположения (особенно в России) обуславливает низкую пространственную точность. В большинстве стран даже при современном разнообразии других источников данных эта черта сохраняется неизменно и на сегодняшний день.

3. *Эмпирический и полуэмпирический характер* методических моделей. Границы классов пожарной опасности, коэффициенты уравнений выводятся на основе статистических данных о количестве пожаров, произошедших на определенном участке за определенный период времени. С учетом вышеупомянутой неполноты интерпретации явления эти результаты во многом являются случайными и не описывают реальные физические процессы возникновения пожаров. Однако стоит отметить, что *при большом количестве данных методики находят вполне успешное и достоверное применение.*

4. *Высокая абстрактность (грубость) представления* конечного показателя. В большинстве случаев расчетный показатель пожарной опасности выражается в

единицах, не имеющих никакого физического смысла ($^{\circ}\text{C}^2$, $^{\circ}\text{C}\cdot\text{мб}$ и др.), поэтому их зачастую игнорируют и интерпретируют как безразмерные. Дальнейший их анализ при всей глубине методической проработки сводится к разграничению пяти качественных классов. Как правило, они должны подкрепляться описаниями потенциального пожара с точки зрения дальнейшей поддержки принятия решений, однако нередки случаи, когда они всего лишь обозначают «...низкую, среднюю, высокую...» пожарную опасность. Таким образом, вся пожарная опасность как явление сводится от континуальной функции к весьма посредственным дискретным ступеням без количественного выражения.

1.3.3 Обзор развития прочих методик

Обзор национальных методик показал относительную их одноплановость с точки зрения критических составляющих и некую консервативность по отношению к современным данным и методам их обработки (о чем свидетельствует высокая доля ранних публикаций). Поэтому целью дальнейшего обзора является *демонстрация и анализ более репрезентативного набора методик в аспекте их исторического развития (Рисунок 1.11) и современного разнообразия, а также компенсации недостатков национальных методик (обзор в Приложении 1).*

Этап 1 – появление новых источников данных (1960-80-е гг.). Одной из вех развития методик моделирования пожарной опасности является *начало применения данных дистанционного зондирования*. Первые случаи зафиксированы в 1960-х гг., когда для раннего обнаружения возгораний использовали аэросъемку в среднем и тепловом инфракрасном диапазоне (*Шилин, Арцыбашев, 1969; Hirsch et al., 1971*).

Однако подъем обеспечения источниками новых данных произошел с запуском первых метеорологических и ресурсных спутников ДЗЗ в 1970-х гг. Глобальный и маршрутный режимы съемки создали условия для пространственной регулярности измерений при высоком территориальном охвате, что несвойственно наземным метеорологическим наблюдениям, с сохранением их остальных преимуществ (оперативность, регулярная временная частота, объективность).

Главным образом методики разрабатывались по данным спутников NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) и Landsat, первые образцы которых были запущены в 1970 и 1972 гг. соответственно (Sterling, 1971; Maul, Gordon, 1975). Они включали в себя исследования корреляции наземных и спутниковых метеорологических измерений, а также возможностей дешифрирования растительных ГМ.

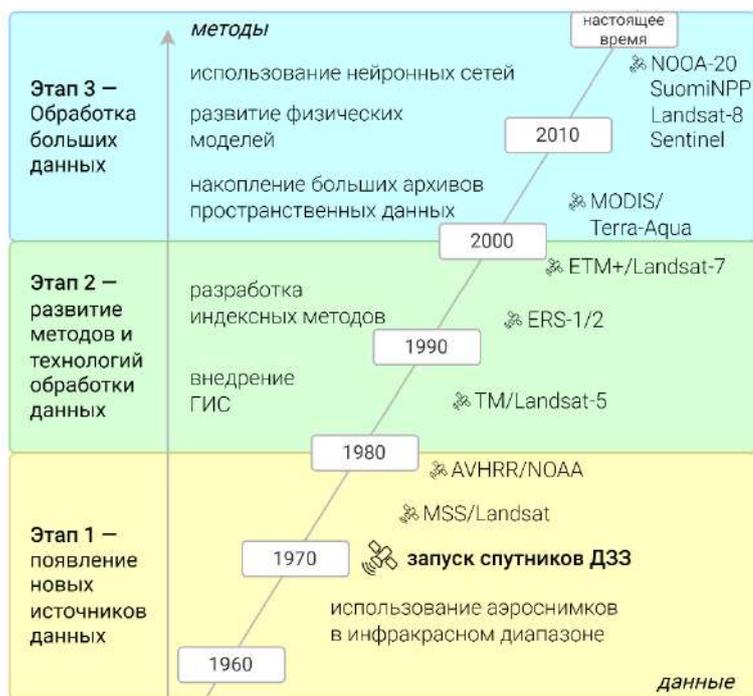


Рисунок 1.11. Основные исторические этапы и вехи в развитии методик оценки и прогнозирования пожарной опасности

Этап 2 – развитие методов и технологий обработки данных (1980-2000-е гг.). Продолжение спутниковых программ и их применение для тематических исследований сопровождалось качественным расширением методов и технологий. Основными вехами этого этапа исследований пожарной опасности являются:

- начало компьютеризации и перехода на цифровые технологии передачи и обработки данных, в том числе с метеостанций и спутников;
- последующая интеграция геоинформационных методов в тесной связи с картографическими методами исследования (Берлянт, 1985).

В частности, существенно был расширен перечень потенциальных факторов: в рамках геоинформационных систем (ГИС) были исследованы взаимосвязи между

ними и их влияние на пожарную опасность на основе взвешенной комбинации множества пространственных данных – карт, ЦМР, оптических и радиолокационных космических снимков, метеорологических наблюдений. В моделирование были введены спектральные индексы, вычисляемые по данным ДЗЗ (Таблица 1.5) на основе излучения в информативных участка спектра. Наиболее успешно использовались NDVI и его производные, а также радиационная температура (Chuvienco, Salas, 1996).

Таблица 1.5. Некоторые спутниковые съемочные системы с реализованным и перспективным потенциалом для моделирования пожарной опасности

Съемочная система	Спутники	Даты запуска
оперативная оценка на глобальном/региональном уровне		
AVHRR (Advanced Very-High-Resolution Radiometer)	TIROS-N, NOAA 6-19, Metop A-C	1978-2018
MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)	(Terra, Aqua)	1999, 2002
VIIRS (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite)	Suomi NPP, NOAA-20	2011, 2017
SLSTR (Sea and Land Surface Temperature Radiometer)	Sentinel-3A, 3B	2016, 2018
детальная оценка на локальном уровне		
MSS (Multispectral Scanner), TM (Thematic Mapper)	Landsat-1-5	1972-1984
ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus)	Landsat-7	1999
OLI (Operational Land Imager), TIRS (Thermal Infrared Sensor)	Landsat-8,9	2013, 2021
MSI (Multispectral Instrument)	Sentinel-2A, 2B	2015, 2017

Этап 3 – обработка больших пространственных данных (2000-настоящее время). К началу XXI века были накоплены огромные массивы пространственных данных. При этом накопление сопровождалось экспоненциальным характером и значительным увеличением многообразия данных. Эти наборы структурированных и неструктурированных данных получили название *больших данных*, в данном случае – *больших пространственных данных* (Edawy, Mokbel, 2015).

Весомый вклад в развитие методик моделирования пожарной опасности внесли данные со съемочной аппаратуры MODIS спутников Terra и Aqua (1999 и

2002 гг.), которые обеспечили продолжение ряда AVHRR (NOAA; *Hernandez-Leal et al., 2008*). Кроме того, были внедрены принципиально новые типы данных – снимки с маневренных беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), заменяющих авианосители съемочных систем (*Sudhakar et al., 2020*), и лазерная съемка, отражающая пространственную структуру ГМ (*Hendawitharana et al., 2021*).

Дальнейшая интерпретация пожарной опасности расширена путем разработки новых индексов, учитывающих физические процессы возгорания на основе космической инфракрасной съемки MODIS (*Dasgupta et al., 2006; Фильков, 2014*). Кроме того, методическую базу пополнили элементы теории вероятностей с использованием статистических архивов о пожарах (*Подольская и др., 2011*). Наконец, успешное целевое применение большие данные нашли в методиках на основе нейронных сетей (НС), которые позволяют обучать вычислительные алгоритмы с выявлением неочевидных закономерностей. Для моделирования пожарной опасности используют многослойные перцептронные, сверточные и рекуррентные НС, интегрирующие множество данных – космических снимков, метеомоделей, картографических сервисов, ЦМР (*De Vasconcelos et al., 2001; Maeda et al., 2009; Yu et al., 2017; Palacio, MacFarlane, 2021; Prapas et al., 2021*).

Таким образом, общее историческое развитие методик моделирования пожарной опасности происходит путем появления новых вех при сохранении влияния старых (*Рисунок 1.11*). Их содержательное разнообразие определяется критическими составляющими – набором факторов пожарной опасности, источниками данных, методами их обработки и пространственным уровнем. Путем их сравнения с национальными методиками были сделаны следующие выводы.

1. Они включают более обширный перечень источников данных, методов и технологий их обработки, зачастую обладают большей глубиной интерпретации явления на основе физических моделей, что позволяет более комплексно оценить пожарную опасность. При этом основными источниками данных являются данные ДЗЗ, в большинстве случаев – со средним и низким пространственным разрешением (сотни м, первые км), но высокой обзорностью (тысячи км), частотой

съемки (несколько раз в сутки) и оперативностью (практически в режиме реального времени). Главную «тройку» формируют данные AVHRR (NOAA), MODIS (Terra/Aqua), VIIRS (NOAA-20, SuomiNPP).

2. Новые методики, синтезирующие в себе данные ДЗЗ и технологии их обработки (ГИС, нейронные сети), частично или полностью интегрируются в системы оценки пожарной опасности небольших стран и регионов, однако в ведущих системах крупных стран они *либо не внедрены, либо являются дополнительными по отношению к основным метеорологическим методикам.*

3. Чаще всего, основой для тестирования разрабатывающихся методик служат результаты национальных метеорологических методик, что ведет к *нерепрезентативности оценки относительно реальной пожарной ситуации.*

4. *Сохраняется территориальная привязка методик:* перечень факторов и показателей пожарной опасности, границы классов являются уникальными лишь для локальных однородных участков. Вдобавок, *не учитываются или учитываются дискретно географические и сезонные метафакторы,* что сильно сглаживает моделирование ввиду нелинейности их воздействия.

1.4 Информационные системы мониторинга пожарной опасности

В настоящее время количество разработок в области методического обеспечения моделирования пожарной опасности исчисляется тысячами (*Таблица 1.6*) и растет по экспоненциальному закону. В связи с этим возрастает сложность информационного ориентирования в тематической области. Кроме того, большое количество открытых разработок являются трудно воспроизводимыми, что препятствует их независимому тестированию и последующему применению. Поэтому эффективность методик зависит не только от содержательной составляющей, проанализированной ранее (*п. 1.3*), но и от формы его представления. В связи с этим большой интерес вызывают *информационные системы мониторинга пожарной опасности,* предназначенные для регулярных наблюдений и контроля пожарной ситуации на основе *практической реализации*

методик и обеспечивающие распространение ее результатов посредством средств сетевых технологий, чаще всего, Интернета.

Таблица 1.6. Количество результатов по тематическим запросам в научных поисковых системах (актуально на 02 апреля 2022)

Запрос “Fire danger -	Поисковые системы			
	Google Scholar	Science Direct	Academic Search Engine	Elsevier
assessment”	20 800 / 3030*	21 409 / 833	4 332 / 419	10 292
evaluation”	20 500 / 2200	28 222 / 1 012	5242 / 162	9 936
prediction”	16 800 / 1840	10 607 / 725	4735 / 310	4 792
forecast”	9 710 / 1040	5 598 / 455	3240 / 238	2 112
monitoring”	18 600 / 2270	21 131 / 702	4200 / 195	5 431

*через косую черту даны количество результатов по нестроному и строгому (с точным упоминанием словосочетания) запросам соответственно, при возможности системы

На текущем этапе предполагается выполнить аналитический обзор таких систем в аспекте оценки и прогнозирования пожарной опасности. Целью обзора является анализ функциональных тематических возможностей, включая исходные данные, реализованные методики и доступную информацию.

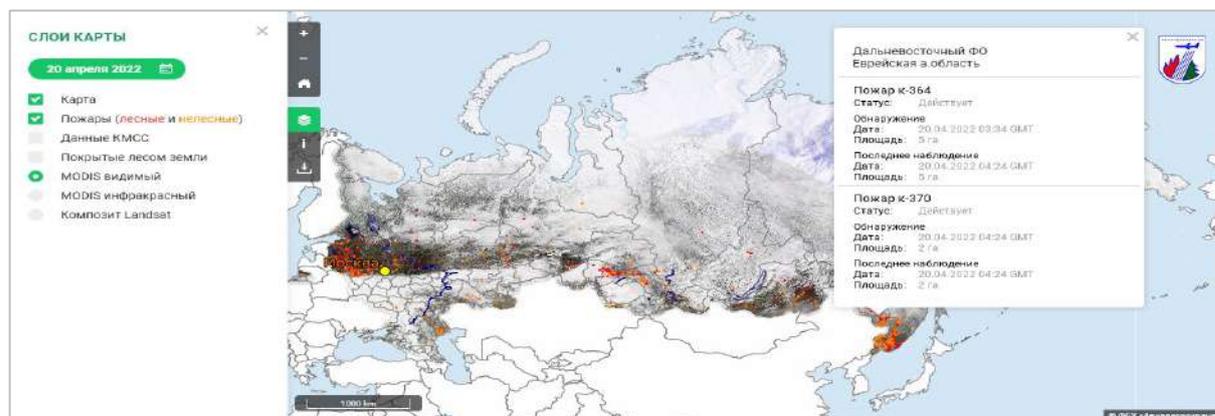
Рассматриваемый перечень выглядит следующим образом:

- ИСДМ-Рослесхоз (Информационная система дистанционного мониторинга);
- CWFIS (Canadian Wildland Fire Information System);
- WFAS (US Wildland Fire Assessment);
- EFFIS (European Forest Fire Information);

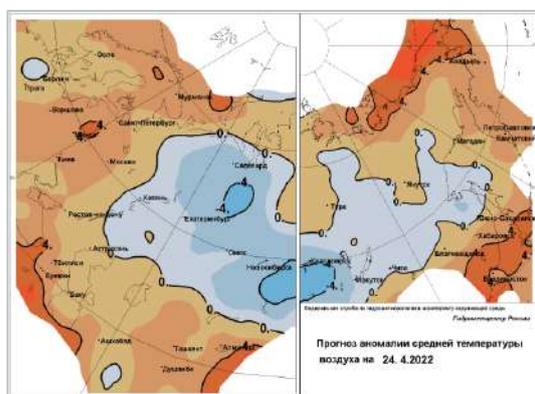
ИСДМ-Рослесхоз – система мониторинга лесных пожаров (*URL: <https://nffc.aviales.ru/>*), находящаяся под ведомством Федерального агентства лесного хозяйства РФ и ФБУ «Авиалесоохрана». Мониторинг осуществляется с целью моделирования возгораний, обнаружения их активных проявлений и инвентаризации последствий. Собственно информационная система является закрытой, доступ к данным производится по запросу только для уполномоченных организаций. Однако существует интерфейс открытых данных (*Рисунок 1.12а*) с ограниченным набором информации.

Особенностью системы является использование данных большого числа (28) отечественных и зарубежных космических съемочных систем, в частности, со

спутников Электро-Л, Метеор-М, Канопус-В, Ресурс-П, Meteosat, Sentinel-2/3/5, NOAA, SNPP, Terra/Aqua, Himawari, Landsat, SPOT (Ковалев и др., 2020). Их дополняют наземные и авиационные данные (Луян и др., 2015).



а)



б)



в)

Рисунок 1.12. ИСДМ-Рослесхоз: а) интерфейс открытых данных; б) пример прогноза аномалий средней температуры воздуха в) Пример предварительного прогноза пожарной опасности территории РФ (ФБУ «Авиалесохрана», URL: <https://aviales.ru/popup.aspx?news=7061>)

Однако вся эта совокупность применяется главным образом для выявления текущих очагов возгораний и наблюдения за их динамикой и последствиями. Прогнозная часть методически реализована только для моделирования распространения пожара, в основе которого лежит адаптированный для территории России алгоритм из системы CFFDRS (Хвостиков и др., 2016). При этом возникновение возгораний как компонент пожарной опасности рассматривается очень слабо и не имеет под собой какой-либо методической реализации оценки вероятности этого события. Представленность этого аспекта ограничивается материалами по наземным метеорологическим данным:

— ежесуточный обобщенный прогноз погодных условий по регионам РФ на

ближайшие шесть дней, в котором указываются преобладающее и максимальные значения температуры, наибольшее количество осадков, количество метеостанций, доля от них, где были осадки, в т.ч. более 3 мм; — прогнозная карта аномалий средней температуры, также на ближайшие шесть дней (Рисунок 1.12б).

Эти данные в детализированном виде используются ФБУ «Авиалесохрана» для ежемесячного предварительного прогноза пожарной опасности в России по методике Нестерова (Рисунок 1.12в), однако результаты публикуются вне системы.

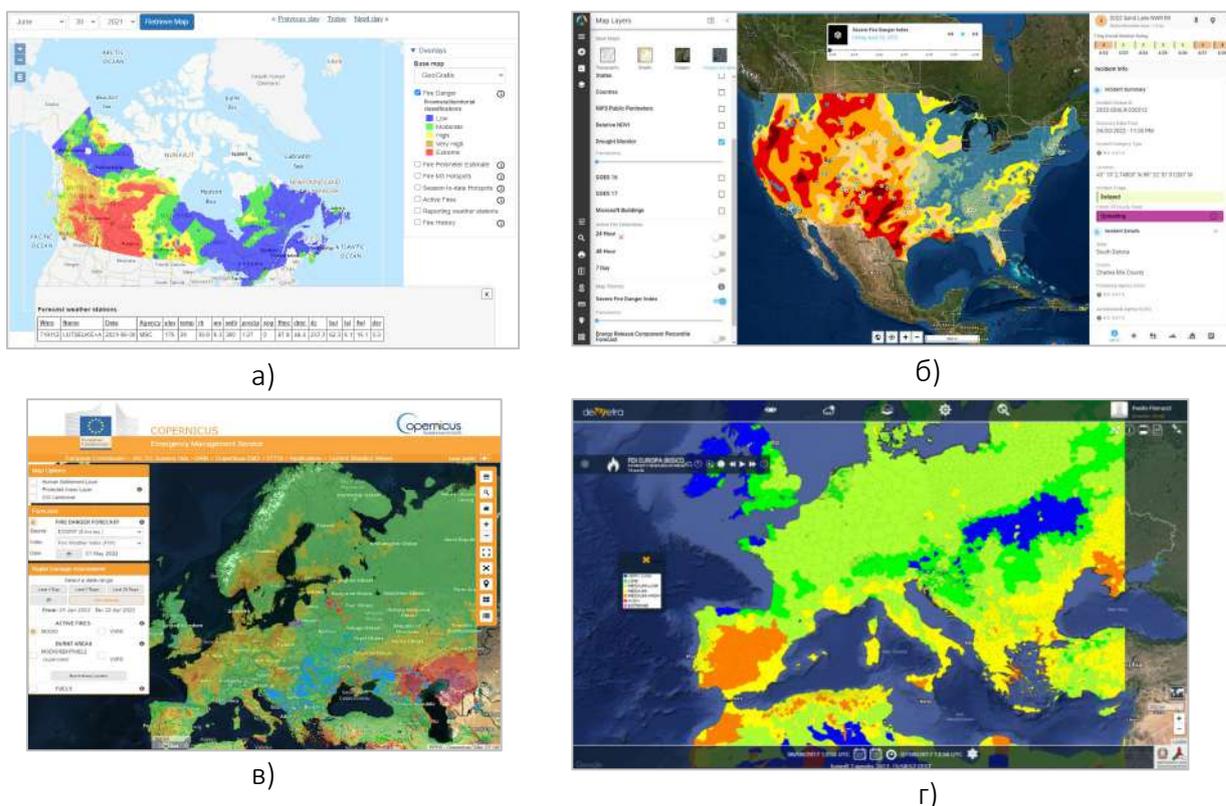


Рисунок 1.13. Интерфейс зарубежных систем мониторинга пожарной опасности: а) CWFIS; б) WFAS (WilfireSAFE); в) EFFIS; г) RISICO

Открытые выходные данные ИСДМ-Рослесхоз тематически представлены слоем лесных и нелесных пожаров с возможностью просмотра атрибутов: статус, дата и площадь при обнаружении и последнем наблюдении (Рисунок 1.12а). Их актуальность составляет 1-2 суток. На их основе формируются ежесуточные табличные и текстовые отчеты по регионам РФ, включающие нарастающий итог количества и площади возгораний в течение текущего сезона (Руководство по использованию..., 2019). Архивная информация за предыдущие годы недоступна.

Для пользователей закрытой части системы существует возможность автоматической рассылки обновляемых данных (Прошин и др., 2005).

Таким образом, ИСДМ-Рослесхоз представляет собой одну из крупнейших систем мониторинга природных пожаров в мире. Однако прежде всего она ориентирована на выявление и оценку последствий от произошедших возгораний. Прогнозная часть, косвенно являющаяся практической реализацией российской методики Нестерова, развита недостаточно при потенциале современных достижений. Вместе с тем приватность системы, недоступность архивных данных, обобщенность представления информации снижает возможности тестирования.

CWFIS – открытая реализация канадской национальной системы оценки пожарной опасности CFFDRS (*URL: <https://cwfis.cfs.nrcan.gc.ca/>*). Ее информационная оболочка состоит главным образом из интерфейса с интерактивной картой, а также из отчетов и поясняющих материалов.

Карта включает несколько слоев данных (Рисунок 1.13а), ключевым из которых является классификация пожарной опасности FWI территории Канады. Кроме того, возможно подключение вспомогательных слоев с текущими, пройденными за сезон и историческими пожарами в площадном и точечном вариантах. Также доступна информация по метеостанциям с исходными и расчетными показателями. Особенностью карты является временная привязка: диапазон ежедневного выбора дат варьирует от 1 января 2000 г. (архив) до +14 дней к настоящему моменту (прогноз). По каждому слою приводятся подробные метаданные – описания методик, что улучшает их воспроизводимость.

Среди прочих функциональных возможностей следует отметить формирование аналитических карт, графиков и отчетных материалов. Они содержат исторический анализ пожарной опасности с выделением нормалей промежуточных и итоговых показателей CFFDRS за 1981-2020 гг., а также динамику текущей ситуации в виде количественно-площадного распределения возгораний по регионам Канады (Mrozewski, 2018). Дополнительным преимуществом системы является доступность исходного кода в виде библиотек

языков программирования для реализации методики CFFDRS (Wang et al., 2015).

WFAS – система мониторинга пожарной службы США (USFS, URL: <https://www.wfas.net/>), реализованная на базе национальной методики NFDRS. Как уже было отмечено, существует несколько ее версий: на сегодняшний день используется NFDRS1988, а также проводятся испытания NFDRS2016.

Реализация NFDRS1988 осуществлена в виде статической информационной системы, с помощью которой можно получить картографические материалы в виде отдельных изображений или слоя в формате *.kml. Тематический перечень представлен показателями пожарной опасности типовых комплексов ГМ, а также метеорологическими измерениями и космическими снимками. Временной ряд актуальности материалов включает в себя как архивные данные, так и прогноз на один день вперед. Примечательно, что для текущей ситуации приводится вчерашний прогноз, что позволяет оценить его точность. Все данные сопровождаются детальными метаданными (WFAS Users's Guide, 2022).

Более технологичной в плане визуализации и анализа является реализация NFDRS2016 в виде веб-приложения WildfireSAFE (USFS, URL: <https://wildfiresafe.fs.usda.gov/pro>). Интерфейс системы (Рисунок 1.13б) оснащен инструментами ГИС – пространственного поиска, фильтрации, измерений, вывода атрибутов. По каждой точке пространства указывается история изменения показателей, а также приводится прогноз на ближайшие 7 дней. Практически все данные доступны для выгрузки из системы в графическом или табличном виде.

EFFIS – информационная система, созданная Европейской комиссией в рамках программы мониторинга чрезвычайных ситуаций Copernicus в странах Европы, Северной Африки и Ближнего Востока. Направлением мониторинга является моделирование пожарной опасности на основе текущей ситуации и трендов, выявленных по архивным данным (San-Miguel-Ayans et al., 2012).

Содержательной базой EFFIS являются показатели канадской методики CFFDRS, адаптированные для условий природы Европы с учетом временных трендов погоды за 30 лет. Также интегрируются показатели методик США

(NFDRS) и Австралии (индекс МакАртура). Источниками данных для их реализации служат метеомодели ECMWF (пространственное разрешение 8 км) и MeteoFrance (10 км) с прогнозом до 9 и 3 дней (*San-Miguel-Ayanz et al., 2018*).

Интерфейс системы (*Рисунок 1.13в*) представляет собой интерактивную карту с возможностью управления слоями пожарной опасности. Пользовательский анализ осуществляется с помощью пространственной и временной фильтрации данных, построения графиков изменения показателей поточечно или обобщенно для произвольной площади. Доступна также загрузка выходных данных в форматах – *.shp, *.csv, *.tif, *.kml, *.geojson (*User's Guide to EFFIS..., 2018*).

Логическим продолжением EFFIS является ее региональная вариация **RISICO** (*Рисунок 1.13г*). Она состоит из тех же показателей, но для отдельных регионов они рассчитываются с использованием данных более плотной сети метеостанций с разрешением до 50 м (*Fiorucci et al., 2011*).

Помимо рассмотренных выше информационных систем следует упомянуть **FIRMS** (Fire Information for Resource Management System, *URL: <https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov>*) – систему контроля природных возгораний, разработанную космическим агентством США NASA. Она является главным источником информации в мире об активных пожарах, детектируемых по данным MODIS (Terra/Aqua) и VIIRS (SuomiNPP, NOAA-20). Слои возгораний размещаются в околореальном времени: исходные данные обрабатываются в течение 3 часов после съемки. Все результаты мониторинга доступны в свободном виде с возможностью пространственно-временной выборки.

Таким образом, наиболее успешные примеры информационных систем являются практической реализацией национальных методик крупных стран. Опыт их организации должен быть опорой для решения задач моделирования пожарной опасности. Они позволяют:

- повысить практическую значимость теоретических исследований и методик;
- упростить их применение путем автоматизации процессов;
- а также открывают возможности для их усовершенствования при содействии

независимых исследователей, проводящих тестирование результатов.

При этом важную роль играют визуальные и аналитические возможности платформ, а также их быстроедействие, удобство взаимодействия, что необходимо учитывать при разработке новых информационных систем.

1.5 Нормативно-правовое регулирование и состояние пожарной охраны природных территорий в России

Несмотря на широкое научно-методическое обеспечение предмета пожарной опасности принятие решений по охране от природных пожаров остается за человеком, а именно за уполномоченными подразделениями и закрепляется нормативной-правовой документацией. В текущем разделе анализируется регулирование пожарной охраны природных территорий в России (Рисунок 1.14) и ее состояние как природно-административной системы, что помимо прочих аспектов необходимо учитывать в моделировании пожарной опасности.



Рисунок 1.14. Нормативно-правовое обеспечение моделирования пожарной опасности в России

В Земельном кодексе РФ (ЗК) закреплены положения, регулирующие дифференциацию территории России как природного объекта и ресурса на земельные участки и отношения по их использованию и охране (ЗК, гл. I-II), контролю их состояния (гл. XI-XII). В аспекте пожарной опасности природных ГМ наиболее важными являются земли лесного фонда (ЗК, ст. 101), частично земли сельскохозяйственного назначения, ООПТ и запаса (ст. 77-79; 94-95; 97-98; 103).

Охрана лесов более целенаправленно регламентируется Лесным кодексом РФ

(ЛК), в котором закреплены типовые мероприятия по их освоению (ЛК, гл. 2), воспроизводству (гл. 4), защите (гл. 3.1) и проектированию (гл. 5). По целевому назначению леса делятся на защитные, эксплуатационные и резервные, для них устанавливаются допустимые режимы использования (ЛК, ст. 12; ст. 110-119).

Более подробно пожароохранная деятельность рассматривается в гл. 3 ЛК: ст. 51-60. Все леса на территории РФ подлежат охране от пожаров, которая подразумевает собой 1) обеспечение пожарной безопасности и 2) тушение возникших возгораний (ЛК, ст. 51). Для оптимизации мер вводится *лесопожарное зонирование* – дифференциация лесов России по способу охраны (наземными, авиационными или космическими средствами) по признакам – экономическое и экологическое значение, социально-экономическое развитие, природная пожарная опасность типов лесных пород (ЛК, ст. 51).



Рисунок 1.15. Лесопожарное зонирование России на 2021 год
составлено автором на основе (ФБУ ВНИИЛМ «Центр лесной пирологии», URL:
<https://firescience.ru/event/092019/zonirovanie.html>)

Обеспечение пожарной безопасности главным образом осуществляется путем предупреждения возгораний, мониторинга, разработки планов тушения возгораний (ЛК, ст. 53), то есть организуется полный цикл мероприятий от оценки и

прогнозирования до принятия решений. Также (*ЛК, ст. 53*) законодательно закреплён перечень факторов пожарной опасности – *природная пожарная опасность лесов* и *пожарная опасность по условиям погоды* (внутренние постоянные и внешние погодные факторы согласно ранее разработанной общей классификации; *Рисунок 1.7*). Их учёт – порядок вычисления и классификации пожарной опасности, утверждён Приказом Рослесхоза №287.

В состав профилактических мероприятий по предупреждению возгораний включены развитие инфраструктуры для снижения опасности (*ЛК, ст. 53.1*). Вместе с тем мониторинг пожарной опасности проводится наземными, авиационными и космическими средствами, упор выполняется на организацию системы обнаружения пожаров (*ЛК, ст. 53.2*), а не на их прогнозирование.

Расширением ЛК в области мониторинга пожарной опасности является стандарт ГОСТ Р 22.1.09-99, официально закрепляющий методику моделирования пожарной опасности в РФ. Степень возгораемости оценивается по показателю Нестерова (*п. 1.3.2*), приводится перечень исходных данных и методика его вычисления. Исходной однородной единицей для классификации по общероссийской или региональной шкале принимается лесной квартал с последующим обобщением на участки лесничеств, лесных хозяйств и субъектов РФ. Класс пожарной опасности совместно с другими данными используется для прогнозирования пожаров (*Рисунок 1.16*), однако методика этой части в документе не представлена и ссылается на местные уровни органов власти. Это свидетельствует о разрозненности прогнозирования в зависимости от исполнителя.

Пожароохранная деятельность детализирована в Постановлении Правительства РФ №1614, в частности, по правилам пожарной безопасности в лесах. Кроме того, учёт влияния антропогенного фактора регламентирован в Федеральных законах №123 и 384: установлены требования к допустимым значениям расстояний от инфраструктуры населённых пунктов до лесных массивов и наличию противопожарных разрывов между ними. Соответствующая терминология в области охраны лесов зафиксирована в ГОСТ 17.6.1.01-83.

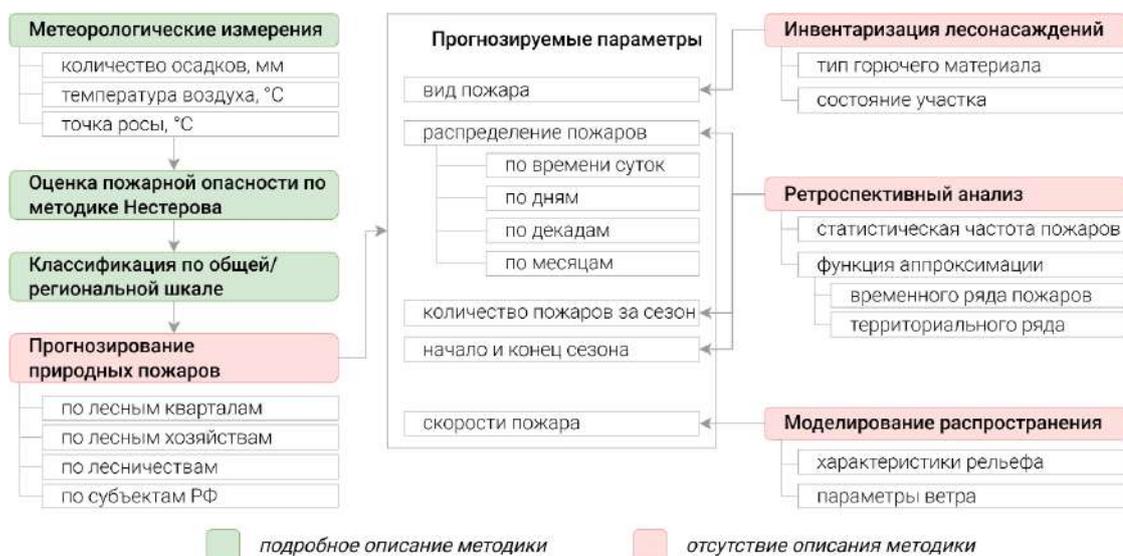


Рисунок 1.16. Официальная методика РФ оценки и прогнозирования пожарной опасности составлено автором по ГОСТ Р 22.1.09-99

Исполнение и координирование мероприятий, представленных в нормативно-правовой документации по охране природных территорий от пожаров, реализуется преимущественно Рослесхозом (Постановление Правительства РФ №736), МЧС (Указ Президента РФ №868) и Минприроды РФ (Постановление Правительства РФ №1219). Контроль пожарной опасности разделен между ними по целевому назначению: Рослесхоз является ответственным за земли лесного фонда, МЧС – за земли сельскохозяйственного назначения, а Минприроды – за земли ООПТ. Распределение ответственности также осуществляется по их подведомственным структурам на различных уровнях – федеральном, региональном и местном. Такая множественность контроля зачастую ведет к дублированию функциональных обязанностей и рассогласованности действий при отсутствии четкого оперативного протокола обмена информацией. Это является причиной информационной противоречивости и ухудшает эффективность совместного мониторинга пожаров.

Таким образом, анализ нормативно-правового регулирования пожарной охраны природных территорий в России позволяет сделать следующие выводы.

1. Происходит *непрерывная оптимизация области охраны от природных пожаров*, которая при прочих чертах включает в себя сокращение уполномоченных структур, недостаток финансирования, как следствие, ослабление

контроля и ежегодный рост числа возгораний.

2. *Нормативно-правовая документация по большей части касается действий в отношении лесных пожаров*, тогда как другие типы остаются вне поля регулирования. Этот недостаток был учтен сравнительно недавно: в 2020 г. посредством поправок в ЛК (Федеральный закон №454) введено понятие ландшафтного пожара (синоним природного, рассматриваемого в текущей работе) и лесного как его подтипа. Однако на практике это еще не нашло применения.

3. *Прогнозирование природных пожаров слабо отражается в нормативных документах*, актуальность методического обеспечения достаточно низкая и относится к середине прошлого века, также наблюдается изолированность источников данных и технологий от современных достижений.

Все эти выводы во многом перекрываются с недостатками национального методического обеспечения оценки и прогнозирования пожарной опасности, что указывает на их тесную взаимосвязь и совместное развитие. Это обуславливает необходимость учета нормативно-правового регулирования при развитии научно-методической составляющей оценки и прогнозирования пожарной опасности, особенно в области принятия решений.

Выводы по главе 1

Комплексный анализ состояния вопроса в различных аспектах исследования природных пожаров и пожарной опасности показал следующие выводы.

1. Основным элементом понятия природного пожара при моделировании пожарной опасности является *объект возгорания*, в частности, *природный горючий материал*. В зависимости от его особенностей выделяются основные типы природных пожаров на территории России – *лесные, степные и торфяные*. Обзор их исследований показал, что природные пожары на территории РФ исторически являются предметом глубокого изучения и представлены рядом направлений, в том числе оценкой условий возгорания для целей их предупреждения.

2. *Пожарная опасность* представляет собой сложное многофакторное явление, определяющее возникновение природных пожаров. В ходе его анализа

были рассмотрены разнообразные *факторы пожарной опасности*, встречающиеся в существующих исследованиях, и установлено, что практически каждый элемент окружающей среды прямо или косвенно влияет на возгораемость территории. Исходя из этого в соответствии с системным ландшафтным подходом была разработана общая классификация факторов для дальнейшего использования в работе.

3. *Систематизация методического обеспечения моделирования пожарной опасности* позволила выявить *базовые этапы методик* и *составные критические составляющие*, формирующие основные методические положения. Сравнительно-аналитический обзор *национальных методик* показал их территориальную обусловленность, преобладание факторов погоды и наземных метеорологических измерений, а также абстрактность представления показателя пожарной опасности. В рамках последующего *обзора прочих методик* было установлено, что часть из этих недостатков может быть компенсирована современными источниками данных, методами и технологиями их обработки.

4. *Информационные системы мониторинга пожарной опасности*, рассмотренные в качестве практической реализации методик, упрощают их применение путем автоматизации выполнения и позволяют распространить результаты для принятия решений о превентивных мерах.

5. *Нормативно-правовое регулирование пожарной охраны природных территорий в России* при всем многообразии научно-методического обеспечения находится в состоянии вынужденного сокращения, что ограничивает практическое развитие этой отрасли. Недостаточная проработка прогнозной составляющей на официальном уровне подтверждает актуальность работы.

ГЛАВА 2. ИСХОДНЫЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ ДАННЫЕ МОДЕЛИ ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ

Перечень исходных данных, их структура, качество и другие особенности влияют на подходы к их дальнейшей обработке и определяют методику, в том числе границы его применения. В соответствии с этим к выбору исходных данных в виде геоинформационных продуктов для последующего моделирования пожарной опасности применяются следующие критерии:

пространственно-территориальные

- *информационное содержание* – описание суши как части земной поверхности, на которой возможно действие исследуемого явления – природных пожаров;
- *территориальный охват* – покрытие всей территории России;
- *пространственная ориентированность* – координатная привязка тематической информации, основа для совместного анализа данных;

временные

- *регулярное обновление* – обеспечение постоянной актуальности данных, особенно для часто изменяющихся явлений, что также относится к факторам пожарной опасности;
- *оперативность, близкая к реальному времени* – своевременное принятие решений, а также совместно с высокой частотой обновления – соблюдение принципа единовременности данных для всей территории;
- *продолжительность функционирования и альтернативность источников данных* – обеспечение долгосрочной перспективы их использования;

технические

- *высокая достоверность и надежность* – выполнение требований по качеству результата, этот критерий определяет процесс получения данных – он должен быть преимущественно *инструментальным* для объективности измерений;
- *открытые форматы* – возможность автоматизации обработки больших и обновляемых массивов данных;
- *неограниченный доступ и свободное использование в некоммерческих целях*,

что регламентируется научной и технической открытостью разработок.

С учетом выделенных ранее факторов пожарной опасности (*Рисунок 1.7*), которые задают информационное назначение данных, вышеперечисленным критериям полностью отвечают *данные ДЗЗ* и *метеорологические модели*. Эти типы данных прочно закрепились в практике исследования пожарной опасности. Они предоставляют основной массив объективной информации о наиболее важных факторах, таких как состояние наземных объектов как потенциальных природных ГМ (внутренние факторы), а также атмосферных явлений, определяющих динамику их свойств (группа факторов условий погоды).

Также частично удовлетворяют критериям *цифровые модели рельефа* и *картографические слои*. Зачастую они не являются регулярно обновляемыми, однако могут быть источником информации о явлениях, медленно изменяющихся во времени относительно пожарной опасности. Они показывают *состояние поверхности* (геоморфологические, косвенно гидрологические и почвенные факторы) и антропогенной среды (*факторы влияния человека*).

Следует отметить, что помимо выделенных типов данных в исследовании используются текстовые источники в виде научной и правовой литературы, методических рекомендаций, данные теоретических и эмпирических закономерностей. Однако они не составляют основу исследования и являются вспомогательными, поэтому далее подробно не рассматриваются.

Таким образом, были определены четыре типа исходных данных – *данные ДЗЗ*, *метеорологические модели*, *цифровые модели рельефа* и *картографические слои*, соответствующие группам факторов пожарной опасности, определяющихся свойства природных горючих материалов (в основном, растительности), условиями погоды, свойствами поверхности и влиянием человека. Выбранные данные являются технически сложными и подготавливаются узконаправленными специалистами. Как следствие, при дальнейшем уточнении этих данных необходимо стремиться использовать наиболее конечные версии продуктов во избежание ошибок самостоятельной обработки сырой информации. Далее

проводится выбор конкретных продуктов данных с учетом специфичных критериев, а также детализируются их характеристики, состав и структура.

2.1 Данные дистанционного зондирования Земли

Данные дистанционного зондирования, а именно продукты космической съемки Земли обладают такими преимуществами, как обзорность и комплексность отображения всех элементов местности, в том числе труднодоступных районов, периодичность обновления.

Выбор съемочной системы. Для сужения круга потенциальных космических систем перечень критериев дополняется *наличием каналов видимого и инфракрасного диапазонов спектра* при регистрации излучения, которые являются чувствительными при исследовании пожарной опасности. Кроме того, необходимо учитывать *уровень обработки данных*: они должны быть скорректированы с точки зрения компенсации геометрических, радиометрических и атмосферных искажений. Это, во-первых, повысит качество продукта за счет улучшения пространственной привязки и радиометрических свойств, и во-вторых, уменьшит потенциальную вычислительную нагрузку, освобождая от достаточно затратных подготовительных процедур коррекции данных. Атмосферная коррекция также важна для оперирования разновременными данными. Этим условиям соответствуют продукты 2-го и выше уровня обработки, оперативность поставки которых повышается за счет ускоренного режима NRT (Near Real Time).

Из сочетания множества съемочных систем, удовлетворяющих отдельным критериям, для дальнейшего применения пригодны те, параметры съемки (высота орбиты, характеристики аппаратуры) которых позволяют формировать космические снимки крупнорегионального территориального охвата, среднего пространственного разрешения, суточной временной частоты съемки одного и того же участка (классификация по *Книжникову и др., 2011*). К ним относятся действующие съемочные аппараты AVHRR (спутники NOAA-15/18/19), MODIS (Terra/Aqua), VIIRS (SuomiNPP/NOAA-20), OLCI/SLSTR (Sentinel-3A/3B). Из этого

перечня были исключены AVHRR в силу отсутствия перспективных спутников-носителей, VIIRS и OLCI/SLSTR по причине меньшего ряда наблюдений (однако в будущем именно они должны стать заменой уже традиционным AVHRR и MODIS; *Schueler et al., 2015*). В итоге, были выбраны **данные MODIS**, обладающие

- длительным временным рядом за весь XXI век, что позволит использовать потенциал методов исследования больших пространственных данных;
- сходством по спектральным и пространственно-временным характеристикам с современными съемочными системами (те же VIIRS и OLCI/SLSTR), что позволяет наследовать закономерности и перспективные возможности;
- потенциальными заменами в случае их недоступности.

Характеристики данных MODIS. Научно-исследовательские спутники Terra и Aqua были запущены по программе EOS (Earth Observing System) в 1999 и 2002 гг. соответственно и функционируют на околополярных солнечно-синхронных орбитах высотой 705 км. Одним из компонентов их целевой нагрузки является гиперспектральная сканерная система среднего разрешения MODIS, которая производит съемку в 36 каналах видимого и инфракрасного спектра (0,4...14,4 мкм; *Таблица 2.1*). Ширина полосы съемки составляет 2 330 км, что позволяет получать снимки на одну и ту же территорию 0,5-2 раза в сутки (*Lindsey, Herring, 2005*).

Продукты, формируемые на основе данных MODIS, подразделяются по уровням обработки (NASA, URL: <https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct>):

- *сырые данные (1A)* – необработанные величины регистрации отраженного излучения по 36 каналам, вспомогательная информация с метками времени, координатами спутника и описанием работы системы; эти данные сбрасываются с космического аппарата в режиме прямого вещания и могут быть свободно получены любым пользователем с приемной антенной (NASA, URL: <https://modis.gsfc.nasa.gov/data/directbrod>);
- *калиброванные данные (1B)* – пространственно-ориентированные изображения с откалиброванными значениями спектральной плотности энергоемкости (Вт/мкм/стер/м²);

— тематические продукты (2 и 3) – производные изображения по областям исследований – для суши (Land), океана (Ocean), атмосферы (Atmosphere), криосферы (Cryosphere).

Следует отметить, что алгоритмы обработки данных MODIS, особенно в части калибровки и коррекции постоянно совершенствуются. Переход к новым алгоритмам осуществляется не только для текущих сцен съемки, но и для массива наблюдений с 1999 г., что позволяет сохранять однородность всего ряда продуктов. Наборы данных, обработанных едиными алгоритмами, называются *коллекциями*. На момент исследования (2022 г.) наиболее актуальными являются продукты коллекции 6.1 (*Modis Land C61 Changes, 2019*).

Таблица 2.1. Характеристики каналов съемочной системы MODIS
составлено автором на основе (NASA, URL: <https://modis.gsfc.nasa.gov>)

Группа каналов	Назначение	№	Длина волны, мкм	Группа каналов	Назначение	№	Длина волны, мкм
Разрешение 250 м				Разрешение 1 000 м			
А	Границы объектов	1	0,620-0,670	D	Атмосфера, водяной пар	17	0,890-0,920
		2	0,841-0,876			18	0,931-0,941
Разрешение 500 м						19	0,915-0,965
B	Свойства земных объектов, облаков, аэрозолей	3	0,459-0,479	E	Температура земной поверхности и облаков	20	3,660-3,840
		4	0,545-0,565			21	3,929-3,989
		5	1,230-1,250			22	3,929-3,989
		6	1,628-1,652			23	4,020-4,080
		7	2,105-2,155	F	Температура воздуха	24	4,433-4,498
Разрешение 1 000 м				25	4,482-4,549		
C	Океан, фитопланктон, биогеохимия	8	0,405-0,420	G	Перистые облака, водяной пар	26	1,360-1,390
		9	0,438-0,448			27	6,535-6,895
		10	0,483-0,493	28	7,175-7,475		
		11	0,526-0,536	H	Свойства облаков	29	8,400-8,700
		12	0,546-0,556	I	Озон	30	9,580-9,880
		13	0,662-672	G	Температура поверхности	31	10,780-11,280
		14	0,673-0,683			32	11,770-12,270
		15	0,743-0,753	K	Высота облаков	33	13,185-13,485
		16	0,862-0,877			34	13,485-13,785
35	13,785-14,085						
36	14,085-14,385						
Обозначения диапазонов							
	видимый		коротковолновый инфракрасный		тепловой инфракрасный		

Состав и структура продуктов MODIS. Критериям информационного содержания и уровня обработки соответствуют тематические продукты Land. Из всей совокупности были отобраны продукты, посвященные *спектральной отражательной способности MxD09, температуре земной поверхности MxD11, MXD21, классам земного (растительного) покрова MCD12* (Таблица 2.2). Они содержат информацию об объектах земной поверхности и их свойствах (Рисунок 2.1), которые отражают изменение пожарной опасности напрямую или косвенно через производные показатели.

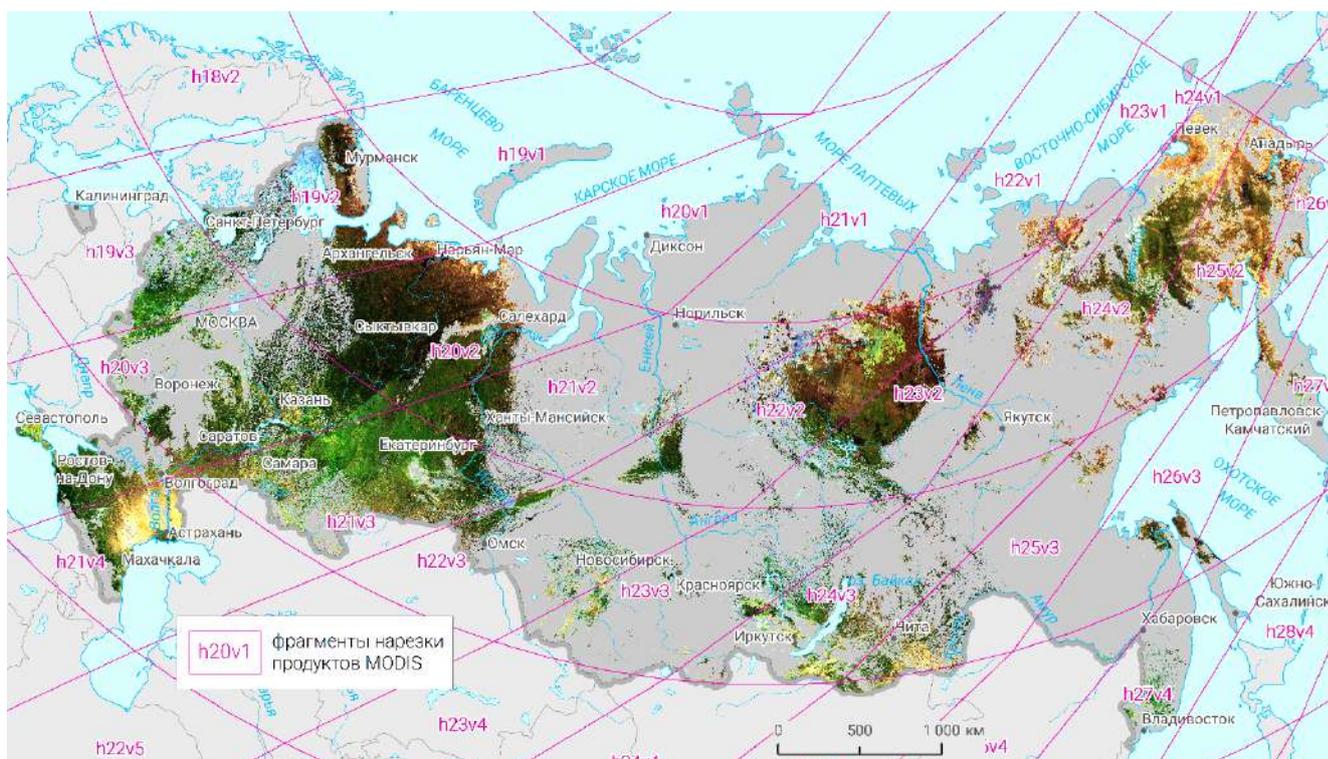


Рисунок 2.1. Пример продукта MOD09 спектральной отражательной способности на территорию России (14.06.2022; RGB-синтез каналов MODIS 1-4-3, вырезаны пиксели облаков)

Кроме того, существует продукт с *тепловыми аномалиями MxD14*, которые путем аналитической обработки интерпретируются как очаги действующих возгораний. Он является основным источником для большинства современных сервисов мониторинга природных пожаров. В этом исследовании точки тепловых аномалий пригодны в качестве эталонных при анализе показателей для оценки и прогнозирования пожарной опасности территории России.

Для обеспечения достоверности используемых значений яркости снимков был

выбран продукт с маской облачности MxD35, формируемый на основе данных видимого и теплового диапазона. Его применение позволит исключить пиксели изображения, не относящиеся непосредственно к земной поверхности.

Таблица 2.2. Тематические продукты MODIS для исследования пожарной опасности

Код	Название	Описание	Структура продукта
основные			
MxD09 (GA)	Surface Reflectance	ежесуточная атмосферно скорректированная наземная спектральная отражательная способность для первых 7 каналов (Таблица 2.1; <i>Vermote et al., 2022</i>)	- тематические изображения INT16* с разрешением 500 м; - маска качества UINT32* 500 м; - идентификаторы съемки INT8*; - данные навигации и ориентации с опорными точками сцены INT 16
MxD11, MxD21 (A1)	Land Surface Temperature	температура земной поверхности на основе тепловых каналов 29, 31, 32 (<i>Wan, 2019; Hulley et al., 2022</i>)	- тепловые изображения UINT16 с преобразованием в °K с разрешением 1 км; - изображения интенсивности излучения в тепловых каналах UINT8 1 км; - маска качества UINT8 1 км; - маска облачности UINT8 1 км; - прочие данные о съемке
MCD12 (Q1)	Land Cover Type	ежегодные классификации земного (растительного) покрова на основе данных MODIS (<i>Sulla-Menashe, Friedl, 2022</i>), аналог природных зон	- 8 тематических изображений UINT8 разрешением 250 м: -- классификация IGBP (International Geosphere-Biosphere); -- UMD (University of Maryland); -- LAI (Leaf Area Index); -- BGC (Biogeochemical Cycle); -- PFT (Plant Functional Types); -- FAO-Land Cover; -- FAO-Land Use; -- FAO-Surface Hydrology; - маска качества и маска воды
MxD14 (L2)	Active Fire	тепловые аномалии, интерпретируемые как действующие пожары (<i>Giglio et al., 2021</i>)	- битовая маска с тепловыми аномалиями с разрешением 1 км; - маска качества и прочие метаданные
дополнительные			
MxD35 (L2)	Cloud Mask	ежесуточные маски облаков, сформированные на основе пороговых алгоритмов анализа атмосферной видимости (<i>Ackerman, Fray, 2015</i>)	- маска облачности UINT8 250 м по данным видимого канала; - маска облачности UINT8 1 км по данным видимых и инфракрасных каналов

* использованы сокращения типов числовых значений:

(U)INT – (unsigned) integer или (беззнаковые) целые; 8, 16, 32 – количество бит

Все продукты привязываются к единой пространственной сетке в синусоидальной проекции, что позволяет совмещать их между собой без перепроецирования. Разрешение изображений в составе продуктов составляет от 250 до 1 000 м (в большинстве случаев – 500 м) при территориальном охвате сцены 1 200 км, погрешность привязки – менее 150 м. Их распространение происходит по тайлам (32 на территорию России) в формате HDF (Hierarchical Data Format, *.hdf) с временной задержкой от съемки до формирования продукта менее 1 суток.

Таким образом, данные ДЗЗ с помощью аппарата MODIS дают непосредственную информацию о объектах потенциального возгорания на территории исследования. Исходя из этого он принимается базовым при последующей интеграции данных в рамках разрабатываемой методики. В частности, разрешение 500 м определяет детальность моделирования.

2.2 Метеорологические модели

Метеорологические модели представляют собой тип данных, воспроизводящих атмосферные процессы с помощью множества переменных погоды. Источниками для их формирования являются данные с наземных станций, радиозондов и спутников (*Feser et al., 2011*). Главное их предназначение – прогнозирование погоды на будущие состояния от нескольких часов до нескольких недель. В контексте природных пожаров погода является основным внешним фактором их возникновения. Следовательно, эти модели несут в себе огромный потенциал прогнозирования пожарной опасности как самостоятельно, так и в совокупности с другими пространственными данными.

Выбор метеорологической модели. В настоящее время существуют десятки глобальных и региональных метеорологических моделей, включающих измерения за часть XX и текущий XXI вв. Для выбора определенной модели дополним критерии наличием *реанализа*, который включает в себя согласование данных из различных источников наблюдений и пространственно-временное разглаживание неравномерно распределенных переменных с учетом особенностей атмосферных

явлений (*Kalnay et al., 1996*). Как следствие, важную роль играет точность этих процедур, выражающаяся в степени соответствия модели действительной ситуации. Согласно данным верификации, проведенной Всемирной метеорологической организацией (*WMO-LCDNV*, URL: <https://apps.ecmwf.int/wmolcdnv>), наиболее достоверной является модель **ECMWF** (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts). Она и была выбрана для дальнейшего использования. Ее точность оценивается в 89,93%, тогда как, например, российская модель ПЛАВ ограничивается 79,33% (*Hewson, 2021*).

Описание метеорологической модели ECMWF. Одноименный центр, координирующий формирование и поддержание рассматриваемой модели, был основан в 1975 г. и включает 35 членов-государств Европы и Северной Африки. Целью его функционирования является составление глобальных прогнозов погоды и ведение архива метеорологических данных.

Источниками данных служат наземные и спутниковые измерения, которые производятся на метеорологических станциях сетей национальных служб со всего мира и с помощью радиозондов, метеорологических спутников MeteoSat-8, -11, Metop-A, -B, -C, Метеор-М, GOES-9 и др. (*Lean, Bormann, 2021*). Во многом эти наблюдения рассредоточены неравномерно, а их приведение к регулярной сетке осуществляется на основе математических пространственных уравнений интерполяции. Однако постепенно количество источников растет, заключаются новые соглашения об интеграции, что дополнительно улучшает точность модели.

Прогнозы ECMWF по заблаговременности подразделяются на три вида (*Johnson et al., 2019*) – среднесрочный (до 15 дней), месячный (до 30 дней), сезонный (до 12 месяцев). С точки зрения пожарной опасности такой широкий диапазон позволяет смоделировать весь пожароопасный сезон и уточнять его по мере получения более краткосрочных, но точных данных. Составленные прогнозы по ходу наступления текущей ситуации анализируются на основе переменных фактической погоды, в результате чего модель непрерывно корректируется.

Все измеренные и смоделированные данные ECMWF организуются в

архивы. Они также подвергаются глубокой аналитической обработке, на выходе которого получаются завершённые единые наборы данных. Одним из наиболее актуальных и полных наборов является продукт реанализа погоды и климата *ERA5*.

Состав и структура набора метеорологических данных ERA5. Этот набор является результатом исследований, проведенных службой Copernicus по изменению климата (C3S) в 2016-2020 гг., и стал заменой предыдущего набора ERA-Interim. Принципиальное отличие ERA5 заключается в использовании более точных моделей атмосферы, новых технологий и большего количества данных. В основе набора лежат метеорологические измерения с частотой от 0,75 до 24 млн в сутки за период с 1940 г. по настоящее время (*Hersbach, Dee, 2016*).

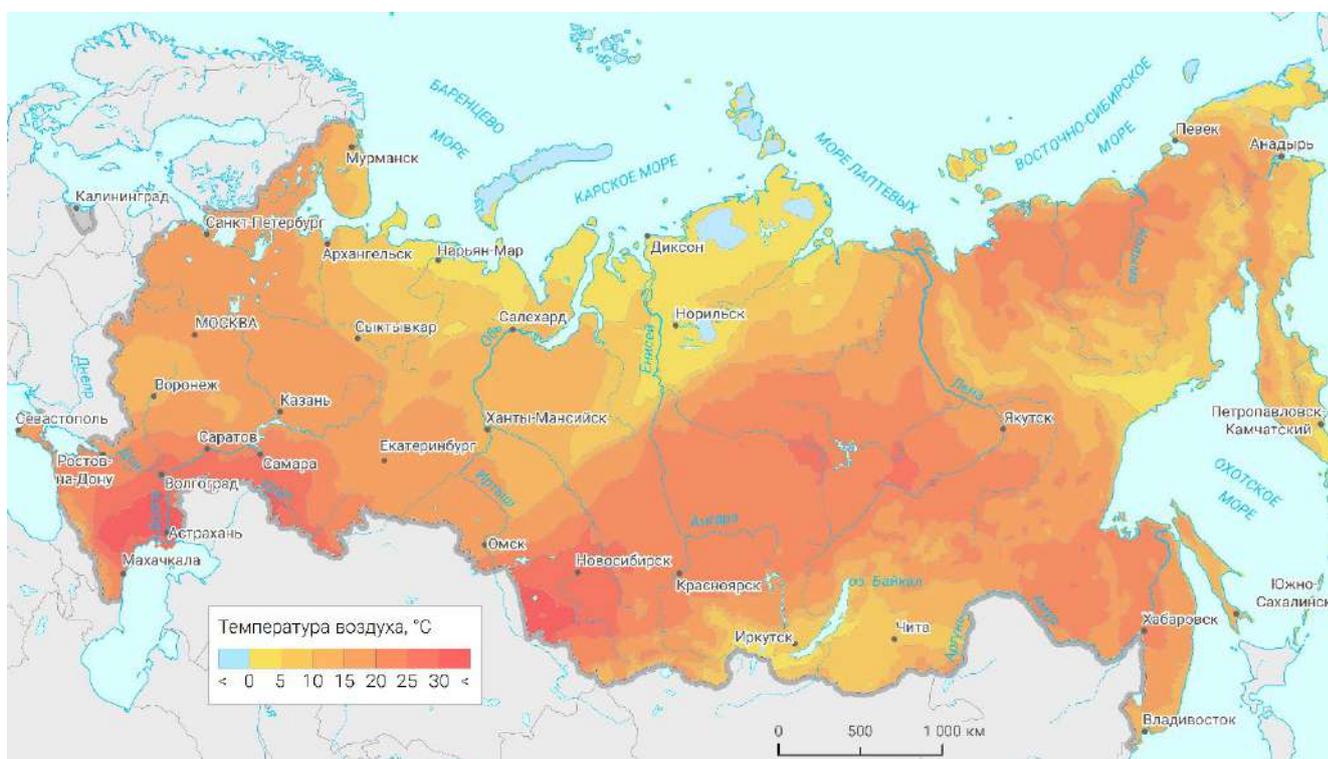


Рисунок 2.2. Пример данных метеомодели ECMWF из набора ERA5 (температура приземного слоя воздуха на 01.07.2019)

Собственно продукт ERA-5 представляет собой совокупность значений метеорологических переменных в узлах планово-высотной сетки, описывающей земной шар. Ее плановое разрешение составляет 9 км, а по высоте значения распределены по 37 уровням от приземного до 1 Па. Временной охват набора определяется периодом исходных измерений (1950 г. – настоящее время), частота

интерполяции – 1 час (при реальной частоте 3 ч). Данные включают в себя 5 752 переменных – температура (*Рисунок 2.2*) и влажность, параметры ветра, альбедо, осадки, облачность и их вариации (*Hersbach et al., 2020*). Изображения полей модели собраны в форматах GRIB-1, -2, NetCDF.

Таким образом, выбранная метеорологическая модель ECMWF и набор данных ERA5 представляют собой еще один источник необходимой и полезной информации для исследования пожарной опасности территории, в частности, влияния погоды и атмосферных процессов на ее состояние и развитие.

2.3 Цифровые модели рельефа

Цифровая модель представляет собой численную аппроксимацию какого-либо реального объекта, явления или процесса. В данном случае рассматривается рельеф как один из компонентов ландшафта и факторов пожарной опасности.

Выбор цифровой модели рельефа (ЦМР). В настоящее время насчитывается несколько открытых глобальных ЦМР – SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission), ASTER GDEM (Global Digital Elevation Model), GMTED2010 (Global Multi-resolution Terrain Elevation Data), GTOPO (Global Topography) и другие (*Глобальные..., 2014*). Для выбора определим расширенные критерии:

- *наибольшая актуальность* для всей территории России;
- сопоставимость с остальными исходными данными, главным образом с продуктами космической съемки MODIS, как следствие, *среднее пространственное разрешение*.

Им соответствует модель *GMTED2010*, разработанная как замена GTOPO30 для изучения рельефа на глобальном и региональном уровнях (*Tom et al., 2015*).

Описание, состав и структура ЦМР GMTED2010. В основе ее построения лежат более детальные ЦМР различных регионов: SRTM, канадская CDED, австралийская GEODATA, данные спутниковых радиолокационных и лазерных альтиметров на Антарктиду и Гренландию, стереомодели SPOT 5 и ICESat (*Danielson, Gesch, 2011*). Высотные значения GMTED2010 были получены путем

агрегирования этих моделей различными методами интерполяции (среднее, максимальное, минимальное, медиана, стандартное отклонение, структурных линий, выборка ближайшего соседа) до трех разрешений – 30” (~1 000 м), 15” (~500 м) и 7,5” (~250 м).

Собственно продукт GMTED2010 представляет собой совокупность фрагментов 20°ш.×30°д., отражающих земную поверхность 84°с.ш...90°ю.ш. На территорию России приходится 17 фрагментов, в последующем объединенных в один файл. Изображения доступны в форматах GeoTIFF и GRID. Вертикальная точность модели CE90, полученная на основе 1,6 млн наземных опорных точек, составляет менее 10 м, тогда как СКО – 26...30 м (*Carabajal et al., 2011*).

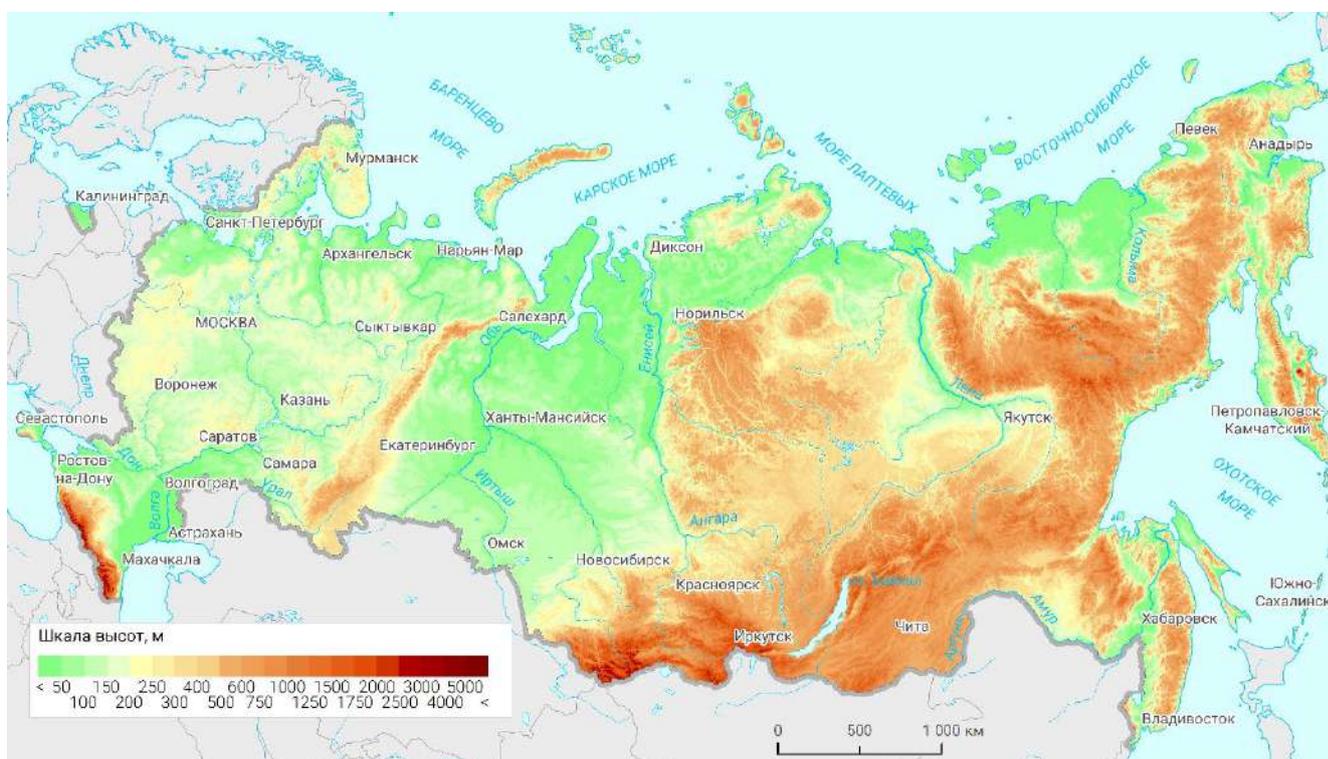


Рисунок 2.3. Рельеф России на основе ЦМР GMTED2010

Таким образом, модель GMTED2010 (*Рисунок 2.3*) удовлетворяет всем заданным критериям и пригодна для исследования приуроченности различных по геоморфологическим параметрам участков к уровням пожарной опасности.

2.4 Картографические материалы

Картографические материалы на сегодняшний день претерпевают

значительные изменения в связи с развитием технологий, которые существенно увеличивают возможности представления информации. Традиционные карты дополняются веб-картами с интерактивными сценариями отображения явлений. Структура веб-карт позволяет работать с ее составными частями в виде *картографических слоев*, которые показывают отдельные элементы содержания. Именно эти слои и планируется использовать для оценки некоторых факторов пожарной опасности, в частности, антропогенной составляющей в их проявлении.

Выбор источника картографических слоев. Среди большого количества веб-картографических сервисов (Google Maps, Yandex Maps, Bing Maps и др.), которые включают общегеографические карты, наиболее полным, актуальным и, прежде всего, общедоступным является *сервис OpenStreetMap (OSM)*. Он является краудсорсинговым, то есть основной вклад в его создание вносит широкий круг пользователей. При этом OSM представляет собой полностью открытую экосистему, тогда как модели данных в аналогичных проектах (WikiMapia, Яндекс.НароднаяКарта) являются ограниченными, а использование производных продуктов закрыто и контролируется авторским правом (*Mooney, Minghini, 2017*). Это позволяет применять данные OSM в научных, производственных, в том числе коммерческих целях, что подтверждается многочисленными приложениями (CartoDB, Wikipedia-World, MapBox и др.).

Описание сервиса OSM. Целью проекта OSM, зарегистрированного в 2004 г., является создание открытой географической карты мира путем наполнения базы векторных пространственных данных силами сообщества пользователей. Источниками векторизации служат GPS-треки, космические снимки (IRS, SPOT, Landsat и др.), изображения с БПЛА, традиционные национальные карты, фотографии и панорамы улиц, другие сервисы (*Bennet, 2010*). Для облегчения работы с сервисом разработаны инструменты JOSM, iD, Potlatch – для добавления и редактирования данных; Mapnik, Osmarender – для отрисовки и просмотра карты. Количество загруженных объектов карты на сегодняшний день исчисляется порядком первых трлн, созданных почти 10 млн пользователей сервиса (*OSM Stats,*

URL: https://planet.openstreetmap.org/statistics/data_stats.html).

Несмотря на возможность открытого редактирования базы OSM точность карты является высокой и соотносима или даже превосходит другие сервисы. Это подтверждается многочисленными исследованиями (*Minghini, Frassinelli, 2019*). Например, в (*Moderchai, 2010*) была выявлена прямая зависимость геометрической точности от количества участников на единицу площади.

Состав и структура данных OSM (*OSM Wiki, URL: <https://wiki.openstreetmap.org/wiki>*). В основе данных OSM векторные слои, которые формируются согласно стандартам и соглашениям редактирования, заданным разработчиками. Пространственные объекты геометрически состоят из точек, линий, полигонов и их комбинаций и содержательно должны быть заполнены атрибутивной информацией в виде пар «тэг (ключ): значение» согласно рекомендуемому классификатору. Такая организация данных, с одной стороны, облегчает наполнение базы данных, а с другой – позволяет отрисовывать карту с помощью мультимасштабной системы условных обозначений. Эта структура возможна для конвертации в любой векторный формат (*.shp, *.geojson).

Содержание базы данных OSM разбито по типам объектов реального мира:

- дороги, улицы, тропы и другие особые случаи (съезды, развязки);
- населенные пункты, здания с указанием типа (жилые, коммерческие и др.);
- водотоки (естественные и искусственные русла, сооружения на них);
- антропогенная инфраструктура с указанием назначения;
- природные образования (растительность, водоемы, рельеф);
- типы землепользования (промышленные, сельскохозяйственные и др.);
- границы любых площадных объектов.

Таким образом, для текущего исследования ключевым является возможность использования отдельных слоев – *населенных пунктов, дорожной сети и типов землепользования в пределах территории России*. Они содержат информацию о численности населения (*Рисунок 2.4*), классах путей сообщения, типах хозяйственной деятельности. В совокупности эти данные позволят оценить

потенциальное присутствие и влияние человека как главной причины возгораний.

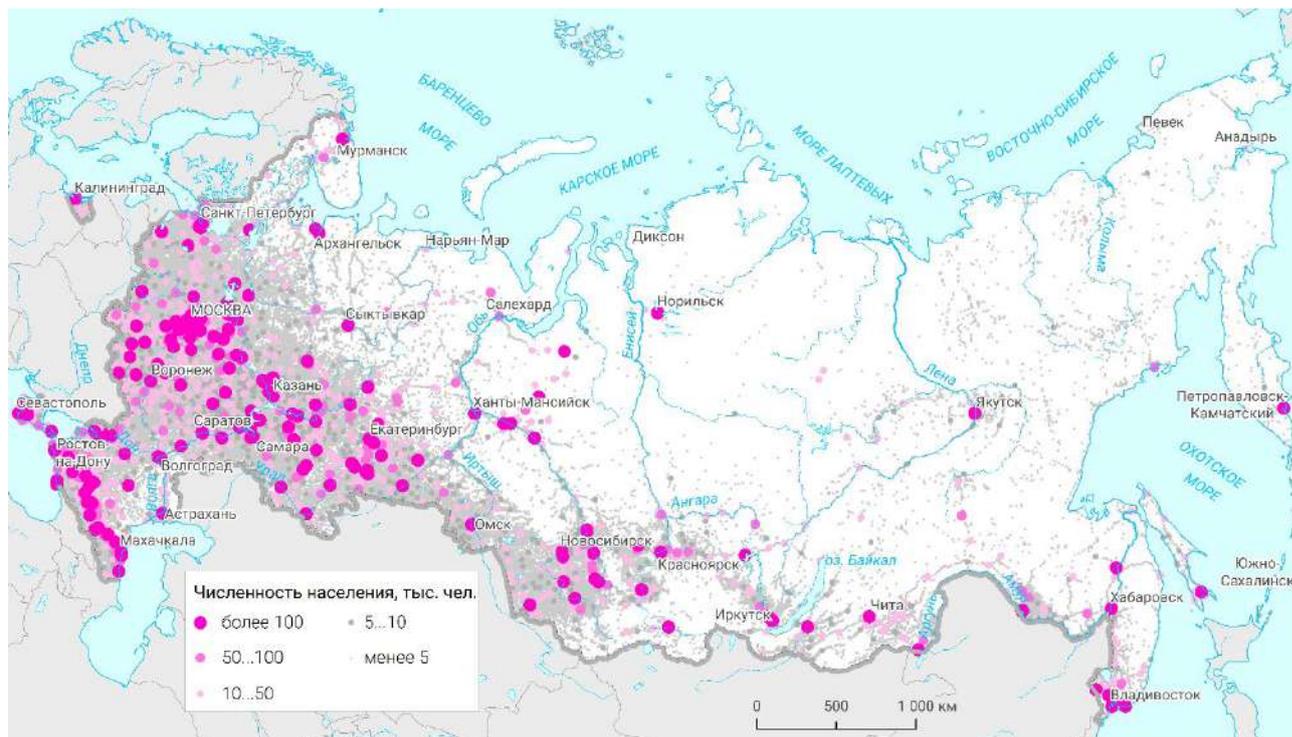


Рисунок 2.4. Слои OSM населенных пунктов на территории России

Выводы по главе 2

1. Положенные в основу выбора исходных пространственных данных разнообразные критерии позволили выявить наиболее пригодные геоинформационные продукты для последующего моделирования пожарной опасности всей территории России.

2. Космические снимки MODIS, метеорологическая модель ECMWF, ЦМР GMTED2010, картографические слои OSM составляют информационное обеспечение планируемой методики и в совокупности воссоздают внутренние, внешние погодные (косвенно климатические), геоморфологические (косвенно также гидрологические и почвенные) и антропогенные факторы пожарной опасности соответственно.

3. Характеристики, состав и структура этих данных являются основой для интерпретации факторов, вычисления производных показателей и дальнейшей интеграции в тематическую модель пожарной опасности, что определяет точность воспроизведения исследуемого явления.

ГЛАВА 3. МЕТОДИКА ГЕОИНФОРМАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ

Геоинформационное моделирование пожарной опасности предполагает последовательность операций по обработке пространственных данных, расчетов тематических показателей, их интерпретации. Результатом всего этого должна быть единая количественная мера пожарной опасности, уровни которой качественно дифференцируют рассматриваемую территорию по вероятности потенциального возникновения природного пожара.

В основе моделирования лежат выбранные ранее геоинформационные продукты, которые в силу их быстрорастущего объема являются частью больших пространственных данных. В совокупности с доступностью вычислительных ресурсов наиболее целесообразно применять для их обработки *методы машинного обучения*. Относящиеся к ним *нейронные сети* в настоящее время успешно внедряются в науки о Земле и представляют собой новое поколение математических моделей, существенно расширяющих возможности исследований.

Разработка *методики геоинформационного моделирования пожарной опасности территории России* предусматривает решение следующих задач:

- определение показателей пожарной опасности, описывающих факторы и вычисляемых с помощью исходных пространственных данных;
- формирование эталонного набора природных пожаров на территории России на основе реальных случаев возгораний;
- установление связи выявленных показателей с реальными случаями природных возгораний методами нейронных сетей;
- тестирование результатов и формирование последовательности методики, предназначенной для последующего применения путем автоматизации.

3.1 Показатели пожарной опасности

Пожарная опасность как явление описывается с помощью ряда факторов, которые влияют на ее состояние и динамику развития. Эти факторы в свою очередь

также представляют собой явления, существующие в природно-антропогенной среде и обладающие связями между собой. Для оценки их влияния и связей прежде всего необходимо получить их численную меру, что позволит применить к ним математические методы.

В связи с этим определяется понятие *показателей пожарной опасности* – величин, метрически описываемых с помощью исходных пространственных данных и наиболее точно интерпретируемых по смыслу как факторы пожарной опасности. В рамках нейросетевого моделирования эти показатели будут выступать *признаками*. Для последующего отбора наиболее значимых признаков на текущем этапе необходимо набрать множество всевозможных показателей, потенциально характеризующих пожарную опасность.

Ранее было выделено четыре группы ведущих факторов – внутренние, внешние погодные, геоморфологические и антропогенные, и соответствующих им наборов исходных данных – данные ДЗЗ, метеорологические модели, цифровые модели рельефа и картографические слои. Далее рассматривается порядок выбора и расчета показателей пожарной опасности в пределах каждой группы.

3.1.1 Показатели наземных объектов как горючих материалов на основе продуктов MODIS

Первая группа факторов относится к внутреннему состоянию и свойствам непосредственно объекта потенциального возгорания. Для их описания были выбраны данные ДЗЗ съемочной системы MODIS. С учетом искажений, вносимых при космической съемке, сначала необходимо произвести подготовку данных для вычисления показателей, которая включает:

- *геометрическую, радиометрическую и атмосферную коррекции* – эти операции уже включены в выбранный уровень обработки продуктов;
- *исключение неинформативных участков изображения* – главным образом к ним относится облачность и их тени, иногда так называемые «битые» пиксели, которые из-за нерабочего состояния детекторов дают неверную информацию.

Эта операция осуществляется путем *маскирования* – неинформативные пиксели помечаются специальным символом (NoData) и в последующих вычислениях не участвуют, но при этом остаются в изображении. Это позволит избежать какого-либо изменения информативных значений по сравнению с операциями вырезания или удаления, которые искажают снимок за счет интерполяции или перепроецирования. Информация для составления маски извлекается из продукта MxD35, который в первом бите файла содержит результаты распознавания облаков и их теней: 0 – отсутствуют, 1 – присутствуют (Ackerman, Fray, 2015). Дополнительно облачность, а также наличие «битых» пикселей фиксируются в масках качества используемых продуктов. В частности, значения 0 в каждом бите этих масок означает, что текущий пиксель имеет безошибочное качество и передает действительную информацию. Объединение слоев качества и облачности дает итоговую маску информативности пикселей.

На следующем этапе производится извлечение и расчет показателей, которые характеризуют свойства наземных объектов, рассматриваемых в качестве ГМ. В число таких показателей входят тематические значения продукта MxD09 – *спектральная отражательная способность* объектов в семи каналах видимого и инфракрасного диапазона (0,620-0,670; 0,841-0,876; 0,459-0,479; 0,545-0,565; 1,230-1,250; 1,628-1,652; 2,105-2,155 мкм, даны в исходном порядке по Таблица 2.1). Значения ячеек с разрешением 500 м приведены к уровню земли с коррекцией влияния на съемку рассеяния и поглощения атмосферных газов и аэрозолей.

К ним добавляются значения *температуры поверхности* из продуктов MxD11 и MxD21, вычисленные на основе тепловых каналов (8,400-8,700; 10,780-11,280; 11,770-12,270 мкм). Разница между продуктами является методической: в продукте MxD21 устранены небольшие погрешности MxD11 для отдельных регионов.

Расчет отражательной способности и температуры поверхности из цифровых безразмерных значений продуктов осуществляется путем их линейного преобразования с помощью калибровочных коэффициентов, указанных в метаданных. Эти показатели обновляются один раз в день.

Также в качестве показателей используются значения (коды) *классов земного покрова* в составе продукта MxD12. Он содержит восемь различных классификаций, посвященных природному зонированию, главным образом на основе сочетания различных типов растительности, частоты их встречаемости. Каждая из них содержит от 8 до 17 классов (*Sulla-Menashe, Friedl, 2022*). Продукт с классификациями и, как следствие, показатели обновляются один раз в год (в нашем случае, один раз в пожароопасный сезон).

Кроме того, для прослеживания изменений состояния растительности как главного ГМ применяются спектральные индексы, рассчитываемые на основе отражательной способности в информативных участках электромагнитного диапазона. Их описание приведено в *Таблица 3.1*.

Таблица 3.1. Спектральные индексы, используемые для косвенного анализа пожарной опасности

№	Индекс	Формула*	Интерпретация
1	NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)	$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red}$	характеризует фотосинтетическую активность растений и прочие их свойства (<i>Rouse et al., 1973</i>)
2	EVI (Enhanced VI)	$EVI = \frac{2.5 \cdot (NIR - Red)}{NIR + 6Red - 7.5Blue + 1}$	корректирует NDVI в областях с экстремально высокими и низкими значениями плотности растительности (<i>Yates et al., 1984</i>)
3	GNDVI (Green NDVI)	$GNDVI = \frac{NIR - Green}{NIR + Green}$	более чувствительны к изменению содержания влаги, хлорофилла, азота; индикатор старения растительности (<i>Perez, 1999</i>)
4	BNDVI (Blue NDVI)	$BNDVI = \frac{NIR - Blue}{NIR + Blue}$	
5	CVI (Chlorophyll VI)	$CVI = \frac{NIR}{Green} \times \frac{Red}{Green}$	чувствительны к изменению содержания хлорофилла, позволяют обнаружить участки с пожелтевшей и опавшей листвой (<i>Filella, Penuelas, 1994</i>)
6	RE (Red Edge)	$RE = \frac{NIR}{Red} - 1$	
7	NDRE (Normalized Difference RE)	$NDRE = \frac{NIR - RE}{NIR + RE}$	информативен для участков плотной зеленой растительности (<i>Barnes et al., 2000</i>)
8	GCI (Greenness Change Index)	$GCI = \frac{NIR}{Green} - 1$	идентифицирует уровень здоровья растительности (<i>Emmanuel, 1997</i>)
9	SIPI (Structured Insensitive Pigment Index)	$SIPI = \frac{NIR - Blue}{NIR - Red}$	описывает соотношение суммарной массы каротиноидов и хлорофилла (<i>Blackburn, 1998</i>)
10	PSRI (Plant Senescence Reflectance Index)	$PSRI = \frac{Red - Green}{NIR}$	отражает старение растительности и коррелирует с содержанием хлорофила (<i>Ren et al., 2017</i>)

№	Индекс	Формула*	Интерпретация
11	VARI (Visible Atmospheric Resistance Index)	$VARI = \frac{Green - Red}{Green + Red - Blue}$	минимизирует влияние атмосферы и разницу в освещении при исследовании растительности (Gitelson et al., 2002)
12	ARVI (Atmospheric Resistance VI)	$ARVI = \frac{NIR - 2Red + Blue}{NIR + 2Red + Blue}$	корректирует NDVI с учетом рассеяния атмосферы в красном канале (Kaufman, Tanre, 1992)
13	SAVI (Soil Adjusted VI)	$SAVI = 1,5 \frac{NIR - Red}{NIR + Red + 0,5}$	уменьшает влияние почвенных шумов на наблюдение растительности посредством введения дополнительных поправок в NDVI (Huete et al., 1994)
14	MSAVI (Modified SAVI)	$MSAVI = \frac{2NIR + 1 - \sqrt{X}}{2}$ $X = 2(2NIR + 1) - 8(NIR - Red)$	
15	OSAVI (Optimized SAVI)	$OSAVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red + 0.16}$	
16	NDMI (ND Moisture Index)	$NDMI = \frac{SWIR3 - SWIR1}{SWIR3 + SWIR1}$	чувствительны к уровню влагосодержания растительности (Hoffhine, 2000; Lozano et al., 2007)
17	NDII (ND Infrared Index)	$NDII = \frac{NIR - SWIR2}{NIR + SWIR2}$	
18	NDWI (ND Water Index)	$NDWI = \frac{NIR - SWIR1}{NIR + SWIR1}$	показывает недостаток воды в растениях (Gao, 1996)
19	SRWI (Simple Ratio Water Index)	$SRWI = \frac{NIR}{SWIR1}$	отражает мезофильную структуру листы и накопление воды в них (Zarco-Tejada, Ustin, 2001)
20	DMCI (Dry matter Content Index)	$DMCI = \frac{SWIR3 - SWIR2}{SWIR3 + SWIR2}$	характеризует уровень засушливости (Romero et al., 2012)
21	NMDI (N multi-band drought index)	$NMDI = \frac{NIR + SWIR2 - SWIR3}{SWIR2 - SWIR3} + \frac{SWIR2 - SWIR3}{NIR}$	отражает интенсивность поглощения влаги растениями (Wang, Qu, 2007)
22	WBI-1 (Water Balance Index)	$WBI1 = \frac{SWIR2 - Green}{SWIR2 + Green}$	показывает значения баланса влаги растительности (Salah et al., 2019)
23	WBI-2 (Water Balance Index)	$WBI2 = \frac{SWIR1 - Green}{SWIR1 + Green}$	
24	NDSI (ND Snow Index)	$NDSI = \frac{Green - SWIR1}{Green + SWIR1}$	обнаружение снежного покрова и его отделение от изображений облаков (Riggs et al., 1994)

*сокращения в формулах: NIR – отражательная способность в ближнем инфракрасном канале (№2 у MODIS); Red – в красном (№1); Green – в зеленом (№4); Blue – в синем (№3); SWIR1, SWIR2, SWIR3 – в коротковолновых инфракрасных (№5, №6, №7).

Приведенные спектральные индексы позволяют выделить значимые свойства объектов, главным образом растительности, для их разграничения в пространстве. Их расчет производится ежедневно, как следствие, эти показатели накапливают временные ряды. Они в свою очередь дают возможность их статистического анализа и вывода новых производных показателей (*TS* – Temporal Statistics):

$$— TS1 = \frac{X - X_{min}}{X_{max} - X_{min}}; TS2 = \frac{X_{max} - X}{X_{max}}; TS3 = \frac{X - X_{avg}}{X_{max} - X_{min}}; TS4 = \frac{X - X_{med}}{X_{max} - X_{min}} —$$

отклонения текущего значения X от средних многолетних статистических мер, таких как среднее X_{avg} , медиана X_{med} , экстремумы X_{min}, X_{max} , что отражает степень аномальности ситуации (статистические меры рассчитываются как многолетние *среднемесячные* и *среднегодовые*, поэтому показатели рассматриваются в двух вариациях, всего 8 показателей);

$$— TS5 = \frac{X_i - X_{i-1}}{X_{max} - X_{min}} —$$

производная показателя, характеризует силу изменения текущего значения X_i по сравнению с предыдущим измерением X_{i-1} .

Таким образом, на основе данных ДЗЗ MODIS последовательно извлекаются данные об отражательной способности (7 показателей), температуре поверхности (2), классах земного (растительного) покрова (8), рассчитываются спектральные индексы (24) и временная статистика для ежесуточных значений ($\times(8+1)$). В конечном счете это позволяет сформировать набор из $(7 + 2 + 8 + 24) + (7 + 2 + 24) \times 9 = 338$ показателей пожарной опасности, показывающих особенности наземных объектов. Следует отметить, что вследствие влияния облачности на регистрацию излучения этот набор содержит не все значения на территорию съемки. Это особенно будет проявляться в случае мониторинга всей территории России в режиме реального времени (*Рисунок 2.1*).

3.1.2 Показатели погоды на основе метеорологической модели ECMWF

Наиболее существенным влиянием на развитие пожарной опасности обладают внешние погодные факторы, для воспроизведения которых была выбрана метеорологическая модель ECMWF и набор данных реанализа ERA-5. Для дальнейшего применения в качестве показателей извлекаются переменные, относящиеся к приземному слою атмосферы (~2 м и ниже). Их перечень, содержащий 27 переменных, составлен на основе (*ERA5: documentation, URL: <https://confluence.ecmwf.int/display/CKB/ERA5>*) и приведен в *Таблица 3.2*.

В этом перечне переменные температуры и инсоляции характеризуют процесс

накопления энергии, усиливающей пожарную опасность территории. Количество осадков и влажность воздуха коррелируют с потерями энергии, влекущими за собой снижение опасности. Причем значения температуры почвы, распределенные по 4 уровням глубины, отражают уровень нагревания подземных слоев, в том числе торфа. Показатели ветра усложняют эти процессы путем переноса в пространстве, а облачность указывает на возможность осадков. Гроза рассматривается как источник возможного зажигания наземных ГМ.

Таблица 3.2. Переменные метеорологической модели для приземного слоя атмосферы, используемые при исследовании пожарной опасности

Переменная, единицы измерения	Код	Переменная, единицы измерения	Код
Температура (6 показателей)		Инсоляция (4)	
Температура воздуха, °К	2t	Интенсивность солнечного коротковолнового излучения, Дж/м ²	ssrd
Температура точки росы, °К	2d	Интенсивность солнечного теплового излучения, Дж/м ²	strd
Температура почвы, °К		Интенсивность поглощенного коротковолнового излучения, Дж/м ²	ssr
- горизонта 1 (0...7 см)	stl1	Интенсивность поглощенного теплового излучения, Дж/м ²	str
- горизонта 2 (7...28 см)	stl2	Ветер (2)	
- горизонта 3 (28...100 см)	stl3	U-составляющая ветра (проекция в восточном направлении), м/с	u
- горизонта 4 (100...289 см)	stl4	V-составляющая ветра (проекция в северном направлении)	v
Осадки (7)		Влажность воздуха (2)	
Количество осадков, м	tp	Удельная влажность, кг водяного пара/кг воздуха	q
Количество конвективных осадков, м	cp	Относительная влажность, %	r
Количество облачных осадков, м	lsp	Облачность (4)	
Интенсивность конвективных осадков, кг/м ² /с	cr	Общая облачность, %	tcc
Интенсивность облачных осадков, кг/м ² /с	lsrr	Доля низкой облачности, %	lcc
Испаряемость, м	e	Доля средневысотной облачности, %	mcc
Тип осадков: без осадков (0); дождь (1); ледяной дождь (2); снег (5); мокрый снег (6); дождь со снегом (7); град (8)	ptype	Доля высокой облачности, %	hcc
Гроза (2)			
Вероятность грозы поэлементная, %	kx		
Вероятность грозы общая, %	totalx		

Значения в данных реанализа являются ежечасными, тогда как базовая частота моделирования – суточная. Эти переменные бывают нескольких типов:

- относятся к моменту отсчета – *температура, гроза, ветер, влажность, облачность*, соответственно, их обобщение происходит с помощью *среднего*,

- медианного, максимального и минимального значений за сутки (16×4);*
- являются накопительными за промежуток между отсчетами – *осадки, инсоляция*, они суммируются за сутки (+7);
 - качественные явления – *тип осадков*, используется *мода* (наиболее часто встречающееся значение) за сутки (+1).

В результате обобщения количество показателей погоды увеличивается до $(16 \times 4) + 7 + 1 = 76$. Как и в случае с показателями по данным ДЗЗ, они формируют ежесуточно обновляемые ряды: для моментальных переменных – по медианным значениям, для накопительных – по суммарным. Следовательно, для них также вычисляются статистические показатели аномальности и скорости изменения значений ($TS1...5$). Это добавляет $26 \times 9 = 234$ показателя к перечню показателей.

Кроме того, фиксируются показатели, определяющие засушливость территории – количество дней с момента последних осадков, сумма температур воздуха, почвы, переменных инсоляции, разности температур воздуха и точки росы за это время (по аналогии с национальными методиками; +11 показателей).

Таким образом, на основе метеорологической модели формируется набор из $76 + 234 + 11 = 321$ показателя. Следует отметить, что в отличие от данных ДЗЗ этот набор является полным – данные интерполируются по всей территории на основе моделирования многочисленных атмосферных процессов.

3.1.3 Показатели рельефа на основе ЦМР GMTED2010

Рельеф представляет собой совокупность неровностей земной поверхности, которые могут быть представлены в виде простейших элементов – трехмерных точек, линий и поверхностей. Положение в рельефе – точка элемента относительно геоида Земли (эллипсоида), может быть описано с помощью абсолютной высоты и производных от нее показателей. Они применяются в тематических исследованиях, для изучения как геоморфологических особенностей территории, так и других компонентов ландшафта на основе связей между ними.

Далее рассматривается порядок получения на основе ЦМР показателей,

которые могут быть чувствительны к изменению пожарной опасности территории. Базовым пространственным разрешением в исследовании принято значение 500 м, наследованное от исходного разрешения для большинства данных ДЗЗ MODIS. В связи с этим для вычисления используется версия модели 15” или ~500 м.

Непосредственным показателем в содержании продукта GMTED2010 является *абсолютная высота* поверхности. В силу генерализованного характера ЦМР необходимо выбрать метод, с помощью которого были агрегированы значения высот. Наиболее предпочтительным является метод Breakline Emphasis, который сохраняет рисунок структурных линий рельефа путем анализа экстремальных высот и медианного обобщения (*Danielson, Gesch, 2011*). Соответственно, значения высот извлекаются из растрового слоя ‘Breakline’.

Регулярная сетка высот представляет собой дискретную двумерную функцию от плоских координат изображения, которые в свою очередь пересчитываются в широту и долготу проекции. На основе производных первого и второго порядка этой функции вычисляются показатели *уклона, экспозиции, горизонтальной, вертикальной и общей кривизны, расчленённости* рельефа (*Таблица 3.3*). В совокупности они полностью описывают элементарные особенности распределения различных форм рельефа. Они определяют интенсивность и направление процессов перемещения твердых и жидких веществ, поступления энергии. С одной стороны, это напрямую влияет на вероятность потенциального возгорания путем усиления факторов (например, более сильное нагревание поверхности на склонах южной экспозиции) или их ограничения (накопление воды в отрицательных формах рельефа).

С другой стороны, эти процессы оказывают косвенное воздействие на пожарную опасность через взаимосвязь с гидрологией, почвами и растительностью территории. Степень этой связи оценивается через тематические индексы рельефа (*Таблица 3.3*) – *LS (Slope Length)*, *TWI (Topographic Wetness Index)*, *MBI (Mass Balance Index)*. Они могут быть полезными для неявной оценки гидрологических и почвенных факторов, которые также включены в общую классификацию.

Таблица 3.3. Показатели пожарной опасности, вычисляемые по ЦМР GMTED2010
изображения приведены в Приложении 3

Показатель	Расчет*	Интерпретация
Уклон	$\alpha = \tan^{-1} \left(\sqrt{\left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)^2} \right)$	определяет интенсивность поверхностного стока, дренирования, эрозии, инсоляции
Экспозиция	$\beta = -\tan^{-1} \left(\frac{\partial z / \partial x}{\partial z / \partial y} \right)$	характеризует - направление линий тока (воды); - количество приходящей солнечной радиации → нагрев поверхности
Плановая кривизна	$P = \frac{\left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)^2 \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} - 2 \frac{\partial z}{\partial x} \frac{\partial z}{\partial y} \frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y} + \left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2 \frac{\partial^2 z}{\partial y^2}}{\sqrt{\left(\left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)^2\right)^3}}$	описывает механизм аккумуляции: положительные значения определяют зоны дивергенции, а отрицательные – конвергенции стока
Вертикальная кривизна	$V = \frac{\left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)^2 \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} + 2 \frac{\partial z}{\partial x} \frac{\partial z}{\partial y} \frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y} + \left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2 \frac{\partial^2 z}{\partial y^2}}{\left(\left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)^2\right) \sqrt{\left(1 + \left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)^2\right)^3}}$	определяет скорость стока, указывает на зоны накопления и сноса материала
Общая кривизна	$C = \sqrt{P^2 + V^2}$	одновременно описывает закономерности аккумуляции-эрозии и пространственную неоднородность стока
Расчленённость TRI	$TRI = \sqrt{\sum_{i=0}^8 \left(\frac{\partial z}{\partial xy}\right)^2}$	TRI (Topographic Ruggedness Index) воспроизводит шероховатость рельефа
*где $z = f(x, y)$ – функция высоты от плоских координат изображения x и y ; $\partial z / \partial x$ и $\partial z / \partial y$ – ее градиенты высоты по направлениям с запада на восток и с севера на юг в пределах окна 3×3 , для центральной ячейки которого вычисляются значения (<i>Zevenbergen, Thorne, 1987</i>)		
Индекс LS	$LS = f(L, \alpha),$ где L – длина склона, α – его уклон	отождествляется с интенсивностью эрозионных процессов – влияние на почвы и растительность (<i>Zhan et al., 2017</i>)
Индекс влажности рельефа TWI	$TWI = \ln(FA / \tan \beta),$ где FA – площадь стока; β – экспозиция	отражает степень накопления воды, имеет высокую корреляцию с влажностью почвы и разнообразием растительности (<i>Kopecky et al., 2021</i>)
Индекс баланса массы MBI	$MBI = f(z, \alpha, C),$ где z – высота, α – уклон, C – кривизна	показывает баланс миграции вещества и влаги (отрицательный на водоразделах, положительный в долинах; <i>Möller et al., 2008</i>)

Таким образом, к показателям пожарной опасности было добавлено еще 10 величин, получаемых с помощью ЦМР GMTED2010. В отличие от ранее рассмотренных показателей они являются относительно постоянными и вычисляются один раз (обновление по мере выхода новых версий продукта).

3.1.4 Показатели антропогенной нагрузки на основе слоев OSM

Оценка воздействия антропогенной деятельности на природу и его компоненты является задачей многих исследований. В случае пожарной опасности человек выступает и как фактор, изменяя естественное состояние ландшафта, и как первичная причина, распространяя источники возгорания. Закономерность проявления антропогенной нагрузки обобщенно описывается следующим образом: *чем выше вероятность нахождения человека, тем выше вероятность возникновения пожара в этой точке*. Основой для ее моделирования являются ранее выбранные слои OSM, содержащие населенные пункты (слой places), дороги (railways и roads) и участки различного землепользования (landuse).

Населенные пункты как участки постоянной локализации людей представляют собой главный элемент антропогенной нагрузки. Они характеризуются численностью населения, которая записана в поле population. Соответственно, вероятность присутствия человека в одинаковой дальности от населенных пунктов различной людности будет разной. Учет людности был осуществлен по нормализованным весам, подобранных методом ранжированной оценки (Спиридонов, Постников, 2015) для классов этого показателя (Таблица 3.4).

Дороги представляют собой линейные объекты переменной локализации людей, при этом также имеют дифференцирующие характеристики – тип (отражается в названии слоя) и класс (атрибутивное поле fclass). Аналогично населенным пунктам для них также были вычислены веса в соответствии с присвоенными различным классам рангами (Таблица 3.4).

В качестве показателей антропогенной нагрузки используется *взвешенное расстояние* до населенных пунктов A_S и дорог A_R : *чем ближе, тем выше искомая*

вероятность и выше пожарная опасность. Их расчет для произвольной точки пространства осуществляется как $A = wd$, где A – собственно показатель, d – расстояние до ближайшего объекта, w – вес этого объекта. Для преобразования в вероятностную величину полученные значения нормализуются в диапазон от 0 до 1, где 0 – ячейка с наименьшей нагрузкой, 1 – с наибольшей.

Таблица 3.4. Веса расстояний до различных типов объектов

Населенные пункты			Дороги		
Людность, тыс. чел.	Ранг	Вес	Тип (класс)	Ранг	Вес
более 1 000	1	0,29	Железные дороги (rail)	1	0,33
500...1 000	2	0,24	Автомобильные дороги: I класса (motorway, trunk, primary*) II класса (secondary) III класса (tertiary) и прочие	1	0,33
100...500	3	0,19			
50...100	4	0,14			
10...50	5	0,09			
менее 10	6	0,05			

*классы автомобильных дорог согласно классификатору OSM, записаны в теге fclass (OSM wiki, URL: https://wiki.openstreetmap.org/wiki/RU:Highway_classification)

Слой типов землепользования показывает распределение областей различного хозяйственного освоения. Из этого слоя были выделены участки сельскохозяйственного (значения тегов – farm, farmland, farmyard, meadow, vineyard, plant_nursery, orchard, greenhouse_horticulture) и промышленного (industrial, construction, military, quarry, landfill, brownfield) назначения. Эти земли характеризуют частные случаи антропогенного преобразования природы, влияющего в свою очередь на пожарную опасность. Участки в пределах каждого слоя были размечены 1, а области вне – 0. В результате, были получены два бинарных показателя – *сельскохозяйственной* и *промышленной нагрузки*.

Таким образом, для оценки антропогенного воздействия были рассчитаны 4 показателя – взвешенные расстояния до населенных пунктов и дорог, а также сельскохозяйственная и промышленная нагрузка (Приложение 3). Слои показателей приведены к разрешению 500 м. Поскольку на текущем масштабном уровне они изменяются относительно медленно, слои принимаются постоянными и планируются к обновлению один раз в сезон по мере развития базы данных OSM.

В результате текущего этапа исследования было определено

$338+321+10+4=673$ показателя пожарной опасности. Рассмотренный порядок их расчета составляет основу второго этапа базовой последовательности моделирования пожарной опасности – оценка факторов на основе показателей. Кроме того, в рамках классификации выделяются метафакторы, описывающие пространственно-временную привязку явлений. В связи с этим набор показателей расширяется переменными *географической широты* и *долготы* точки, порядковых номеров *дня*, *декады* и *месяца* в году ($+5=678$). Они позволят соотнести изменения показателей с географическими и сезонными закономерностями явлений.

3.2 Базовые составляющие модели пожарной опасности

Показатели, определяемые с помощью исходных геоинформационных продуктов, на данной стадии исследования описывают факторы пожарной опасности *потенциально*. Чтобы на их основе оценить и спрогнозировать пожарную опасность территории, необходимо определить и подготовить базовые составляющие модели: *содержательную*, которая складывается из тематического предназначения, и *пространственно-временную*, исходящую из ее геоинформационного характера.

Содержательная составляющая представляет собой взаимосвязь факторов с действительной пожарной ситуацией. Она проявляется в поведении показателей перед наступлением возгорания и определяет возможность последующего использования выявленных закономерностей. Соответственно, для исследования взаимосвязей в качестве *эталонов* моделирования используются участки природных пожаров, а именно площади их первичного возгорания.

Эти площади формируются с использованием ежесуточного продукта MODIS о *тепловых аномалиях* MxD14. Аномалии представляют собой локализованные участки земной поверхности 1×1 км, где зафиксировано очень высокое тепловое излучение в абсолютном (температура выше 360K) или относительном выражениях (температура потенциального пожара выше температуры окружающих пикселей на три стандартных отклонения) (*Giglio et al., 2003*).

Съемочная система за счет усиления регистрации излучения может обнаруживать возгорания и менее площади пикселя в 1 км^2 – до сотен м^2 . На основе последней версии алгоритма выявления тепловых аномалий обработаны данные космической съемки с 11 ноября 2000 г. (коллекция 6.1). Как следствие, этот продукт содержит однородный ряд точек потенциальных возгораний за весь XXI век.

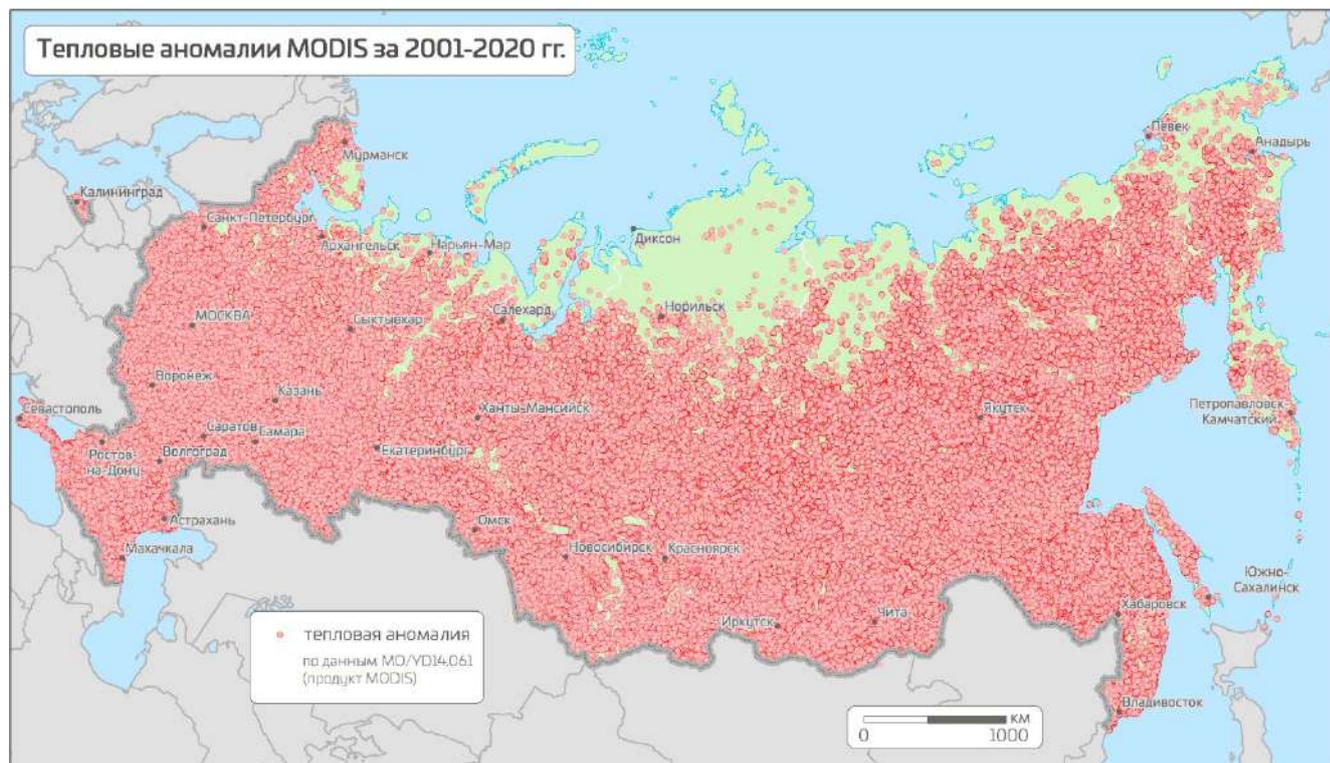


Рисунок 3.1. Тепловые аномалии MODIS на территорию России за 2001-2020 гг.

Однако для дальнейшего применения в качестве точек реальных возгораний в эталонном наборе была проведена их аналитическая обработка.

1. Пространственная фильтрация данных

— на территорию России: за 2001-2020 гг. было выявлено 7,04 млн точек тепловых аномалий (Рисунок 3.1);

— исключение точек в пределах водоемов и населенных пунктов: водоемы включены в маску качества продукта, а населенные пункты – из ранее упомянутого слоя OSM.

2. Атрибутивная фильтрация (согласно содержанию продукта)

— по достоверности выявления тепловой аномалии: выше 80%;

— по типу аномалии: 0 – природный пожар растительности, так исключаются случаи вулканической активности, статических наземных и морских источников, например, в виде газовых факелов.

3. Деление данных по годам – пожароопасным сезонам (март-октябрь), исключение точек по времени отсутствия активного проявления пожаров.

4. Объединение в кластеры – в пределах каждого сезона пиксели аномалий 1×1 км объединяются в участки возникновения и развития пожаров (Рисунок 3.2б):

— по пространственному перекрытию;

— временной промежуток между двумя соседними выявлениями в пределах кластера должен быть менее 1 месяца, иначе кластер делится на два и более и интерпретируется как несколько участков возгорания.

5. Выявление первых по времени пикселей возгораний в пределах каждого кластера (Рисунок 3.2в), так как исследуется факт возникновения пожара.

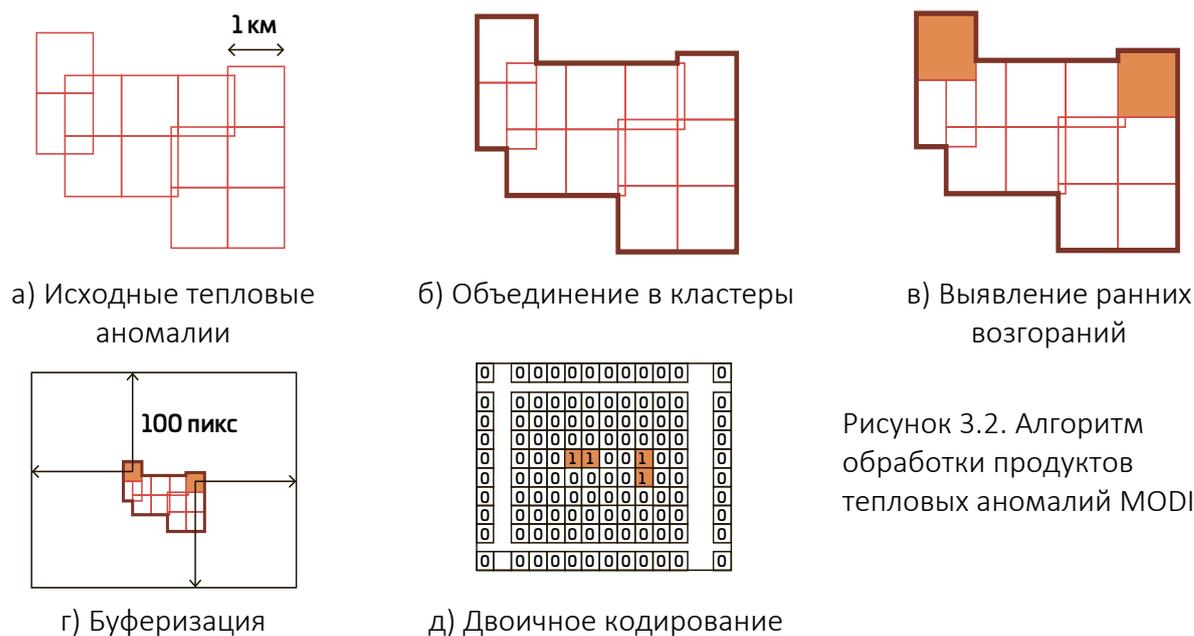


Рисунок 3.2. Алгоритм обработки продуктов тепловых аномалий MODIS

6. Буферизация на 100 пикселей (выявлено эмпирически) от оставшихся пикселей возгорания (Рисунок 3.2г), чтобы набор был полным – это позволит исследовать уязвимость к возгоранию одних участков и устойчивость других. Кроме того, это значительно увеличит в эталонной выборке количество незагоревших участков. Благодаря этому пространственное соотношение между участками пожаров и остальной территорией будет близко к истинному значению.

7. *Двоичное кодирование* пикселей (Рисунок 3.2д): 1 – подтвержденная вероятность возгорания является максимальной, пожар произошел; 0 – вероятность минимальная, пожар не случился; в результате моделирования необходимо получение подобного вероятностного показателя.

В результате применения этого алгоритма к совокупности продуктов MxD14 за период наблюдений с 2001 по 2020 гг. было выявлено 22 137 участков возгораний, распределенных по всей территории России. Преимуществом является единство источника эталонов пожаров с показателями наземных объектов – снимки MODIS. Это позволит вычислять показатели непосредственно во время возгорания без влияния и маскирования облачности. Эти эталоны воспроизводят содержательный аспект интеграции показателей в модель пожарной опасности.

Пространственная составляющая в свою очередь обеспечивает пространственную интеграцию показателей. Используемые геоинформационные продукты находятся в различных пространственных вариациях по отношению к истинному положению на Земле. Данные метеорологической модели ECMWF, ЦМР GMTED2010 и картографические слои OSM привязаны к широтно-долготной системе координат на эллипсоиде WGS-84. Космические снимки MODIS спроецированы разработчиками от эквивалентного WGS-84 эллипсоида в *синусоидальную равновеликую проекцию Сансона-Флемстида*.

Как следствие, их общей основой является привязка к эллипсоиду WGS-84. Однако моделирование в трехмерном пространстве является достаточно сложным, как с точки зрения математического обоснования искомых закономерностей, так и в плане вычислительной нагрузки. Поэтому в дальнейшем все показатели проецируются от эллипсоида на плоскость.

При выборе картографической проекции был использован критерий по характеру искажений – она должна быть *равновеликой*. Сохранение относительных площадей обеспечивает равнозначность пространственного разрешения и территориального охвата исходных и проецируемых данных для правильной передачи масштабов моделируемого явления. Кроме того, для представления

территории России в подавляющем большинстве случаев используют *конические нормальные* проекции (по виду вспомогательной поверхности и его ориентации относительно оси проекции; *Серापинас, 2005*).

В соответствии с этими замечаниями из выбора исключается синусоидальная проекция данных MODIS (*Рисунок 3.3а*), а для моделирования применяется *равновеликая коническая нормальная проекция Альберса в системе координат эллипсоида WGS-84* (*Рисунок 3.3б*), в которой составлены многие мелкомасштабные тематические карты России (*Бернштейн, 2012*). Ее параметры были заимствованы из результатов изыскания проекции по способу Витковского: центральный меридиан – 105° в. д., стандартные параллели – $45^\circ 46'$ с. ш. и $67^\circ 08'$ с. ш., параллель с минимальным масштабом – 58° . В таком виде для территории России искажения длин по параллелям и меридианам составляют менее 1,8%, а углов – менее 2° (*Серापинас, 2005*), что допустимо и обеспечивает высокую точность моделирования при базовом пространственном разрешении – 500 м.



Рисунок 3.3. Пространственная сетка моделирования: а) в синусоидальной проекции; б) в равновеликой конической нормальной проекции Альберса

В сочетании с этим разрешением проецирование на плоскость формирует пространственную сетку, которая является основой для моделирования. С узлами сетки связываются все исходные показатели, что позволит свободно сопоставлять и интегрировать их. При перепроецировании данных используется *интерполяция методом ближайшего соседа*. Она имеет минимальную вычислительную сложность и привносит наименьшие искажения при неизвестном распределении значений. Высокая точность привязки исходных данных (менее половины их пространственного разрешения) обеспечивает их пространственную согласованность при их интеграции.

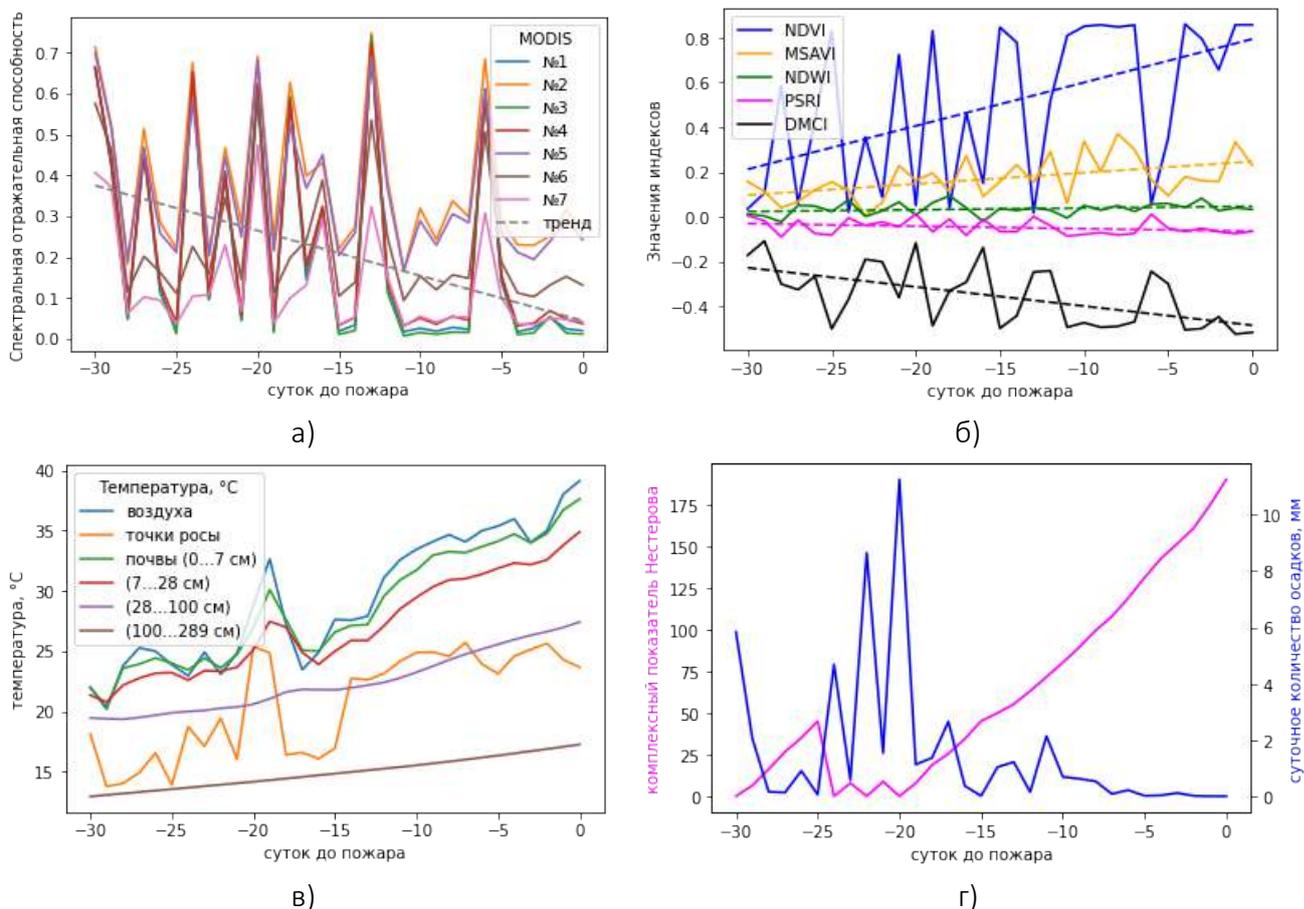


Рисунок 3.4. Изменение некоторых показателей за период 30 суток до возгорания (03.07.2021, близ д. Бидея Красноярского края): а) спектральной отражательной способности в каналах MODIS; б) спектральных индексов (по данным MODIS); в) температурных значений; г) осадков и комплексного показателя Нестерова (оба – по метеомодели ECMWF)

Временная составляющая определяет временной период моделирования. С учетом задач ежесуточного прогнозирования, а также временной привязки данных и показателей, пространственная сетка усложняется размерностью времени, а значения в узлах образуют упорядоченную последовательность. Ее длиной принимается 1 месяц или 30 дней, что, с одной стороны, составляет двойную заблаговременность среднесрочного погодного прогноза (единственного среди всех типов исходных данных), а с другой – обеспечивает достаточную полноту ряда для прослеживания изменений показателей (выявлено эмпирически путем исследования различных длин последовательностей). Шаг наследуется из ежесуточности моделирования – 1 сутки. Примеры изменения показателей пожарной опасности в соответствии с такой временной последовательностью приведены на *Рисунок 3.4*: уже на визуальном уровне без строгого анализа

взаимосвязей обнаруживаются специфичные закономерности.

Таким образом, была определена пространственно-временная основа для моделирования пожарной опасности территории России. В сочетании с эталонными участками в виде природных пожаров, для которых извлекаются значения ранее определенных 678 показателей, она образует *набор для обучения модели пожарной опасности*.

3.3 Взаимосвязи показателей с пожарной опасностью природных территорий России

Согласно базовой последовательности (*п. 1.3*) следующим этапом моделирования пожарной опасности является интеграция показателей в вероятностную меру возгорания с учетом вклада каждого соответствующего фактора. Эффективность этого шага определяется методами, которые используются для оценки и применения взаимосвязей между показателями и случаями реальных возгораний. Элементы для исследования связей организованы в набор, характеризующийся разнообразием исходных показателей и высоким объемом эталонных участков, что позволяет относить эти данные к «*большим*». Как следствие, для их анализа целесообразно использовать искусственные *нейронные сети* (далее – НС), которые квалифицируются как наиболее точные методы среди прочих и имеют способность выявления неочевидных закономерностей.

3.3.1 Введение в нейронные сети и выбор архитектуры для моделирования

Основы нейронных сетей. НС представляет собой математическую модель в виде сложной последовательности взаимосвязанных и взаимодействующих между собой простых вычислительных единиц - *нейронов* (по аналогии с биологическими нейронами). Алгоритм их работы представлен на *Рисунок 3.5*: 1) на вход нейрона поступают числовые значения с предыдущих нейронов; 2) эти значения умножаются на веса *синапсов* – связей между двумя соседними нейронами; 3) рассчитывается сумма этих взвешенных значений; 4) к полученной величине применяется *функция активации*, которая определяет необходимость и степень

передачи информации по текущей цепочке к последующему нейрону. Как правило, в качестве этой функции используют сигмоиду, синусоиду, обратную тангенсоиду, линейные выпрямители и другие нормализуемые аналоги (Галушкин, 2017).

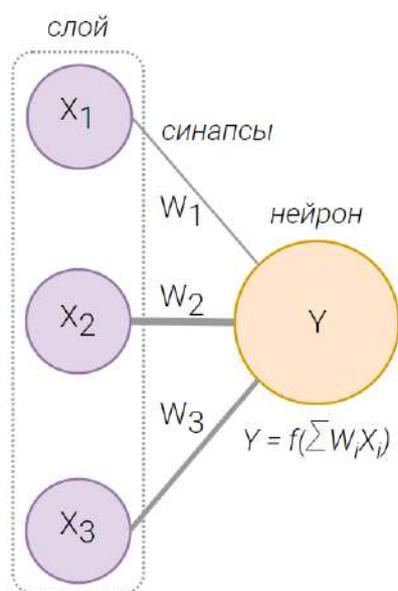


Рисунок 3.5. Алгоритм реализации нейрона

Относительно пожарной опасности функцию активации можно интерпретировать на основе следующего примера:

- если взвешенная сумма показателей температуры очень высокая, что критически для воспламенения, то функция активации срабатывает и информация передается дальше для формирования вероятности возгорания;
- если она, напротив, низкая, то активируются другие, более значимые показатели, текущий диапазон которых является критическим.

Подобным образом реализуется взаимодействие факторов между собой и их влияние на моделируемое явление в различных условиях среды.

Совокупность параллельно вычисляемых нейронов представляет собой *слой*. Совокупность всех входных показателей, в данном случае на основе геоинформационных продуктов, формирует *входной слой*, а единственное значение вероятностной меры возгорания – *выходной слой*. *Промежуточные* или *скрытые слои*, находящиеся в последовательности между входным и выходным слоем, характеризуют закономерности поведения показателей, их влияние друг на друга при различных значениях и в конечном счете определяет глубину аппроксимации явления текущей моделью.

Информация между слоями и нейронами передается согласно направлениям и весам синапсов. Эти веса характеризуют степень влияния на показатель, вычисляемый в последующем нейроне сети. Процесс их нахождения называется *обучением нейронной сети*. Эта процедура в большинстве случаев выполняется *итеративным методом обратного распространения ошибки* (Vlachas et al., 2020).

В соответствии с ним известные входные значения обрабатываются сквозь нейроны всей последовательности на основе случайно подобранных весов на первом шаге, достигая выходного слоя. Полученные значения сравниваются с эталонными выходными значениями, вычисляется разность, которая затем обратно по НС пропорционально распределяется по всем синапсам. Эта процедура повторяется несколько раз до достижения приемлемой точности сети.

Выбор архитектуры нейронной сети моделирования пожарной опасности. Совокупность нейронов, синапсов, слоев, функций активации и образуемая ими строгая система формирует *архитектуру НС*. Ее разработка зависит от входных данных (тип, количество) и решаемой задачи (тип, интерпретация выходных данных). А собственно успешность их применения складывается из характеристик обучающего набора – достоверности, количества эталонных примеров.

На сегодняшний день для различных задач разработаны типовые архитектуры НС, которые включают в себя вычислительные шаблоны для определенных структур данных. В этом исследовании рассматриваются распределенные в пространстве временные последовательности показателей. С учетом этого в дальнейшем используются *рекуррентные НС*, обладающие следующими преимуществами (*Lipton et al., 2015*):

- Тьюринг-полные – реализуют любую вычислимую функцию, что в случае моделирования означает возможность имитации сложных явлений путем взаимосвязи входных и выходных значений нелинейными функциями;
- предназначены и эффективны для работы с последовательностями, запоминанием контекста и различными временными зависимостями;
- учитывают порядок значений и обладают памятью, что позволяет заполнять недостающие элементы последовательности, в нашем случае ежесуточного изменения пожарной опасности.

Обобщенная архитектура рекуррентной сети представляет собой систему нейронов, распространяющихся в двух направлениях (*Рисунок 3.6, слева*): в пределах одного временного шага от входных показателей к выходным через

скрытые нейроны, которые между собой также связаны временными синапсами. При длинных последовательностях информация начинает смешиваться, а закономерности искажаться. Вследствие этого используется расширение архитектуры *LSTM-сетью* с долгой краткосрочной памятью (Long Short-Term Memory; Hochreiter, Schmidhuber, 1997). На основе фильтрации информации различными функций активации (сигмоида и гиперболический тангенс) она повышает устойчивость сети к запоминанию информации на длинных промежутках, при этом сохраняя закономерности коротких последовательностей. Ее архитектура и математические особенности реализации приведены на *Рисунок 3.6 (справа)*.

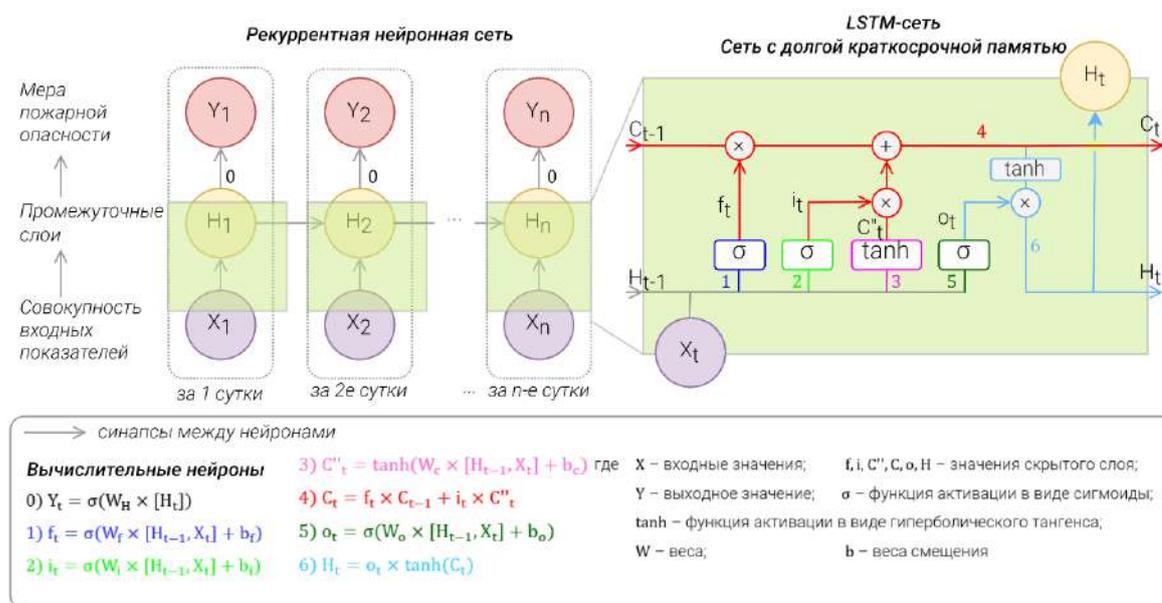


Рисунок 3.6. Архитектура используемой нейронной сети – рекуррентная LSTM сеть

Адаптация выбранного архитектурного типа НС к текущему моделированию заключается в определении входных и выходных слоев, длины последовательности, тогда как скрытый слой и его свойства заданы шаблоном.

Размер входного слоя в пределах одного элемента последовательности равен количеству значимых показателей пожарной опасности, вычисляемых по исходным данным. Следует отметить, что все вычисляемые значения для стандартизации перед применением в НС *нормализуются* в диапазон $[0; 1]$ как $X' = (X - X_{min}) / (X_{max} - X_{min})$, где X, X', X_{min}, X_{max} – текущее, нормализованное,

максимальное и минимальное значения показателя соответственно. Всего количество элементов в последовательности составляет **44**: 30 как исходная базовая длина + 14 ежесуточных прогнозных значений.

Выходной слой разрабатываемой сети состоит всего лишь из одного нейрона, который определяет вероятность возникновения природного пожара. Необходимо математически определить порядок получения этой меры. В обучающем наборе точки пространственной сетки закодированы 0 и 1, которые достоверно характеризуют наступление пожара (фактическая вероятность). Следовательно, после обучения нейрон выходного слоя и функция его активации будут описывать степень приближения к этим экстремальным значениям вероятности. В качестве активирующей функции используется *сигмоида*: она является монотонно возрастающей от 0 к 1 и способна усиливать слабые проявления сигнала, в данном случае пожарной опасности. Как следствие, получаемые значения интерпретируются как *вероятность потенциального возгорания* (далее – ВПВ).

Таким образом, для моделирования пожарной опасности с учетом специфики и структур представления данных была выбрана и приспособлена рекуррентная НС типа LSTM. Ее реализация и последующее обучение были произведены путем программирования на языке Python с помощью библиотеки Keras/TensorFlow. Этот инструмент является специализированным и предназначен для работы с НС. Программный сценарий (скрипт) реализованной сети приведен в *Приложении 2*.

3.3.2 Обучение нейронной сети и анализ полученных взаимосвязей

Обучение НС позволяет определить и присвоить веса исходным и промежуточным показателям, в данном случае служащим предикторами пожарной опасности. Веса будут отражать вклад каждого фактора в вероятность возгорания и взаимосвязи между ними. При этом, как уже было отмечено, достоверность обучения в конечном счете нейросетевого моделирования зависит от обучающей выборки и ее репрезентативности. В связи с этим обучение НС тесно связано с процедурой предобработки обучающего набора.

Предобработка обучающего набора. Количество исходных показателей, ранее подобранных для описания возгораемости территории, составляет 678. Из этого следует, что размер входного слоя НС с учетом 44-суточной длины последовательности возрастает до $678 \times 44 = 29\,832$ элементов, а на уровне промежуточного слоя вычислительная нагрузка возрастет еще больше, как следствие, упадет скорость обучения. В то же время количество эталонов составляет 22 137, чего может быть недостаточно для обобщения такого большого количества показателей в интегральную меру пожарной опасности, а это неизбежно приведет к снижению интерпретируемости моделирования.

Исходя из этих расчетов возникает необходимость сокращения количества входных показателей. Эта процедура называется *отбором признаков (feature selection)*. Она верифицирует исходные показатели пожарной опасности и в целом обучающий набор путем проверки критериев полноты данных, независимости входных значений и их корреляции с выходными значениями. (Liang et al., 2016).

Полнота данных характеризуется соотношением заполненных и пропущенных значений в обучающей выборке. Большая доля пропущенных значений уменьшает возможность выявления достоверных закономерностей. В текущем исследовании используется пороговое значение 60% – показатели с долей ниже него исключаются, а выше – линейно интерполируются между соседними известными значениями и экстраполируются по трем ближайшим значениям. Количество эталонных участков вследствие проверки обучающего набора на недостающие значения было снижено с 22 137 до 19 205, то есть на ~13%. Показатели пропущенных значений исключительно относятся к вычисляемым по данным MODIS, тогда как остальные являются в полной мере регулярными.

Корреляция между входными показателями и их значимость по отношению к выходному показателю определяют их пригодность для достоверного моделирования. Входные наборы значений должны быть независимыми по отношению друг другу, а использование сильно коррелирующих показателей как параллельных элементов слоя может сильно исказить результаты. В качестве меры

взаимосвязи был использован коэффициент корреляции Пирсона, который позволяет оценить линейность и направление связи (Берлянт, 1978):

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}}$$

где X_i , \bar{X} , Y_i , \bar{Y} – текущее и среднее значение для ряда показателей X и Y соответственно, n – количество образцов выборки. Используется пороговое значение коэффициента – $|0,95|$ (установлено эмпирически), при большей корреляции один из связанных показателей отбрасывается. Сохраняемые и удаляемые показатели определяются исходя из сравнения их значимостей – корреляции с выходной ВПВ: показатель с большей значимостью сохраняется.

В результате анализа показателей обучающего набора по этим критериям были получены **следующие результаты и выводы**.

1. Наиболее информативными каналами космической съемки MODIS являются красный (№1), ближний инфракрасный (№2) и один из коротковолновых инфракрасных (№6), что является следствием экстремумов поглощения излучения хлорофиллом растительности. При этом все 7 показателей спектральной отражательной способности независимы относительно друг друга.

2. Значения температуры, получаемые из двух продуктов MODIS, имеют высокую прогностическую ценность, однако тесно коррелируют между собой. Наиболее точно характеризует возгораемость территории *продукт MxD11*.

3. Спектральные индексы BNDVI, GNDVI, VARI, ARVI, CVI, GCI, SAVI, OSAVI, RE, NDSI, WBI-2 очень близки к NDVI (в большинстве случаев $|R| > 0,99$); SRWI – к NDWI; NDMI, WBI-1 – к DMCI (Рисунок 3.7а). Кроме того, NMDI и SIPI имеют низкую значимость по отношению к вероятности возгорания ($|R| < 0,3$). Эти закономерности относятся и к их статистическим показателям. Как следствие из 24 индексов 16 исключаются из дальнейшего использования: *далее применяются NDVI, EVI, NDRE, PSRI, MSAVI, NDII, NDWI, DMCI*.

4. Метеорологические переменные из модели ECMWF также подвержены высокой корреляции между собой (Рисунок 3.7б):

- температура почвы всех 4 глубинных горизонтов вплотную приближается к температуре воздуха;
- детализированные по типам переменные осадков, облачности и интенсивности излучения не привнесли качественно новой информации: в обучающем наборе они практически повторяют обобщенные переменные;
- вероятность грозы и влажность воздуха, каждая из которых рассматривается в двух вариациях, имеют высокую внутреннюю корреляцию между вариациями.

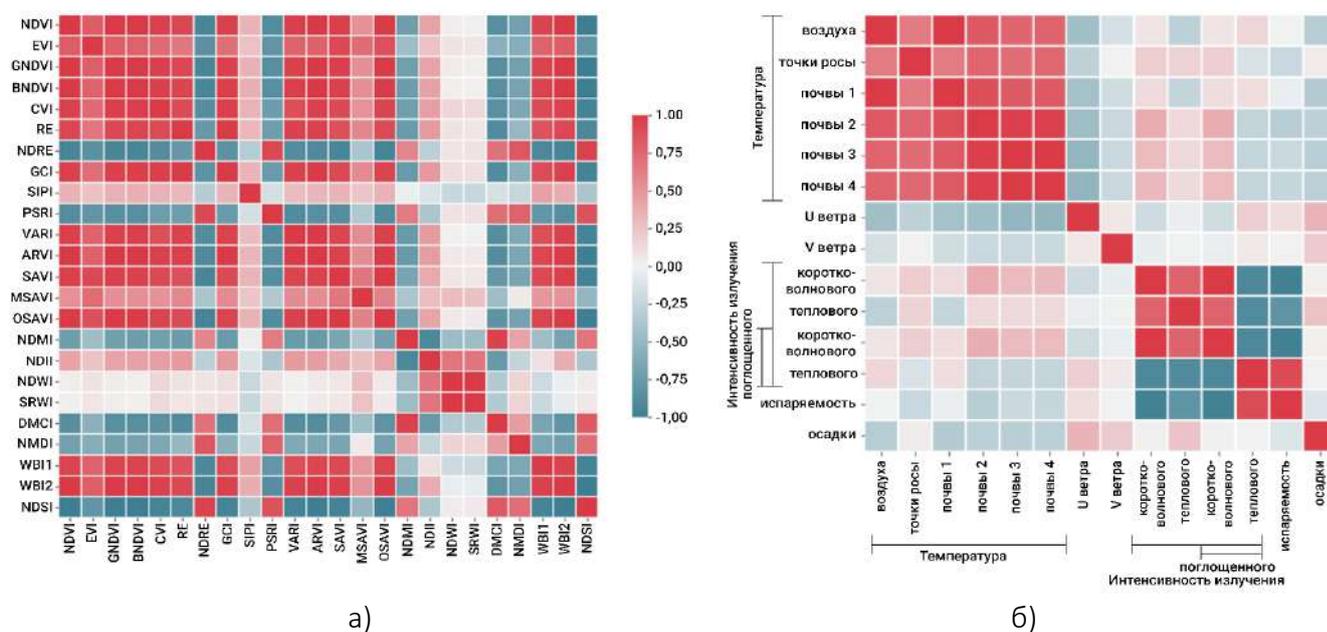


Рисунок 3.7. Примеры результатов анализа корреляции:
 а) спектральных индексов; б) некоторых метеорологических переменных

Вдобавок к этому показатели ветра, облачности и типа осадков имеют малую информативность для моделирования пожарной опасности ($|R| < 0,3$). При этом суточное обобщение из почасовой частоты данных также претерпело изменения: наибольшую ценность представляют собой максимальные и медианные значения. Из показателей, наследованных из национальных методик, верификацию на значимость прошли сумма медианных температур воздуха и сумма разностей температуры воздуха и точки росы (также медианных) за промежуток с момента последних осадков более 3 мм.

Соответственно, из ежесуточных погодных показателей далее используются температура воздуха (максимум, медиана, сумма) и точки росы (медиана), их

разность (сумма), общее количество осадков (сумма), вероятность грозы общая (медиана), интенсивность солнечного коротковолнового и теплового излучения (максимум), удельная влажность воздуха (максимум, медиана).

5. Статистические временные показатели TS1-4, вычисляемые по многолетним среднегодовым и среднемесячным значениям, имеют почти линейную зависимость друг от друга. Это объясняется тем, что коэффициент масштабирования во всех случаях одинаковый и обратно пропорционален диапазону изменения показателя, а смещение определяется выбранной статистической мерой – минимумом, максимумом, медианой или средним. Помимо этого, среднемесячная более точно характеризует аномалии показателей, тогда как среднегодовая статистика является постоянной. По значимости относительно выходной вероятности возгорания *оптимальной мерой является медиана (TS4).*

Вычисление TS4 дает положительные результаты моделирования для таких показателей, как *NDVI, NDWI и DMCI*, что показывает уровень текущего состояния пожарной опасности растительности. Показатель ежесуточного изменения TS5 также имеет высокую значимость при его применении к *медианной среднесуточной температуре воздуха и температуре поверхности.*

6. Постоянные показатели, вычисляемые по ЦМР GMTED2010, векторным слоям OSM, пространственно-временному положению точки моделирования и выражающие геоморфологические (косвенно гидрологические, почвенные), антропогенные и мета- факторы, сохраняются в неизменном виде для дальнейшего использования. Все они независимы между собой, а случаи возникновения природных пожаров в России за XXI век связаны в большей степени с определенными классами этих показателей (*Приложение 3*):

показатели, отражающие свойства поверхности

- 86,3% природных возгораний происходит в пределах *высот* до 500 м, что соотносится как с общим распределением высот территории России, так и с большими запасами ГМ в этом диапазоне;
- более 90% возгораний приурочено к участкам *уклона* до 3° (в рамках ЦМР

GMTED2010 с разрешением ~500 м);

- наиболее часто возгорания случаются на склонах южной и юго-западной *экспозиции* (по ~20%), что связано с более интенсивным приходом солнечной радиации и нагревом поверхности, однако участки остальных классов *экспозиции* (северной, северо-восточной, восточной, юго-восточной, западной и северо-западной) также имеют высокую подверженность природным пожарам (от 7 до 12%);
 - около 65% природных пожаров возникают в областях *положительной горизонтальной кривизны поверхности* (до $0,15 \text{ м}^{-1}$), интерпретирующиеся как зоны дивергенции стока (выпуклые участки), которым характерна минимальная влажность почвы в силу интенсивного перемещения воды и более высокий баланс солнечной радиации вследствие минимальных теней;
 - в случае *вертикальной и общей кривизны поверхности, баланса массы вещества (индекс MBI)* пожарам подвержены примерно одинаково зоны как конвергенции (замедления, аккумуляции), так и дивергенции (ускорения, денудации);
 - чем ниже *расчлененность поверхности*, тем выше статистическая частота возгораний: более 80% пожаров приходится на относительно равнинные участки (индекс TRI <15);
 - более 75% возгораний приурочено к участкам *индекса LS* (эрозионный потенциал рельефа) менее 1, то есть большинство пожаров происходит вне пределов эрозионных форм с повышенной влажностью поверхности (особенно в случаях водной эрозии);
 - чем выше *индекс TWI* (индекс влажности рельефа, отражает потенциал подтопления, влажность почв и грунтов), тем ниже статистическая вероятность возгораний: более 80% пожаров возникает на участках со значениями индекса менее 0;
- показатели, отражающие антропогенное влияние*
- 98% возгораний происходят в относительной близости от населенных пунктов

- (в пределах участков антропогенной нагрузки по взвешенным нормализованным расстояниям до 0,3), что подтверждает интенсивное влияние человека на возникновение природных пожаров;
- подобная тенденция наблюдается и относительно дорожной сети – 90% возгораний случаются на участках антропогенной нагрузки до 0,5);
 - в пределах территорий, подверженных непосредственной сельскохозяйственной и антропогенной нагрузке происходит минимальное количество возгораний (1%) в силу большего контроля со стороны человека, однако в непосредственной близости от этих участков наблюдается более 90% случаев возникновения пожаров;
- показатели, показывающие пространственно-временные закономерности*
- более 50% возгораний происходит в пределах *широтной зоны* 60...65° с. ш. (ежегодные крупные пожары в сибирских таежных лесах), более 95% – 50...70° с. ш.;
 - также более половины случаев возгораний приурочено к *долготному сектору* 105...140° в. д., что связано с условиями климата и погоды, обилием растительных ГМ, как следствие, возникновения сибирских лесных пожаров;
 - сезонная специфика явления пожаров характеризуется двойным пиком в распределении: около 20% в апреле, преимущественно в европейской части России, в связи с резким увеличением температуры воздуха и интенсивным прогреванием поверхности, а также 23% в июле по всей территории России вследствие высокого теплового и радиационного баланса и высыхания природных ГМ.

7. К постоянным (ежегодным) показателям также относится класс земного (растительного) покрова, вычленяемый из продукта MCD12. Из восьми вариантов наиболее точно описывает пожарную опасность *классификация FAO-Land Cover*. Природные пожары согласно этой классификации наиболее часто приурочены к участкам редколесий (71%), смешанных лесов с преобладанием хвойных пород (7,4%) и кустарникового/кустарничкового покрова (6,4%). Классификация

является международной, поэтому огромные массивы северных сибирских лесов отнесены в этом продукте к классу редколесий, в связи с чем наблюдается сильное смещение частоты возгораний.

По итогам предобработки обучающего набора и отбора признаков количество показателей пожарной опасности было сокращено с 678 до **52** – 32 ежедневно рассчитываемых, 15 постоянных, 5 пространственно-временных. Отобранные показатели по значимости составляют 95% от всех проанализированных величин (Рисунок 3.8). Наибольшую значимость имеют условия

погоды в виде температуры воздуха и производных от нее показателей, а также спектральные характеристики, отражающие состояние растительности. Это обеспечивается за счет учета их географической и сезонной изменчивости на основе показателей пространственно-временного положения точки моделирования.

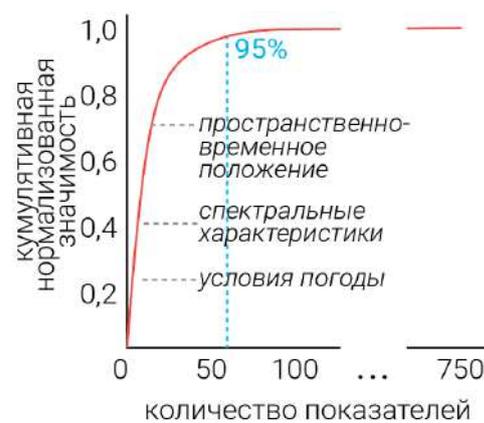


Рисунок 3.8. Кумулятивная значимость показателей

Проведенный в ходе отбора анализ корреляции переменных показателей с возникновением пожаров и статической частоты возгораний по классам постоянных показателей позволил выявить и подтвердить закономерности влияния отдельных факторов на пожарную опасность. Однако в рамках ландшафта они проявляются во взаимодействии, которое исследуется с помощью обучения нейронной сети LSTM.

Обучение модели. Верифицированный обучающий набор далее был использован для обучения рекуррентной НС методом обратного распространения ошибок. Этот набор был разделен на две части:

- *обучающая* – 80% эталонных участков пожаров за 2001-2018 гг. для итеративной оценки ошибок весов и их обновления;
- *тестовая* – 20% за 2001-2018 гг. и все участки за 2019-2020 гг. для обособленной оценки ошибок модели.

Обучение НС заняло 37 эпох в течение 4,5 часов работы восьмиядерного центрального процессора Intel Core I7-7700K и кластера из двух видеокарт NVIDIA GeForce GTX 1060 6GB. Для контроля использовалась метрика ошибок – *бинарная перекрестная энтропия*, часто встречающаяся в задачах машинного обучения и внедренная в библиотеку Keras. Ее значения для реализуемой модели на тестовых данных достигли более 90% (Рисунок 3.9).

Однако в обучающем наборе учитываются как точки возникновения пожаров, так и точки, где пожары не случились, причем последние имеют подавляющий вес в силу такого распределения в природе. Перекрестная энтропия в равной степени учитывает оба случая. Как следствие, высокое значение является неоднозначным: эти ~90% могут формировать исключительно случаи, когда модель правильно предсказала точки отсутствия пожара, а ошибочно спрогнозированные или неспрогнозированные возгорания приходится на оставшиеся 10%.

С учетом вышесказанного из матрицы ошибок были исключены подобные случаи, то есть истинно отрицательные значения. Из оставшихся компонентов – количества истинно положительных *TP* (правильный прогноз точек возгораний), ложно положительных *FP* и ложно отрицательных *FN* значений (неверный прогноз загоревшихся и незагоревшихся участков), складываются две метрики:

— *достоверность* TPR (*True Positive Rate*) = $TP / (TP + FN)$ – доля верно предсказанных возгораний от общего количества всех пожаров, описывает соответствие реальной ситуации.

— *надежность* PPV (*Positive Predictive Value*) = $TP / (TP + FP)$ – доля верно предсказанных возгораний к общему количеству предсказаний пожаров, описывает точность выходного продукта модели.

Их значения были рассчитаны для тестовой части обучающего набора (Рисунок 3.9). Итоговая достоверность модели составила **70,1%** при прогнозировании на 1-5 дней вперед, тогда как ее надежность на этот период – **59,0%**. При увеличении заблаговременности прогноза до 6-14 дней значения падают до **61,9** и **52,8%** соответственно.



Рисунок 3.9. Результаты оценки точности модели на тестовой части обучающего набора

Следует отметить, что прослеживается тенденция роста точности модели по мере увеличения и обновления ряда данных. Это подтверждает корректность выбора метода моделирования на основе неоднородных больших данных, а также является преимуществом модели для ее перспективного улучшения с учетом долгосрочного функционирования источников данных.

Таким образом, разрабатываемая модель была дополнена методической частью функционирования в виде *рекуррентной НС подтипа LSTM*. Кроме того, содержательная часть коренным образом была преобразована с учетом анализа взаимосвязей показателей между собой и с пожарной опасностью территории. В результате, были получены наиболее значимые для моделирования вероятности возгорания показатели. *Обучение и тестирование НС по данным однородного ряда случаев пожаров за 2001-2020 гг. показало высокую обобщающую способность модели для интеграции множества показателей в вероятность потенциального возгорания территории и успешного прогнозирования природных пожаров.*

3.4 Анализ применимости модели: сравнение с существующими методиками оценки и прогнозирования пожарной опасности

Модель пожарной опасности природных территорий России ранее была протестирована для подтверждения ее соответствия изначально заданным требованиям – возможности оценки и прогнозирования природных пожаров. Эта процедура называется *верификацией* модели. Наряду с ней проводят также

валидацию – тестирование пригодности продукта для применения в конкретных условиях (Бритов, 2013). В данном случае эта процедура необходима для проверки возможности использования модели для регулярного мониторинга с целью предупреждения рисков возгорания.

Сущностью валидации является сравнение с существующими решениями, которые признаны на сегодняшний день наиболее эффективными в рассматриваемой области. Для мониторинга пожарной опасности природных территорий России в целях прогнозирования возгораний на общегосударственном уровне используется методика Нестерова, которая была подробно проанализирована ранее (п. 1.3, 1.5). Результаты моделирования по этой методике распространяются в виде готовых аналитических карт (Рисунок 1.12в), основным содержанием которых является комплексный показатель пожарной опасности Нестерова (КП).

На региональном и локальном уровнях этот показатель обогащается классами природной пожарной опасности, устанавливаемыми для лесной квартальной сети России. Они определяются преобладающими видами растительности, антропогенным влиянием (близость к населенным пунктам и дорогам, вырубки), степенью усыхания, наличием гарей и окружением с повышенной пожарной опасностью (Приказ Рослесхоза №287). Кроме того, детализация квартальной сети (сотни м-первые км) соотносима с разрешением сетки модели – 500 м.

В явном или неявном виде все эти факторы и показатели учитываются в разрабатываемой геоинформационной модели пожарной опасности. Это дает возможность содержательно ее сравнивать с официально закреплёнными методиками на различных пространственных уровнях – *национальном* в масштабе всей территории России и *региональном* для отдельных наиболее уязвимых участков с точки зрения пожарной опасности.

3.4.1 Валидация модели на национальном уровне

Формат официально распространяемых материалов (*.jpeg) комплексного

показателя Нестерова позволяет использовать их только для визуального анализа, тогда как автоматизация для расширенного применения недоступна. Однако последовательность методики открытая, поэтому был реализован алгоритм вычисления показателя на основе ежесуточных данных метеомодели ECMWF – температуры воздуха и точки росы, количества осадков (Рисунок 3.10). Это обеспечивает идентичность исходных данных, что улучшает пространственную составляющую сравнения выходных продуктов пожарной опасности.

В обоих случаях – и в разработанной модели, и по методике Нестерова, мы получаем количественную величину пожарной опасности, непрерывно распределенную по территории. С одной стороны, близость пространственных картин этих величин будет свидетельствовать о корректности созданной модели. С другой стороны, необходимо сравнить их по эффективности достижения общей цели – передаче действительной пожарной ситуации с выделением зон потенциального возникновения природных пожаров. В эти зоны по методике Нестерова входят территории с наиболее критическим V классом пожарной опасности (значение КП >10 000 согласно общероссийской шкале). В текущей модели аналогичные участки выделяются по пороговому значению вероятности потенциального возгорания – ВПВ >95%.

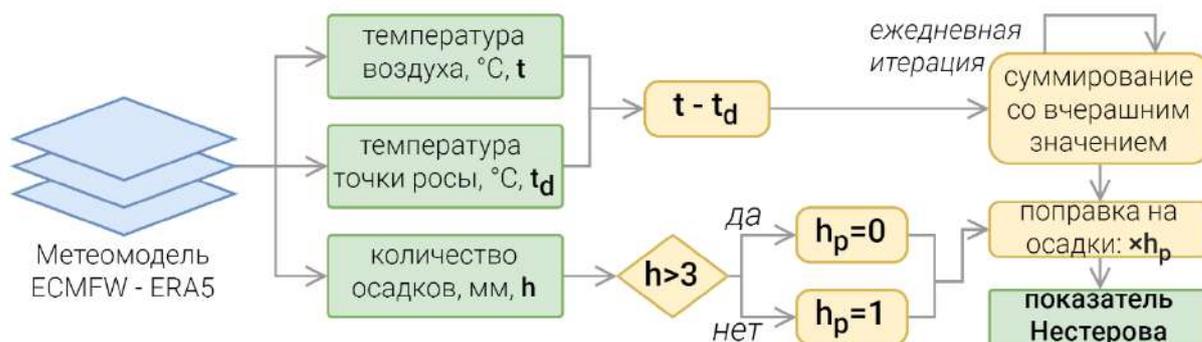


Рисунок 3.10. Алгоритм вычисления комплексного показателя Нестерова по данным ECMWF-ERA5

С учетом вышеизложенного эффективность моделей оценивается по доле случившихся природных пожаров в пределах разграниченных зон с высокой пожарной опасностью (КП >10 000 и ВПВ >95%). Точки возникновения

возгораний для подсчета количества были сформированы на основе продукта MODIS тепловых аномалий MxD14 по методике, описанной в п. 3.2. В качестве периода тестирования был выбран 2021 год как наиболее актуальный полный пожароопасный сезон на момент исследования. Более того, данные за этот промежуток не были использованы для обучения модели, что позволит повторно верифицировать ее.

Анализ по описанным положениям показал следующие результаты:

- за 2021 год космической системой MODIS было зафиксировано около 450 тыс. тепловых аномалий, из них 33 076 были интерпретированы как точки возникновения природных возгораний;

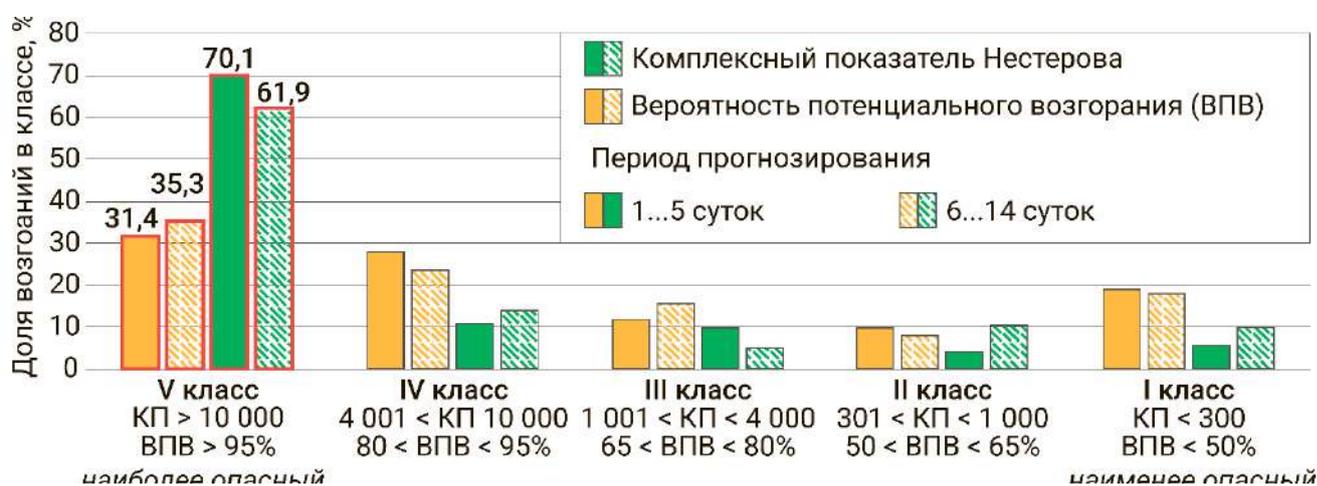
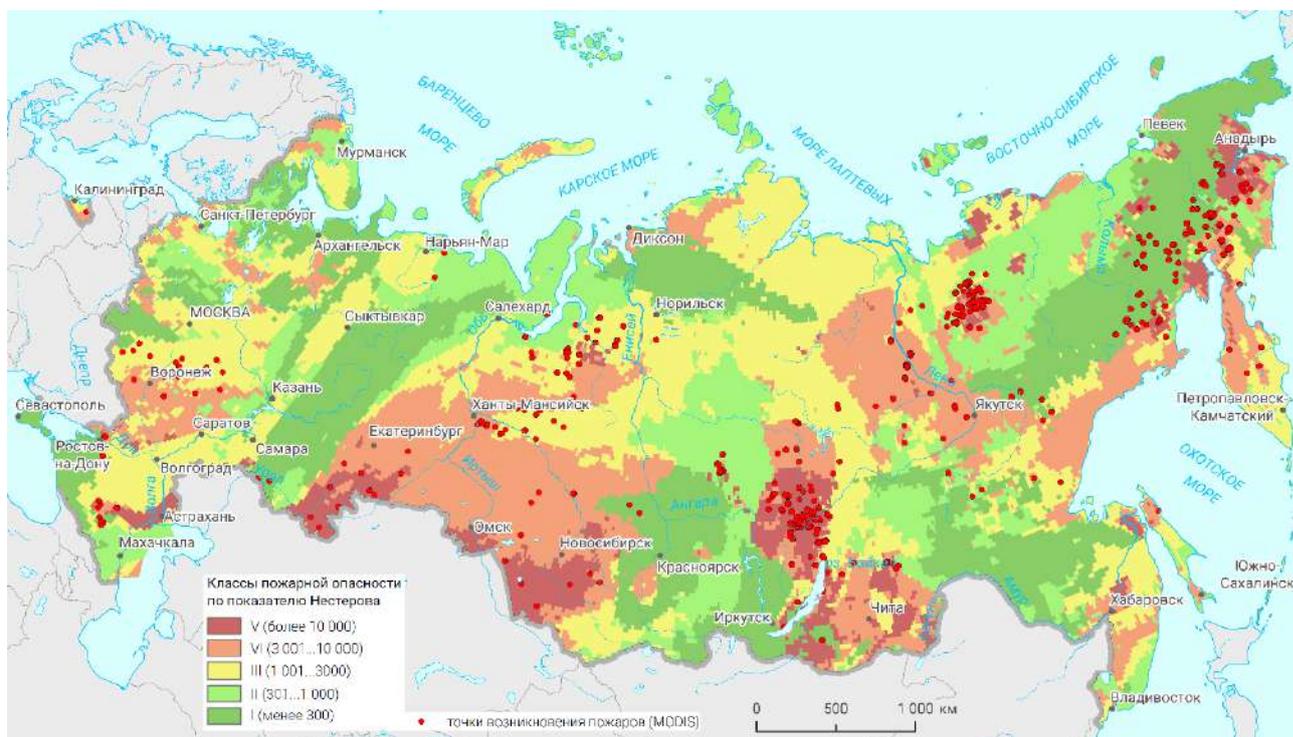


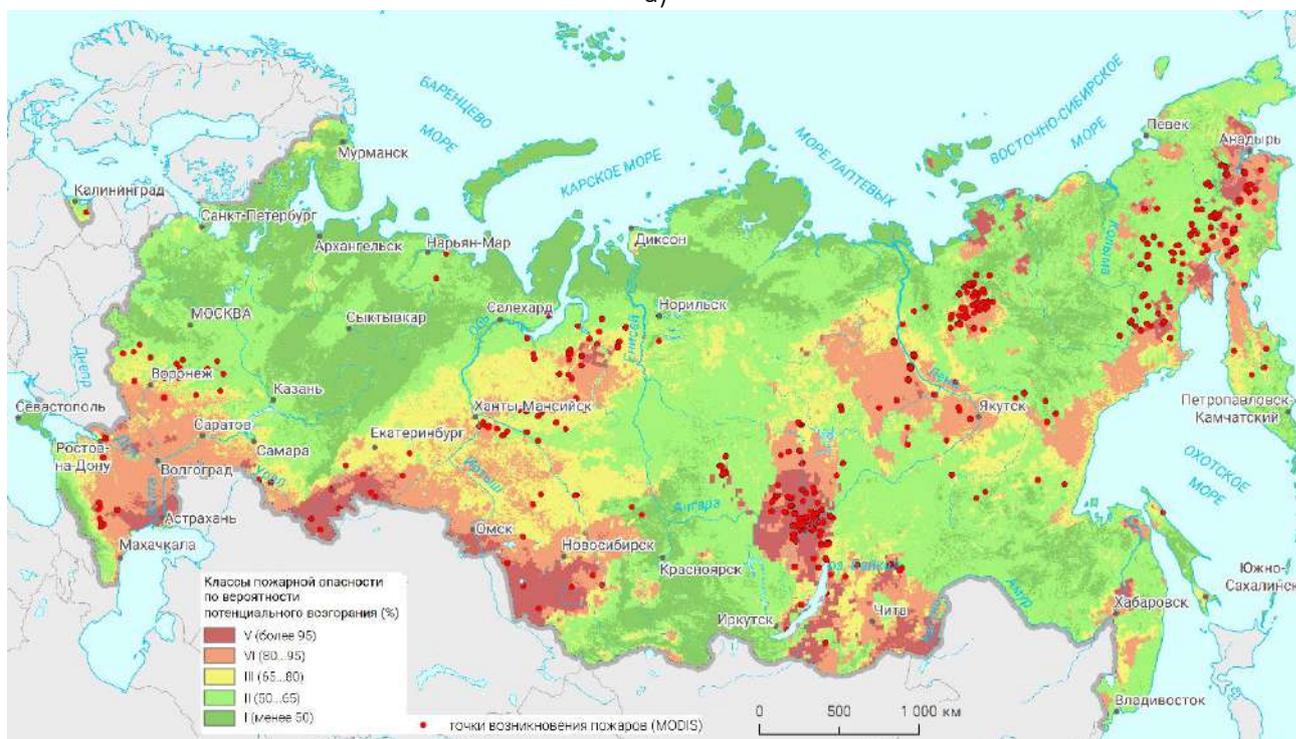
Рисунок 3.11. Результаты валидации методики на национальном уровне – распределение точек возникновения природных пожаров по классам пожарной опасности

- средняя доля точек, оказавшихся в главном V, наиболее пожароопасном по показателю Нестерова классе, составляет 31,4% и 35,3% при заблаговременности прогноза 1-5 и 6-14 суток соответственно (Рисунок 3.11);
- аналогичные показатели для разработанной модели составляют 70,1% и 61,9% (Рисунок 3.11), что практически в 2 раза выше – это указывает на ее большую прогностическую способность по сравнению с методикой Нестерова;
- кроме того, распределение точек возгорания по другим классам пожарной опасности также различается (для ВПВ эмпирически приняты округленные границы по методу равных интервалов 15%: 95, 80, 65, 50%; Рисунок 3.11):

- в рассматриваемой модели – чем выше ВПВ и класс опасности, тем больше количество точек в этом классе; в двух наиболее опасных классах происходит более 80% пожаров, в трех – около 90%;



а)



б)

Рисунок 3.12. Пример распределения классов пожарной опасности по территории России, 15.07.2021, заблаговременность прогноза – 1 сутки:
а) по методике Нестерова; б) в разработанной модели

- в модели по методике Нестерова – доля точек в IV и I (наименее пожароопасном) классах сопоставима между собой, а в III и II – достигается минимальное количество случаев пожаров; в двух наиболее опасных классах случается около 60%, в трех – более 70%.
- пространственные распределения сравниваемых величины достаточно схожи между собой (*Рисунок 3.12*), что свидетельствует о сильном влиянии погодного фактора и показателей температуры на пожарную опасность.

Таким образом, полученные результаты обеспечивают успешную валидацию методики геоинформационного моделирования пожарной опасности на национальном уровне.

3.4.2 Валидация модели на региональном уровне

Региональный уровень моделирования пожарной опасности в России характеризуется адаптацией параметров национальной методики Нестерова к условиям в пределах административных границ субъектов. Это уточняет оценку возгораемости, однако делает ее содержательно несопоставимой между регионами (*п. 1.3.2*). Напротив, разработанная методика описывает пожарную опасность всей территории России в непрерывном виде благодаря учету пространственно-временных метафакторов, а ее пространственное разрешение 500 м отвечает требованиям моделирования на региональном уровне.

Для валидации модели пожарной опасности *были выбраны национальные парки «Мещера» и «Бузулукский бор»* как примеры особо охраняемых природных территорий с разнообразными и ценными ландшафтами. Они находятся на стыке Московской, Владимирской и Рязанской, Самарской и Оренбургской областей соответственно (*Рисунок 3.13*).

Лесоустроительные материалы на эти территории были предоставлены группой компаний «СканЭкс», занимающейся приемом и тематической обработкой данных ДЗЗ (*URL: <https://www.scanex.ru/>*). Ее представителями материалы были обновлены (*Рисунок 3.14-верхний ряд*) на предмет распределения

классов природной пожарной опасности с помощью космических снимков с высоким (15-30 м, Landsat-5, 7, 8), очень высоким (1-5 м, SPOT-5, 6; EROS-A) и сверхвысоким (0,61 м, QuickBird) пространственным разрешением.



Рисунок 3.13. Расположение объектов исследования для валидации модели на региональном уровне: национальные парки а) «Мещера», б) «Бузулукский бор»

Природная пожарная опасность в данном случае отражает непосредственную готовность ГМ территории к возгоранию (виды растительности, степень высыхания, захламленность) и в большей степени соответствует внутренним факторам согласно общей классификации. Однако разграничение классов этого показателя проводится также с учетом внешних факторов, главным образом, антропогенных (близость к инфраструктуре).

В рассматриваемой модели учитывается намного большее количество показателей, однако годовое или многолетнее усреднение ВПВ будет показывать именно воздействие внутренних факторов пожарной опасности (внешние будут компенсированы длительным периодом). На основании этого усреднение модели было произведено на 2014 год (период обновления лесостроительных материалов) и 2021 год (наиболее актуальный полный пожароопасный сезон). Полученные результаты приведены на *Рисунок 3.14*:

- сравнивая обновленные на 2014 год лесостроительные материалы с соответствующими фрагментами модели на тот же период, мы видим

достаточно существенную корреляцию (R -Пирсона $\approx 0,71$), особенно в области наиболее пожароопасных зон;

- моделирование на 2021 год показывает *возможность применения методики для приближенной актуализации материалов природной пожарной опасности*: общая пространственная картина сохраняется по причине постоянства видового состава растительности, однако наблюдаются небольшие изменения их потенциальной возгораемости вследствие перераспределения факторов.

По итогам валидации на региональном уровне была подтверждена обобщающая способность разработанной модели к воспроизведению традиционно рассматриваемой природной пожарной опасности. Вместе с этим разрешение модели сравнимо или детальнее размеров квартальной сети, что позволяет улучшить точность разграничения пожароопасных зон.

Таким образом, сравнение моделей по разработанной и существующим методикам показало *применимость результатов исследования на национальном и региональном уровнях*. Успешно были подтверждены пространственные параметры модели: *охват* – территория всей России, *пространственное разрешение* – 500 м, пригодное для детального исследования отдельных локальных участков.

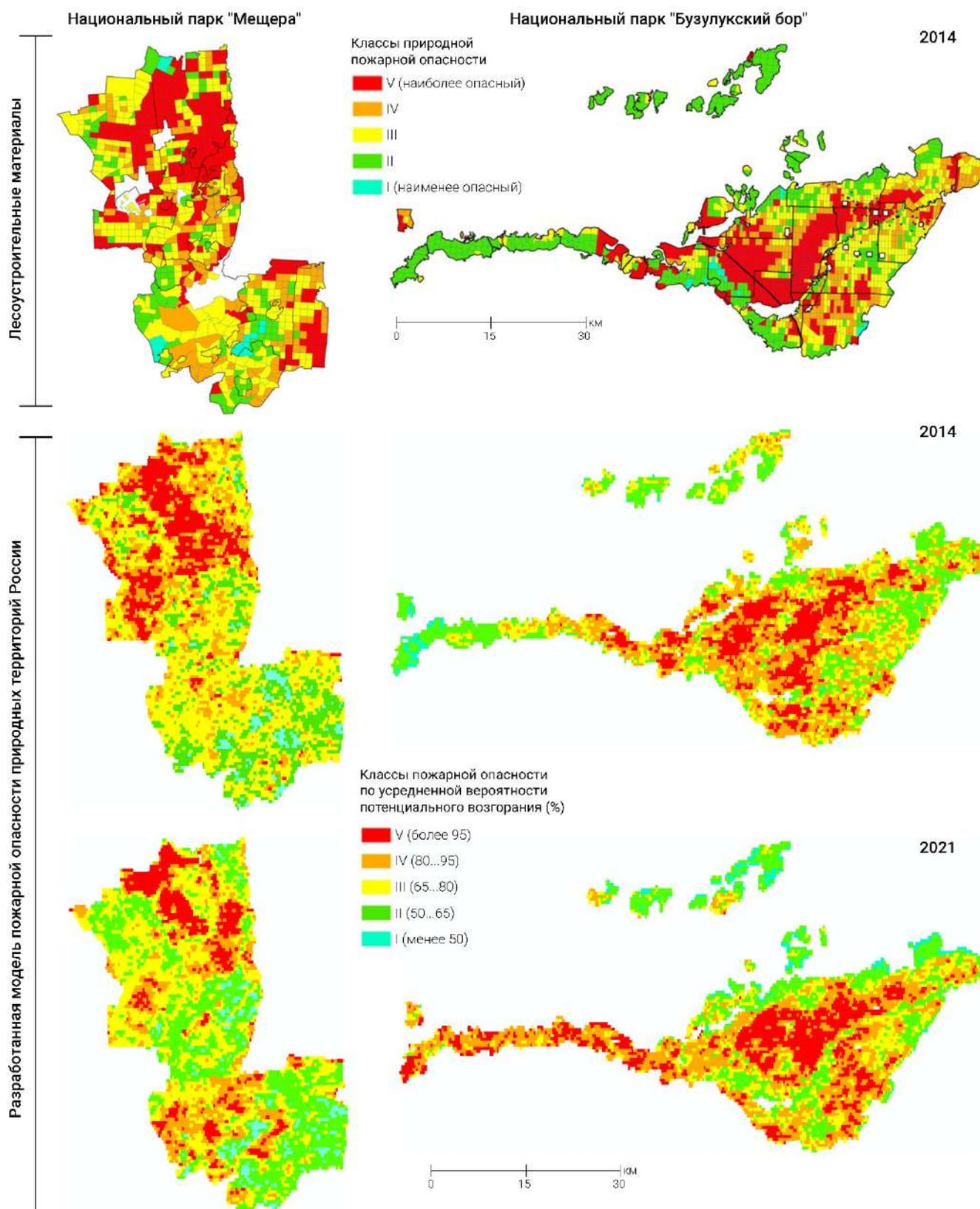


Рисунок 3.14. Лесоустроительные материалы природной пожарной опасности для национальных парков «Мещера» и «Бузулукский бор» (верхний ряд, предоставлены ГК «СканЭкс») и соответствующие им фрагменты разработанной модели (средний и нижний ряд)

Выводы по главе 3

1. На базе исходных геоинформационных продуктов были определены 678 потенциальных показателей, соответствующих факторам пожарной опасности. Анализ их взаимосвязей с природными пожарами на территории России показал, что для достоверного моделирования достаточно 52 показателя из них. Наиболее значимыми предикторами возгорания являются погодные условия (температура воздуха и производные) и спектральные характеристики растительности. Однако именно учет их географической и сезонной изменчивости, обеспечивающийся за счет пространственно-временных показателей, повышает локальную точность моделирования для всей территории России.

2. В качестве базовых компонентов моделирования используются:

- содержательный – набор тепловых аномалий MODIS, выявленных за 2001-2020 гг., после аналитической обработки интерпретируемых как природные возгорания и формирующий обучающий набор;
- пространственный – регулярная сетка значений в нормальной равновеликой конической проекции Альберса с пространственным разрешением 500 м;
- временной – последовательность 30 ежедневных значений с прогнозом на 14 суток вперед.

Они определяют возможность интеграции разнородных данных и показателей в единый шаблон модели пожарной опасности.

3. Для осуществления этой интеграции была использована рекуррентная нейронная сеть с долгой краткосрочной памятью (LSTM). Ее обучение с использованием однородного ряда случаев природных пожаров позволяет создать прогнозную модель, воспроизводящую вероятность потенциального возгорания.

4. Верификация и валидация модели продемонстрировали ее успешную целевую применимость: методика обладает большей ориентированностью на выделение наиболее пожароопасных участков природных территорий по сравнению с традиционными достижениями.

5. Итоговая последовательность методики приведена на *Рисунок 3.15*.

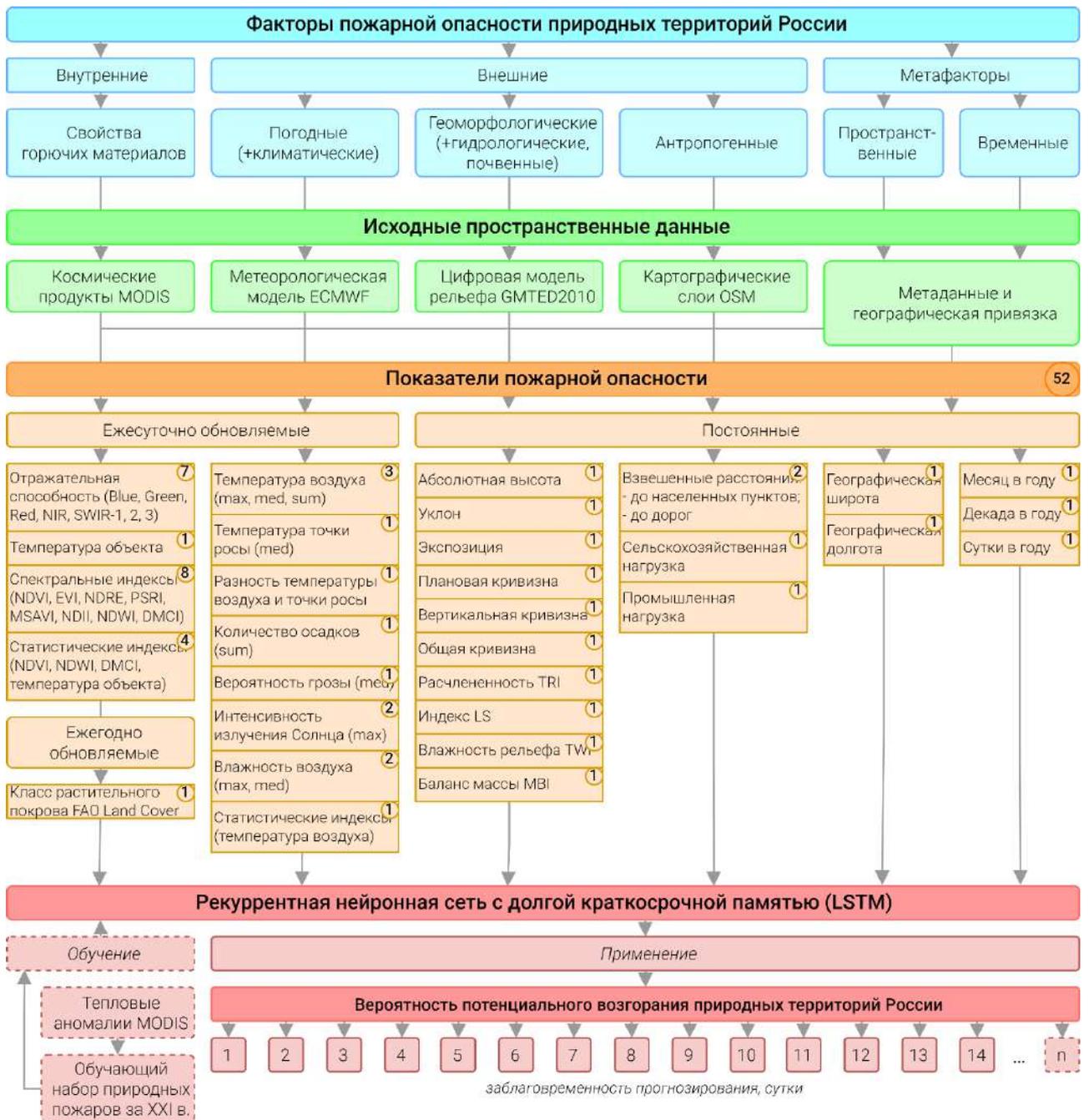


Рисунок 3.15. Последовательность методики геоинформационного моделирования пожарной опасности природных территорий России

ГЛАВА 4. ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА ПРОГНОЗНОГО МОНИТОРИНГА ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ

Информационной системой согласно современным определениям (*ГОСТ Р 53622-2009; Козаловский, 2003*) называется совокупность технических ресурсов, аппаратно-программных средств, организованных как единое целое и предназначенных для хранения, поиска (сбора), обработки и распространения информации в рамках определенной предметной области. В этом случае предметом является *пожарная опасность*. Ее мониторинг как комплекс регулярных наблюдений, подчиняющихся определенным правилам и алгоритмам, необходим для *прогнозирования и контроля потенциальных возгораний*.

На предыдущих этапах исследования была разработана методика геоинформационного моделирования пожарной опасности, тестирование которой показало ее пригодность для контроля природных территорий России. Для организации (прототипа) информационной системы мониторинга на ее основе необходимо решить следующие задачи:

- проектирование архитектуры системы, удовлетворяющей современным производственным тенденциям развития междисциплинарной отрасли геоинформатики, картографии и дистанционного зондирования;
- обеспечение непрерывной связи с внешними элементами для приема исходных геоинформационных продуктов и выдачи конечных материалов прогнозирования пожарной опасности;
- автоматизация процессов обработки данных и функционирования информационных потоков.

4.1 Общие положения проектирования системы

Основным предназначением информационной системы как практической реализации разработанной методики является распространение результатов моделирования среди потенциальных пользователей. В сочетании с открытостью системы как регламентированным свойством в научной среде оптимальный способ

ее построения – *веб-приложение*. Ее целевой особенностью является обеспечение доступа к информации при помощи браузера через сеть Интернет вне зависимости от операционной системы, что представляет собой наиболее приспособленное и удобное решение с точки зрения нагрузки на пользователя. Следует отметить, что аналогичные реализации используются в ранее рассмотренных существующих информационных системах мониторинга пожарной опасности (п. 1.4).

Выбор архитектуры веб-приложения определяется тематикой и содержанием информации, потоками ее формирования, хранения и передачи, что в общей сложности составляет *логику системы*. Как правило, противопоставляются *монолитная* и *микросервисная* архитектуры. Монолитный тип является традиционным и представляет собой единую базу взаимосвязанных исполняемых процедур, тогда как микросервисный – независимые друг от друга распределенные службы, каждая из которых отвечает за выполнение узконаправленной задачи (*Никитин, Гриценко, 2020*). В нашем случае тематическая задача моделирования пожарной опасности является достаточно однородной, последовательной и не предполагает последующего масштабирования, поэтому развертывание сложной микросервисной архитектуры будет неоправданно затратным. В связи с этим проектирование приложения осуществляется в соответствии с возможностями монолитной архитектуры.

Несмотря на целостность архитектуры в силу работы с пространственными данными разрабатываемая система наследует принципы ГИС (*Лурье, 2016*) и функционально подразделяется на четыре подсистемы (модуля) работы с данными: *приема исходных данных, хранения, обработки, визуализации* (*Рисунок 4.1*), образующих последовательность прогнозирования пожарной опасности. Это позволяет распределить операционную нагрузку на ряд сопутствующих геоинформационных задач и подобрать соответствующие технологии реализации. Более подробно каждая из подсистем рассматривается в последующих разделах.

Модульность приложения предполагает использование разнообразных технологий, связанных общей последовательностью выполнения задачи. Это ведет

к увеличению его составной сложности из-за возрастания зависимостей между элементами. Поэтому для автоматизации сборки приложения и его развертывания на физической машине используется контейнеризатор Docker, который изолирует все зависимости, организуя их в управляемую через общие команды систему (Ibrahim et al., 2021).

С точки зрения физической вычислительной нагрузки архитектура системы является *клиент-серверной*, подход которой дополняет представленные выше аспекты разработки. Эта архитектура представляет собой шаблон проектирования, при котором информационный поток и задачи его формирования распределяются между *сервером* – поставщиком данных, и *клиентом* – их потребителем. В рамках серверной части разрабатываемого веб-приложения происходит работа модулей, приема, обработки и хранения, а также частично – модуля визуализации для поддержки запросов и интерактивного взаимодействия с клиентской частью. Преимуществами такого подхода является защищенность исходных и производных данных, а также снижение требований к компьютерам пользователей, которые используются только для просмотра результатов прогнозирования.

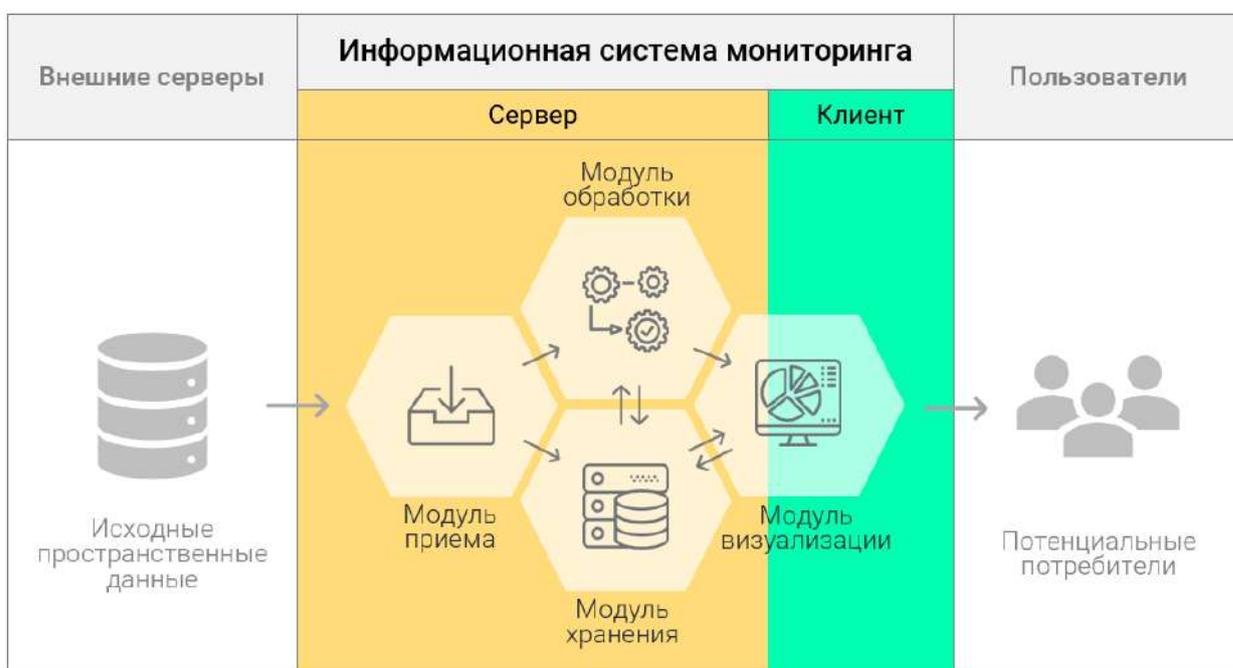


Рисунок 4.1. Функциональная структура разрабатываемой системы

Для реализации основных компонентов системы используется язык

программирования *Python*. Его выбор обуславливается простотой и универсальностью, что выражается низким порогом вхождения для разработчиков в предметных областях и наличием специализированных библиотек, предоставляющих готовые функции для решения различных профессиональных задач. Более того, этот язык неразрывно связан с развитием геоинформационных технологий и интегрирован в современные инструменты обработки пространственных данных (*Selander, 2022*).

Таким образом, информационная система мониторинга пожарной опасности проектируется как монолитное модульное клиент-серверное веб-приложение на языке *Python*, функционально разделенное на геоинформационные модули. Такое архитектурное сочетание является частым в прикладной области геоинформатики, картографии и ДЗЗ и обладает большим потенциалом оперирования информацией для решения различных тематических задач, в том числе воспроизведения результатов моделирования пожарной опасности природных территорий России.

4.2 Подсистема приема исходных данных

Подсистема приема исходных пространственных данных предназначена для реализации решения начальной геоинформационной задачи – сбор данных. В рамках методики моделирования пожарной опасности предусмотрено четыре типа геоинформационных продуктов, выступающих исходными. Их использование для мониторинга предполагает организацию непрерывного доступа к источникам этих данных и ежесуточную загрузку обновленных версий продуктов.

Источники данных и работа с ними. При определении источников (*Таблица 4.1*) для загрузки исходных данных были использованы следующие критерии:

- официальный характер распространения данных с соблюдением условий открытых лицензий;
- возможность прямой загрузки данных или наличие API (API – Application Programming Interface, программный интерфейс приложения как набор способов взаимодействия с другими приложениями);

— долгосрочность и непрерывность функционирования, быстрота соединения и передачи данных для обеспечения надежности работы системы.

Таблица 4.1. Характеристики загрузки различных типов данных

Исходные данные	Источник	Способ загрузки	Периодичность загрузки	Лицензия
Данные ДЗЗ MODIS	LP DAAC	прямая загрузка HTTPS	ежесуточно	GNU General Public License (GNU GPL)
Метеорологическая модель ECMWF	ECMWF	API ECMWF на Python	ежесуточно	Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY)
Цифровая модель рельефа GMTED2010	USGS Earth Explorer	вручную через HTTPS	единоразово	USGS Standard Disclaimer
Картографические слои OSM	Geofabrik		ежегодно	Open Data Commons Open Database License (ODbL)

Получение данных MODIS происходит с помощью сервиса LP DAAC (The Land Processes Distributed Active Archive Center), который предназначен для распространения продуктов, получаемых в рамках программы NASA EOS. Сервис предоставляет несколько инструментов доступа к данным, в том числе и возможность прямой загрузки продуктов по их идентификаторам через безопасный протокол HTTPS. Иерархически организованная ссылка доступа представляет собой совокупность характеристик продукта, таких как его хранилище, закодированный тип, коллекция, дата съемки и номер тайла. Порядок ее формирования подобен системе поиска с указанием соответствующих критериев (Рисунок 4.2). Собственно загрузка данных происходит через утилиту командной строки DAAC2Disk (*LP DAAC2Disk Download Manager User Guide, 2020*), входными параметрами которой являются ссылка на продукт и логин-пароль учетной записи к сервису.

Сбор метеорологических данных ECMWF осуществляется на основе API в виде библиотеки на языке Python – *ecmwf-api-client-python*. Сценарий загрузки включает в себя авторизацию на портале ECMWF через уникальный ключ пользователя и указание параметров отбора необходимых данных – идентификаторы набора, переменные, временной диапазон и другие (Рисунок 4.3).

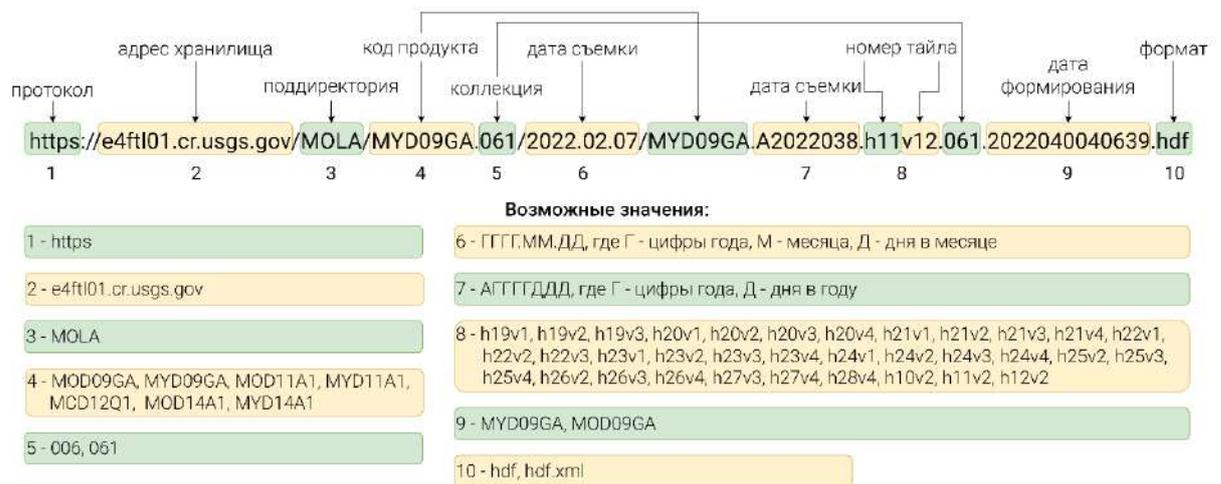


Рисунок 4.2. Порядок формирования ссылки доступа к продуктам MODIS

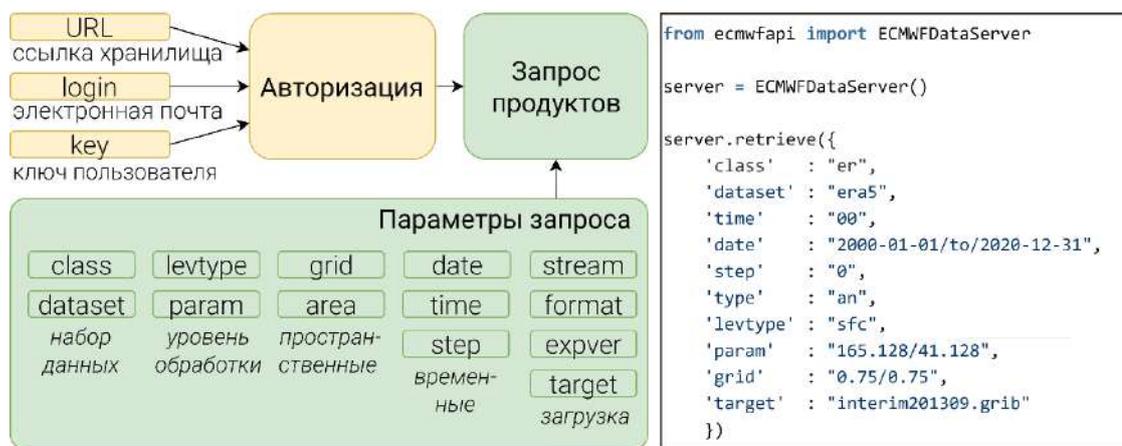


Рисунок 4.3. Порядок запроса продуктов ECMWF

Рассмотренные типы данных являются ежедневно обновляемыми, поэтому процедуры их загрузки запускаются по расписанию: каждые сутки в ночное время (01-05ч по UTC+0), когда становятся доступными обновленные продукты и достигается минимальная клиентская нагрузка пользователей, проживающих на территории России. Регулярный прием данных реализован надстройкой над скриптами загрузки с помощью библиотеки *python-crontab*. Она позволяет автоматизировать мониторинг путем запуска фоновых заданий и их распределения по параллельным вычислительным потокам во избежание наслаивания операций.

Вместе с этим загрузка ЦМР и картографических слоев с помощью сервисов USGS Earth Explorer и Geofabrik.de соответственно является условной, так как показатели на их основе являются постоянными и временной ряд не образуют. Соответственно, их подготовка была произведена единообразно, а обновление

планируется раз в год или реже, по мере выхода новых версий продуктов.

Лицензирование исходных данных. Также на этапе сбора исходных геоинформационных продуктов следует проанализировать их лицензирование (*Таблица 4.1*), которое регулирует правовые особенности работы с данными. Содержание лицензий используемых данных – GNU GPL, CC BY 4.0, ODbL, указывает на свободную возможность их *просмотра, изучения, распространения и преобразования*, как в *коммерческих*, так и в *некоммерческих* целях. При этом поставщики данных снимают ответственность за достоверность содержащейся в них информации и возможные последствия их использования. Дополнительно накладываются обязательства явного упоминания источников данных, а также предоставления эквивалентных прав пользователям производных распространяемых продуктов.

Методика моделирования пожарной опасности предполагает изучение, преобразование и распространение производных продуктов в некоммерческих целях, следовательно, исходные права не нарушаются. Выполнение предписанных обязательств обеспечивается равноценным лицензированием выходной информации согласно принципам свободного использования продуктов «как есть» (лицензия Expat – *Приложение 4*).

Связь с другими подсистемами. Полученные данные физически направляются в подсистему хранения, методически – для последующей тематической обработки. Поддержание связи между внутренними подсистемами осуществляется за счет запросов к подсистеме хранения и отслеживания состояния исходных продуктов (отсутствуют, загружаются, обрабатываются или удалены).

В то же время работа подсистемы приема во многом зависит от внешних серверов, поэтому были подобраны открытые и наиболее устойчивые в плане нагрузки поставщики данных. Однако, все эти данные являются достаточно распространенными, поэтому в случае долгосрочного сбоя соединения из-за серверных неполадок возможно в короткие сроки переопределить связи с другими источниками. Наиболее подходящими заменами являются серверы Google Cloud

Storage, Amazon Web Services, обладающие крупнейшими облачными хранилищами пространственных данных.

Таким образом, подсистема приема является входным элементом системы и обеспечивает непрерывную загрузку исходных данных, необходимых для функционирования остальных модулей системы и в целом моделирования пожарной опасности.

4.3 Подсистема обработки данных

Подсистема обработки данных является главным тематическим модулем системы, в ее основу закладывается последовательность методики геоинформационного моделирования пожарной опасности (Рисунок 3.15). Ее реализация осуществляется поэтапно (Рисунок 4.4) с помощью библиотек обработки пространственных данных и создания нейронных сетей на языке Python.

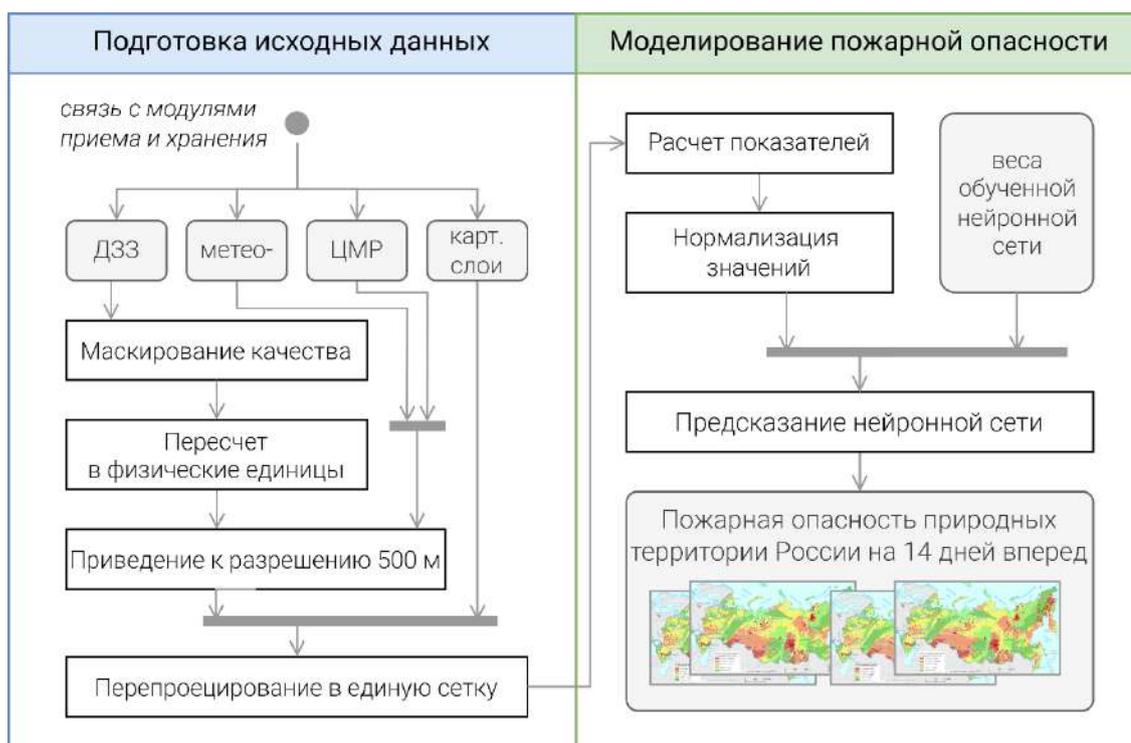


Рисунок 4.4. Алгоритм, реализованный в рамках подсистемы обработки данных

Подготовка данных. После сбора необходимых исходных данных из внешних источников они должны быть приведены к виду:

- отражающему физические явления в собственных единицах измерения;

— *стандартизированному*, который позволит интегрировать показатели на их основе в единую меру ежесуточной пожарной опасности.

Первый пункт по большей части касается данных ДЗЗ, которые требуют предобработки перед непосредственным применением в исследованиях. Для них производятся упомянутые выше процедуры маскирования качества и пересчета в физические единицы отражательной способности и температуры.

Этап подготовки преимущественно определяет пространственную составляющую – вся территория России разбивается на множество равномерно распределенных точек, значения показателей в каждой из которых действительны на площади 500×500 м. То есть растровые данные перепроецируются в единую сетку и приводятся к одному разрешению, а также маскируются по территории России. Кроме того, с технической точки зрения, данные также должны быть приведены к одному формату – GeoTIFF (Tag Image File Format). Он является наиболее популярным форматом изображений и включает в себя специализированные теги для идентификации пространственных данных.

Реализация операций подготовки данных выполняется, в основном, с помощью библиотек на языке Python – *gdal* и *numpy*. Библиотека GDAL (Geospatial Data Abstraction Library) предназначена для работы с растровыми и векторными пространственными данными – их чтения, разноплановой обработки и записи в многочисленные форматы. Библиотека NumPy (Numerical Python) является фундаментальным инструментом языка для реализации вычислительных операций и служит базой для реализации многих научных приложений. Их преимуществом является сочетание простого синтаксиса Python с высокой производительностью языка C, на котором написан их исходный код (*Garrard, 2016*).

Моделирование пожарной опасности представляет собой тематическую обработку подготовленных данных. На их основе вычисляются прошедшие верификацию показатели пожарной опасности согласно алгоритмам их расчета (*n. 3.1*). После получения совокупности значений для каждой точки пространственной сетки они нормализуются в диапазон $[0; 1]$. Это является их

подготовкой к использованию в нейронной сети во избежание во время вычислений больших чисел, формат записи которых может превысить допустимый диапазон хранения. Все расчеты до текущего момента также производятся с помощью библиотек *gdal* и *numpy*, используются преимущественно операции из растровой алгебры – поэлементные математические действия с матрицами тематических изображений.

Далее нормализованные значения загружаются в ранее упоминавшийся нейросетевой модуль *keras*, на котором реализована используемая нейронная сеть с ядром LSTM. Сопоставление значений показателей пожарной опасности с весами, полученными в результате обучения модели, позволяет спрогнозировать значения пожарной опасности на будущие временные промежутки. В целом, процедура уже была ранее описана на этапе тестирования, когда веса применялись для предсказания пожаров на необученных данных 2019-2020 гг.

На этапе нейросетевого моделирования принципиальным для быстрогодействия системы является аппаратное обеспечение, в данном случае – *наличие дискретной видеокарты*. Она используется для многократного ускорения вычислений, что достигается за счет их распараллеливания на тысячах ядрах графического процессора. Основным критерием выбора видеокарты является объем видеопамати, который определяет количество данных, одновременно отправляемое из центральной процессора в графический. Для нормальной работы современных нейронных сетей, то есть обучения за несколько часов и мгновенного вывода, рекомендуется минимально 4-6 ГБ (*Ang, Seng, 2021*). В текущем исследовании применяется кластер с объемом 12 ГБ из двух видеокарт NVIDIA GeForce GTX 1060 6GB, подключенных к системе на основе драйверов CUDA.

Таким образом, результатом этапа моделирования пожарной опасности, как и подсистемы обработки данных являются ежедневные тематические изображения пожарной опасности территории России. Рассматриваемый модуль является основным в системе и связан со всеми другими подсистемами: получая данные из подсистем приема и хранения, обеспечивает информацией клиентскую часть.

4.4 Подсистема визуализации результатов

Подсистема визуализации предназначена для доступа потенциального пользователя системы к результатам моделирования пожарной опасности. Именно эта подсистема формирует веб-приложение, связывающее вычислительный сервер моделирования пожарной опасности с компьютером пользователя (Рисунок 4.5).

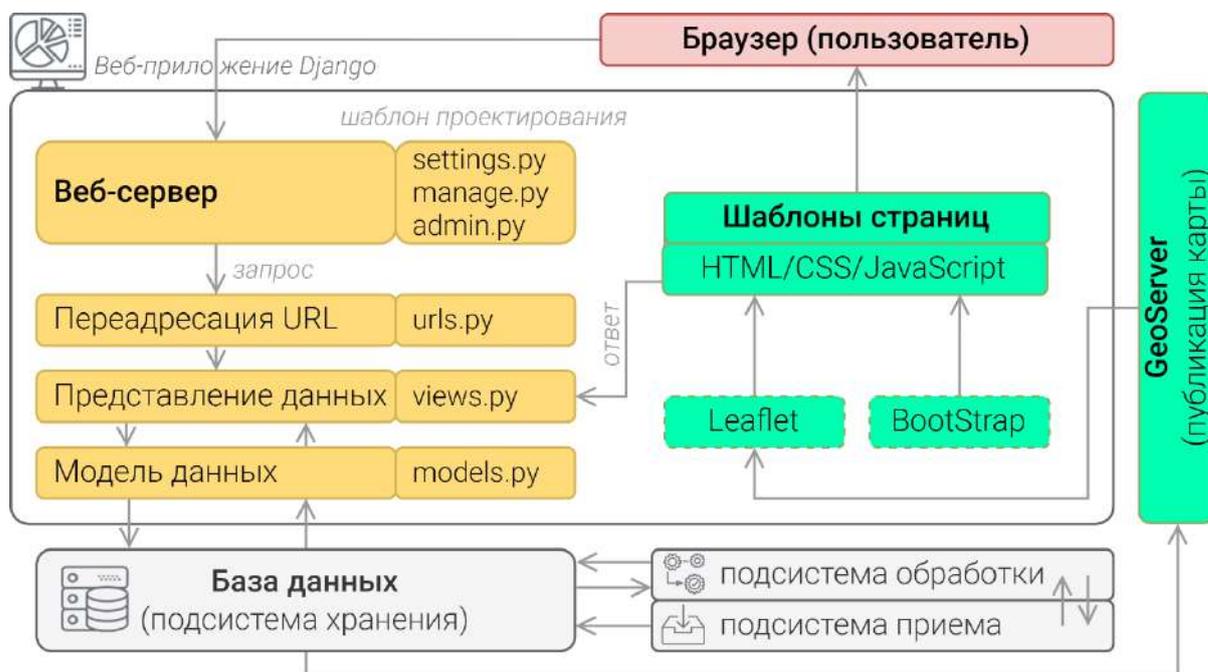


Рисунок 4.5. Детализация подсистемы визуализации как веб-приложения Django

Реализация подсистемы. В качестве технологии реализации подсистемы был использован инструмент веб-разработки *Django* – полнофункциональное решение на Python для быстрого внедрения информационных приложений и их безопасным управлением. Его преимуществом является внедрение операций базовой поддержки веб-страницы, таких как реализация сервера, транзакции баз данных, кэширование, аутентификация и других, в ядро инструмента. Это позволяет разработчику уделять максимальное внимание выполнению тематических задач.

Веб-приложение Django подчиняется единому шаблону проектирования, состоящему из совокупности исполняемых сценариев Python, каждый из которых отвечает за определенную функциональную часть (Vincent, 2021). Запуск и управление веб-сервером происходит через файлы manage.py, settings.py, admin.py,

которые конфигурируют и задают начальные настройки системы (администрирование, кэширование, подключение к базе данных, механизмы шифрования). Собственно работа сервера заключается в последовательной обработке запросов пользователя, когда он выполняет какое-либо действие в приложении. Порядок основных действий после его авторизации в системе выглядит следующим образом.

В начале из базы данных импортируются записи об изображениях пожарной опасности. Совокупность атрибутов каждой записи (путь, дата и другие, подробнее в п. 4.5) составляет *модель данных* (models.py), которая далее организуется в представление изображения (views.py) на странице, видимой пользователю. Представления строго связаны с разметкой страниц, которую обрабатывает браузер согласно заданным на языках HTML/CSS/JavaScript шаблонам. Далее ответ направляется через диспетчера переадресации (urls.py), отвечающего за систему навигации приложения. В конечном счете в браузере формируется веб-страница с результатами геоинформационного моделирования пожарной опасности. Далее эти процессы анализируются с клиентской точки зрения.

Разработка клиента. *Клиентом* выступает часть приложения, которая полностью выполняется на стороне пользователя, а в текущем случае выполняет функцию визуализации пространственных данных. Представление информации на странице определяется ее содержательной составляющей и должно быть удобным для восприятия ее потенциальным потребителем. Оптимальной формой отображения пространственных данных является картографическая: образ традиционной карты в настоящее время перенесен в картографические сервисы, геоинформационные системы, геопорталы.

Исходя из этого для визуализации данных был разработан шаблон тематической страницы, состоящий из следующих элементов: картографическое изображение, таблица содержания (легенда), временная шкала, панели – навигации, пользователя, управления картой (*Рисунок 4.6*).

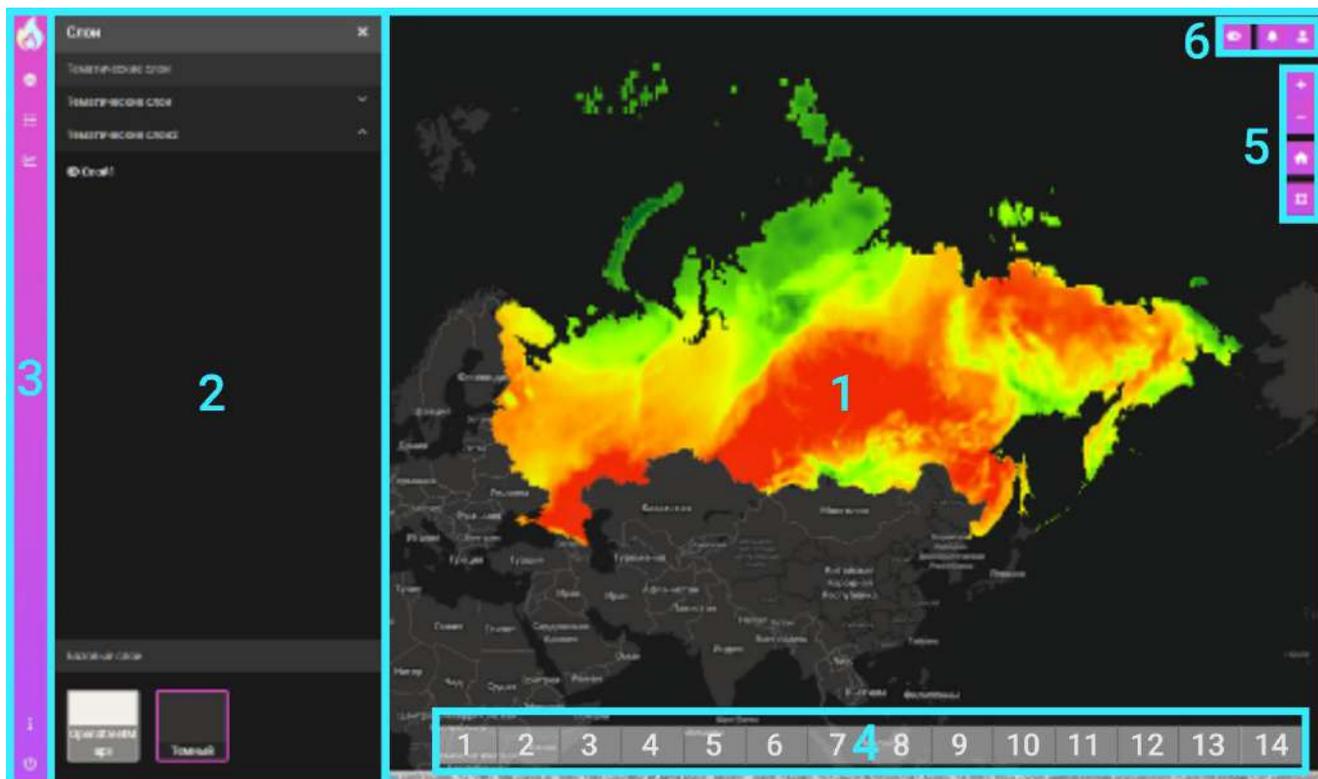


Рисунок 4.6. Элементы основной страницы веб-приложения: 1 – картографическое изображение, 2 – таблица содержания, 3 – панель навигации, 4 – временная шкала, 5 – панель управления картой, 6 – пользовательская панель (схематический вид, более подробно на firepredict.ru)

Картографическое изображение, по аналогии с элементом карты – основная часть страницы, отражающая тематическое содержание. В данном случае показывается распределение пожарной опасности по территории России и дополнительно местоположения действующих возгораний (из продукта MxD14) для сравнения прогнозируемой и текущей ситуации. Его визуализация была произведена на основе связки инструментов работы с пространственными данными в сети Интернет – приложения GeoServer и библиотеки Leaflet (JavaScript).

GeoServer позволяет преобразовывать большие по объему занимаемой памяти растровые изображения (и другие геоинформационные продукты) в набор небольших тайлов (256×256), оптимизированных для загрузки через Интернет. С технической точки зрения, GeoServer выступает в качестве *картографического сервера*. Библиотека Leaflet обеспечивает обратную сборку этих тайлов в единое изображение с сохранением координатной привязки. Кроме того, Leaflet осуществляет визуализацию из любых других тайловых источников. В нашем

случае из внешних источников дополнительно подгружается общегеографическая (или базовая) основа в виде открытой карты OSM, что позволяет визуально сопоставлять наземные объекты с окружающей пожарной опасностью.

Взаимосвязь между картографическим сервером Geoserver и библиотекой визуализации карты Leaflet осуществляется согласно стандартному протоколу WMS (Web Map Service), разработанного в целях веб-картографирования.

Математической основой картографического изображения служит равноугольная проекция Меркатора (код EPSG: 3857) на сфере WGS-84 как референц-поверхности Земли. Ее выбор не является случайным: на сегодняшний день эта проекция является доминирующей при составлении веб-карт. С ее помощью составлены многие глобальные общегеографические карты (Google, Bing), в том числе и OSM. Это обеспечивает, с одной стороны, техническую эквивалентность тематических и базовых тайлов, а с другой – привычный вид веб-карты для пользователей.

Проекция визуализации карты не совпадает с проекцией моделирования пожарной опасности, что обусловлено различиями задач работы с данными и устоявшимися способами их решения. Поэтому в алгоритм подсистемы обработки на конечном этапе добавляется процедура перепроецирования изображения пожарной опасности методом ближайшего соседа. Это неизбежно вызовет искажения, но на текущем масштабном уровне они незначительны, а для пользователя предусмотрена резервная возможность загрузки неперепроецированных результатов моделирования.

Неразрывно связаны и дополняют картографическое изображение:

- *таблица содержания* – элемент, заменяющий легенду классической карты и отражающий перечень слоев (пожарная опасность), интерактивность привносится за счет возможности изменять базовую основу и видимость тематических слоев;
- *временная шкала* обеспечивает интерпретацию явления с точки зрения динамики, цена деления соответствует временному разрешению

моделирования – 1 сутки, с временным охватом прогнозирования на 14 суток;
— *панель управления картой* – набор инструментов для перемещения, и масштабирования картографического изображения; карта является мультимасштабной, поэтому при изменении пространственного уровня изменяется и детальность содержания.

Функционирование этих элементов также реализовано с помощью библиотеки Leaflet и авторской доработки плагинов к ней.

Кроме того, для отображения общей и пользовательской информации к странице добавлены *панель навигации* и *панель пользователя* соответственно. Они дают возможность доступа к информации о системе, лицензировании, атрибутах пользователя, изменения цветовой темы. Авторизация в приложении позволяет, с одной стороны, строго определить безопасность данных, а с другой – привязать целевую информацию к пользователю. Это открывает перспективу для дальнейшей разработки сценариев поддержки принятия решений, например, уведомления о повышенной пожарной опасности в пределах пользовательской области интереса.

Для каждого из рассмотренных элементов определены шаблоны разметки на языке HTML (Hyper Text Markup Language), их внешний вид детализирован стилями CSS (Cascade Style Sheets), а интерактивность обеспечена благодаря программному коду на JavaScript и вставкам скриптов Python.

Таким образом, подсистема визуализации обеспечивает решение геоинформационной задачи распространения данных на основе реализации веб-приложения Django. Используемые технологии обладают широкими возможностями реализации многочисленных сценариев взаимодействия с пользователем, что является преимуществом для будущего развития системы.

4.5 Подсистема хранения данных

Подсистема хранения данных является связующим звеном между всеми остальными подсистемами и определяет надежность системы с точки зрения целостности и доступности данных. Ее организация предполагает создание базы

данных и ее структурирование на двух уровнях – *физическом* и *логическом*, и определяется третьим *концептуальным* или *предметным* уровнем. В нашем случае главное предметное содержание базы составляет продукт геоинформационного моделирования пожарной опасности, а также исходные и промежуточные данные для их получения. Далее рассматривается порядок их хранения на соответствующих уровнях.

Физический уровень определяет хранение информации в виде файлов на физических носителях в составе вычислительных машин. Файлы организуются в иерархическую систему директорий (*Рисунок 4.7а*), которая структурирует файлы по степени их обработки (исходные, промежуточные и выходные) и содержанию (тип продукта, показатели, значения для нейронной сети, ежедневная пожарная опасность). Эта система является строгой: к ней привязана вся автоматизация приема, обработки и визуализации данных.

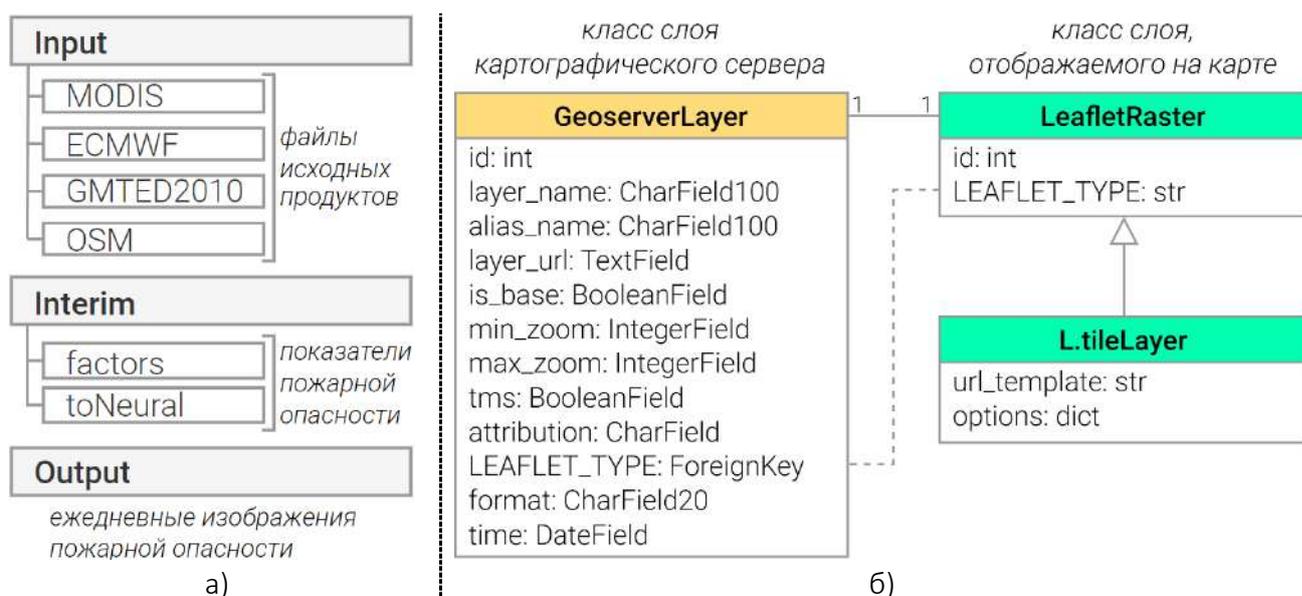


Рисунок 4.7. Аспекты хранения данных: а) структура файловых директорий; б) диаграмма классов слоя на серверной и клиентской сторонах

Первостепенной характеристикой на физическом уровне выступает *объем памяти*, достаточный для организации хранения всех файлов. Он также описывает нагрузку и на другие подсистемы, так как с ростом объема данных, растут вычислительные затраты на манипуляции с ними. Его расчет необходимо проводить с учетом ролей различных данных для геоинформационного

моделирования и, как следствие, времени их хранения.

Исходные файлы, поступающие из подсистемы приема, используются только для вычисления показателей пожарной опасности. Следовательно, они могут быть удалены сразу после того, как в информационном потоке прошли через подсистему обработки. Однако с учетом небольшого запоздания данных в ~1 сутки (промежуток от момента измерения до их загрузки в систему) одновременно должны храниться файлы за 2-3 дня.

Таблица 4.2. Расчет объема памяти для подсистемы хранения

Расчет объема исходных файлов				
MODIS				
Параметр/продукт	MxD35	MxD11	MxD14	MCD12
Максимальный объем фрагмента, МБ	765	21	5	1 283
Количество фрагментов на территорию России	34			
Количество продуктов в день	2*			
Объем скачивания, МБ	52 020	1 428	340	
Итоговый объем, МБ	55 071			
<i>*со спутников Terra и Aqua, обозначаются как MOD и MYD соответственно</i>				
ECMWF				
Объем файла переменной на территорию России, МБ	Количество переменных		Итоговый объем, МБ	
62	27		1 674	
GMTED2010 и OSM				
GMTED2010, МБ			2 070	
OSM, МБ			6 210	
Итого исходных файлов: 65 025 МБ, из них ежедневно загружаются 55 462 МБ, постоянно хранятся 9 563 МБ. С учетом хранения данных за 3 суток – 175 949 МБ.				
Расчет объема промежуточных и выходных файлов				
Показатели	Ежесуточные	Постоянные	Выходные	
Количество	32	14	1	
Временные шаги	30	1	14	
Всего файлов	960+14+14 = 978			
Объем сетки	16521×8715			
Тип значений	FLOAT64			
Объем файлов, МБ	1 073 844			
ИТОГО, МБ	1 249 793			

Промежуточные и выходные данные формируются согласно единой пространственной сетке моделирования. Ее размер составляет 16 521×8 715,

поэтому объем оцениваемых файлов зависит от типа значений, хранящихся в узлах сетки. При расчете в наиболее высокоточном типе (FLOAT64 – 8 байт на узел) объем файла одного показателя на территорию России будет составлять 1 098 МБ. Эта величина рекомендуется в качестве расчетной для определения давности хранения архивных материалов.

Исходя из этих особенностей необходимый объем памяти для единовременного моделирования пожарной опасности и непрерывного функционирования системы составляет 1 249 793 МБ или 1,2 ТБ (Таблица 4.2). При расчетах использовались максимальные размеры файлов, тогда как они могут быть меньше вследствие особенностей форматов и их содержания. Главным образом это касается данных MODIS и формата HDF, размер которого меняется вследствие изменения содержания ежедневной съемки. Значительная оптимизация нагрузки осуществляется благодаря отбору данных: содержательному (исключаются ненужные компоненты продуктов) и пространственному (маскирование по территории). Также существует определенный баланс между подсистемами обработки и хранения: чем выше мощность первой и больше возможностей для операций «на лету», тем меньше файлов необходимо хранить.

Кроме того, на физическом уровне следует упомянуть потенциальный этап *резервного копирования* на независимый носитель, что позволяет в случае потери восстановить данные. В нашем случае этот процесс должен проводиться для основных данных системы – изображений пожарной опасности. Их копирование предполагается дифференциальным способом, то есть копируется только разность между копией и основным архивом, которую составляют новые сформированные файлы. Как следствие, объем необходимой памяти кратно возрастает.

Для хранения всех этих данных и работу с ними в качестве физических носителей информации рекомендуется использовать твердотельные накопители SSD (Solid-State Drive). Они характеризуются более высокими скоростями чтения и записи файлов по сравнению с альтернативными накопителями на жестких магнитных дисках HDD (Hard Disk Drive).

Логический уровень подсистемы хранения предусматривает абстракцию данных для их использования в тематическом плане. Для описания данных моделирования пожарной опасности было разработано два абстрактных класса (*Рисунок 4.76*), которые обеспечивают доступ к файлам как к слоям картографического изображения. Один класс воспроизводит атрибуты файлов для его обработки картографическим сервером GeoServer: путь хранения, наименования и тип слоя, их временная привязка, уровни масштабирования и формат нарезаемых тайлов. Второй класс воссоздает объекты первого класса через тайловые образы библиотеки Leaflet для их отображения на карте.

Эти классы реализованы через СУБД (систему управления базами данных) PostgreSQL, которая позволяет организовывать запросы к базе на основе языка SQL (Structured Query Language). Его преимуществами являются открытый характер использования и возможность реализации неограниченных по объему баз данных (*Viloria et al., 2019*), что обеспечивает перспективу для развития разрабатываемой системы. Эта СУБД интегрируется в веб-приложение Django (входит в исходные возможности этой библиотеки) через файлы конфигурации, что позволяет автоматизировать запросы данных, в том числе обеспечить доступ пользователей к неперепроецированным результатам моделирования пожарной опасности.

Таким образом, подсистема хранения отвечает за размещение данных системы, структурирование и доступ к ним. Ее текущая реализация позволяет оптимальным образом связать между собой остальные подсистемы, обеспечивая как быстрое действие физических вычислений, так и упрощение их использования на основе абстрактных классов и систем управления базами данных.

Выводы по главе 4

1. Разработанная *информационная система мониторинга пожарной опасности природных территорий России* в своей основе содержит методику геоинформационного моделирования этого явления. Она расширяет практическую ценность исследований, потенциально выполняя две сопутствующие задачи –

мониторинга как ежесуточного моделирования пожарной опасности и распространения его результатов среди потенциальных пользователей.

2. Проектирование системы как *совокупности взаимосвязанных между собой функциональных модулей приема, обработки, хранения и визуализации* отражает методическую базу – последовательную реализацию стандартных геоинформационных задач для интеграции пространственных данных в модель пожарной опасности.

3. *Обширный набор технологий*, использованных для создания системы:

- соответствует современным тенденциям информационного обеспечения в отрасли геоинформатики, картографии и дистанционного зондирования;
- позволяет полностью автоматизировать последовательность методики для непрерывного моделирования пожарной опасности;
- обеспечивает связи с внешними элементами системы для сбора исходных пространственных данных и распространения результатов среди потенциальных пользователей;
- обладает перспективным потенциалом содержательного совершенствования без усложнения самой системы, что достигается за счет широких возможностей технологий, а также их собственного регулярного развития.

4. *Открытые лицензии* исходных геоинформационных продуктов и используемого программного обеспечения дают возможность следовать *принципам открытых научных исследований*: их воспроизводимости, независимого тестирования и анализа, свободного использования результатов.

5. Таким образом, информационная система мониторинга потенциально пригодна для *поддержки принятия решений* пользователями, в качестве которых могут выступать как субъекты, непосредственно отвечающие за данную отрасль (МЧС России, Минприроды РФ, Рослесхоз, органы государственной власти и местного самоуправления), так и любые другие лица, заинтересованные в информации о пожарной опасности природных территорий России.

6. Прототип системы опубликован на веб-странице www.firepredict.ru.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы над текущей диссертацией исследованы возможности прогнозирования пожарной опасности в пределах природных территорий России на основе интеграции различных пространственных данных. В рамках теоретических исследований и практических экспериментов *разработана методика геоинформационного моделирования пожарной опасности природных территорий России* в контексте первичного возникновения природных пожаров.

1. На начальных этапах работы проведен обзорный анализ состояния области знаний, в результате чего была подтверждена актуальность работы и получены отправные сведения для дальнейшего исследования:

- природные территории России в контексте пожарной опасности представлены горючими материалами крупнейших в мире геосистем в виде бореальных лесов, степей Евразии и торфяных болот, в пределах которых возникают лесные, степные и торфяные природные пожары;
- пожарная опасность как географическое явление формируется путем совокупного воздействия усиливающих (аккумуляция энергии) и ограничивающих (аккумуляция воды) факторов, действующих в рамках географического ландшафта – 1) *характеристик растительности* как основного горючего материала, 2) *условий погоды и климата*, 3) *свойств поверхности* (геоморфологические, гидрологические, почвенные и отчасти геологические факторы), 4) *антропогенного влияния*.
- существующее методическое и информационное обеспечение моделирования пожарной опасности природных территорий характеризуется преобладанием факторов погоды в интерпретации явления и наземных метеорологических измерений в качестве исходных данных, чего недостаточно для достоверного предупреждения природных пожаров;
- нормативно-правовое регулирование пожарной охраны природных территорий в России при всем многообразии научно-методического потенциала находится в состоянии вынужденного сокращения, что

ограничивает практическое развитие отрасли; недостаточная проработка прогнозной составляющей на официальном уровне подтверждает актуальность работы.

2. В основу информационного обеспечения разработанной методики положены разнородные пространственные данные за 2001-2021 гг. в виде космических снимков MODIS (*исследование растительности*), метеорологической модели ECMWF (*условия погоды*), ЦМР GMTED2010 (*свойства поверхности*), картографических слоев OSM (*антропогенная нагрузка*). Их совокупный набор отражает проявление факторов пожарной опасности для природных территорий всей России.

3. Собственно разработка методики складывается из следующих элементов:

- для описания пожарной опасности был сформирован перечень из 678 исследуемых показателей, из них отобраны 52 значимых показателя, вычисляемых на основе геоинформационных продуктов (*Рисунок 3.15*);
- анализ их взаимосвязи с возникновением природных пожаров показал, что
 - 1) *наиболее определяющими в соотношении факторов являются спектральные характеристики растительности (отражательная способность, индексы) и условия погоды (метеорологические переменные)*, а учет особенностей их пространственно-временного распределения улучшает точность моделирования пожарной опасности;
 - 2) *свойства поверхности и антропогенное влияние*, оцениваемые через постоянные показатели морфометрии рельефа и антропогенной нагрузки, менее значимы, но также влияют на формирования пожарной опасности – *возникновение пожаров связано с определенными классами этих показателей*;
- алгоритмическая составляющая методики была сформирована с использованием нейронной сети с долгой краткосрочной памятью (LSTM) – *ее обучение на основе эталонной выборки в виде однородного ряда случаев возгораний в России за XXI век (обработанных тепловых аномалий MODIS) обеспечивает моделирование пожарной опасности с высокой точностью.*

4. Тестирование (валидация и верификация) методики продемонстрировало ее пригодность для прогнозирования пожарной опасности природных территорий России на национальном и региональном уровнях. Достоверность прогноза с заблаговременностью до 5 суток составляет 70,1%, тогда как значения для сравниваемой методики Нестерова ограничиваются 31,4%. Это позволяет *усовершенствовать классические подходы (Нестерова) и улучшить прогнозный аспект мониторинга природных пожаров в России.*

5. Методика была расширена в виде информационной системы прогнозного мониторинга пожарной опасности территории России на основе открытых современных технологий, обеспечивающих прием, тематическую обработку, хранение и визуализацию пространственных данных. *Она потенциально рекомендуется к использованию для поддержки принятия решений в системах федерального и регионального уровня.*

Таким образом, полученные результаты и выводы исследования направлены на улучшение прогнозирования природных пожаров и снижение последствий от них. Перспективы дальнейшей разработки темы связаны с улучшением точности моделирования пожарной опасности по мере накопления знаний о природных пожарах в России, появления новых источников данных и развития технологий; внедрением и распространением модели в прикладных целях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 *Аброскина А.К., Волокитина А.В., Корец М.А.* Составление карт природной пожарной опасности // Вестник КрасГАУ. — 2012. — №7(70). — С. 60-64.
- 2 *Андреев Ю.А.* Влияние антропогенных и природных факторов на возникновение пожаров в лесах и населенных пунктах: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. — М., 2003. — 45 с.
- 3 *Андреев Ю.А., Ларченко Г.Ф.* Социально-психологические аспекты рекреационных посещений леса и возникновение пожаров // Лесные пожары и борьба с ними. — М.: ВНИИ ПО, 1987. — С. 251-263.
- 4 *Анцышкин С.П.* Противопожарная охрана леса. — М.; Л.: Гослесбумиздат, 1957. — 185 с.
- 5 *Арманд Е.Д.* Наука о ландшафте. — М.: Мысль, 1975. — 286 с.
- 6 *Барановский Н.В.* Математическое обеспечение прогноза степной пожарной опасности // Экологические системы и приборы. — 2007. — №2. — С. 41-45.
- 7 *Барановский Н.В.* Прогноз степной пожарной опасности // Экологические системы и приборы. — 2006. — №11. — С. 42-46.
- 8 *Барталев С.А., Ершов Д.В., Коровин Г.Н., Котельников Р.В., Лупян Е.А., Щетинский В.Е.* Информационная система дистанционного мониторинга лесных пожаров Федерального агентства лесного хозяйства РФ (состояние и перспективы развития) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2008. — №2(5). — С. 419-429.
- 9 *Берлянт А.М.* Интеграция картографического и аэрокосмического методов // Геогр. картография. Взгляд в будущее. — М.: Изд. Моск. ун-та, 1985. — С. 40-52.
- 10 *Берлянт А.М.* Картографический метод исследования. — М.: Изд-во МГУ, 1978. — 255 с.
- 11 *Берлянт А.М.* Картография: Учебник для вузов. — М.: Аспект Пресс, 2002. — 336 с.
- 12 *Бернштейн Ю.Б.* Проекция в картографии // Наука из первых рук. — 2012. — №4(46). — С. 116-123.
- 13 *Бондур В.Г., Воронова О.С., Черепанова Е.В., Цидилина М.Н., Зима А.Л.* Пространственно-временной анализ многолетних природных пожаров и эмиссий вредных газов и аэрозолей в России по космическим данным // Исследование Земли из Космоса. — 2020. — № 4. — С. 3-17.
- 14 *Бритов Г.С.* Верификация, валидация и тестирование компьютерных моделей линейных динамических систем // Информационно-управляющие системы. — 2013. — №2(63). — С. 75-82.
- 15 *Валендик Э. Н., Сухинин А.И., Кисиняков Е.К. [и др.]* Мониторинг лесных пожаров // Исследование лесов аэрокосмическими методами. — 1987. — С. 118-135.
- 16 *Валендик Э.Н., Матвеев П.М., Софронов М.А.* Крупные лесные пожары. — М.: Наука, 1979. — 198 с.
- 17 *Вангенгейм Г. Я.* Метеорологическая обстановка лесных пожаров на Севере в 1936-1937 гг. // Борьба с лесными пожарами авианаземным методом. — М.: Гослестехиздат, 1939.
- 18 *Винокуров В.Н., Удилов Т.В., Александрой В.И.* О математическом моделировании процессов возгорания торфа и динамики торфяного пожара // Современные проблемы науки и образования. — 2015. — № 1-1. — С. 82-89.
- 19 *Вихляев И.И.* Торфяные болота, использование их в технике и сельском хозяйстве. — СПб.: Т-во художественной печати, 1914. — 368 с.
- 20 *Волокитина А.В.* Совершенствование оценки природной пожарной опасности в заповедниках // География и природные ресурсы. — 2017. — №1. — С. 55-61.

- 21 Волокитина А.В., Софронова Т.М., Корец М.А. Региональные шкалы оценки пожарной опасности в лесу: усовершенствованная методика составления // Сибирский лесной журнал. — 2017. — №2. — С. 52-61.
- 22 Волокитина А.В., Софронова Т.М., Корец М.А. Прогнозирование поведения пожаров растительности // Лесной журнал. — 2020. — №1. — С. 9-25.
- 23 Волокитина А.В., Тартаковская Т.М., Шевчук Э.Г., Левкина О.И. Автоматизированное составление пирологических описаний по материалам лесоустройства // Лесные пожары и борьба с ними: сб. науч. тр. / ВНИИЛМ. — Москва, 1988. — С. 44-55.
- 24 Вонский М.В., Жданко В.А. Принципы разработки метеорологических показателей пожарной опасности в лесу. — Л.: ЛенНИИЛХ, 1976. — 48 с.
- 25 Вонский С.М., Жданко В.А., Корбут В.И. Определение природной пожарной опасности в лесу: методические рекомендации. — Л.: ЛенНИИЛХ, 1981. — 52 с.
- 26 Вонский С.М., Жданко В.А., Корбут В.И., Семенов М.М., Тетюшева Л.В., Завгородняя Л.С. Составление и применение местных шкал пожарной опасности в лесу. — Л.: ЛенНИИЛХ, 1975. — 57 с.
- 27 Врублевская В.И., Матусевич В.О., Кузнецова В.В. Гигроскопичность древесины на молекулярном уровне и обоснование СВЧ-излучений для ее сушки // Труды БГТУ. Лесная и деревообрабатывающая промышленность. — 2015. — №2(175). — С. 196-201.
- 28 Галушкин А.И. Нейронные сети: основы теории. — М.: Издательство "Горячая линия-Телеком", 2017. — 496 с.
- 29 Гизатуллин А.Т. Разработка методов использования данных дистанционного зондирования земли для предупреждения природных пожаров // Географический вестник. — 2021. — №1(56). — С. 149-161.
- 30 Гизатуллин А.Т., Алексеенко Н.А., Моисеева Н.А. Разработка алгоритма превентивной оценки пожарной опасности природных территорий по данным дистанционного зондирования // Геодезия и картография. — 2019. — Т. 80. — № 1. — С. 102-109. — DOI: 10.22389/0016-7126-2019-943-1-00-00.
- 31 Гинзбург Б.М., Соколова Г.В. Влияние температуры поверхности океанов и алеутской депрессии на лесопожарную обстановку в районах Дальнего Востока // Метеорология и гидрология. — 2014. — №7. — С. 52-62.
- 32 Глаголев В.А. Восстановление показателей пожарной опасности растительности по условиям погоды // Вестник евразийской науки. — №7(5). — 17 с.
- 33 Глаголев В.А. Оценка и прогноз возникновения пожаров растительности на территории Еврейской автономной области: дисс. ... канд. геогр. наук: 25.00.36. — Биробиджан, 2015. — 147 с.
- 34 Глазов В.М. Основы физической химии. — М.: Высшая школа, 1981. — 456 с.
- 35 Глобальные цифровые модели рельефа. Справочный раздел // Геоматика. — 2014. — №3. — С. 78-82
- 36 Горяев В.М., Бембитов Д.Б., Сумьянова Е.В., Учурова Е.О., Саргинов С.С., Горнаков А.Л., Кукарека С.А. Прогнозирование степных пожаров с использованием данных дистанционного зондирования временных рядов // Современные наукоемкие технологии. — 2020. — №12. — С. 15-19.
- 37 ГОСТ 17.6.1.01-83. Охрана природы. Охрана и защита лесов. Термины и определения (вступ. в силу 01.01.1985) // Охрана природы. Земли: Сб. ГОСТов. — М.: ИПК Издательство стандартов, 2002.
- 38 ГОСТ Р 22.1.09.99. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Мониторинг и прогнозирование лесных пожаров. Общие требования (вступ. в силу 01.01.2001). — М.:

- ИПК Издательство стандартов, 1999.
- 39 ГОСТ Р 53622-2009 Информационные технологии (ИТ). Информационно-вычислительные системы. Стадии и этапы жизненного цикла, виды и комплектность документов // АО «Кодекс». — М.: Стандартинформ, 2019.
 - 40 *Гришин А.М.* Математические модели лесных пожаров. — Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1981. — 288 с.
 - 41 *Гришин А.М.* О математическом моделировании торфяных пожаров // Вестник Государственного Томского университета. — 2008. — №3(4). — С. 85-94.
 - 42 *Губенко И.М., Рубинштейн К.Г.* Сравнительный анализ методов расчета индексов пожарной опасности // Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. — 2012. — №347. — С. 207-222.
 - 43 *Дорошенко А.М.* Влияние геоморфологических характеристик территории Еврейской автономной области на пожароопасность растительности // Региональные проблемы. — 2010. — №13(2). — С. 82-86.
 - 44 *Жуковская В.И.* Увлажнение и высыхание гигроскопических лесных горючих материалов. — Красноярск: ИЛиД, 1970. — С. 105-141.
 - 45 *Зверев И.Н., Смирнов Н.Н.* Газодинамика горения. — М.: Изд-во Моск. ун-та., 1987. — С. 165. — 307 с.
 - 46 Земельный кодекс РФ от 25.10.2001 №136-ФЗ (ред. от 16.02.2022) (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.03.2022) // Собрание законодательства РФ, 29.10.2001, №44, ст. 4147.
 - 47 *Зубарева А.М.* Влияние пирологических свойств почвы и растительности на пожарную опасность территории Еврейской автономной области // Региональные проблемы. — 2016. — №19(4). — С. 84-89.
 - 48 *Зубарева А.М.* Методы оценки пожарной опасности растительных горючих материалов // Региональные проблемы. — 2018. — 21(2). — С. 92-96.
 - 49 *Иванов В.А., Матвеев П.М.* Оценка территории Красноярского края по условиям возникновения лесных пожаров от гроз // Вестник Сиб. гос. технол. ун-та. - 1999. — №2. — С. 3-10.
 - 50 Информационная система дистанционного мониторинга Федерального агентства лесного хозяйства – ИСДМ-Рослесхоз [Электронный ресурс] / ФБУ «Авиалесохрана», 2022. — URL: <https://nffc.aviales.ru/> (дата обращения: 21.04.2022).
 - 51 *Исаева Л.К.* Пожары и окружающая среда. — М.: Изд. дом «Калан», 2001. — 222 с.
 - 52 *Калмыкова О.Г.* Факторы, определяющие разнообразие и особенности растительного покрова Буртинской степи // Степи Северной Евразии. Материалы IV международного симпозиума. — Оренбург, ИПК «Газпромпечат» ООО «Оренбурггазпромсервис», 2006. — С. 333-337.
 - 53 *Катцов В.М., Семенов С.М. [и др.]* Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме — М.: Росгидромет, 2014. — 59 с.
 - 54 *Кац А. Л., Гусев В.Л., Шабунина Т.А.* Методические указания по прогнозированию пожарной опасности в лесах по условиям погоды. — М.: Гидрометеиздат, 1975.
 - 55 *Книжников Ю.Ф., Кравцова В.И., Тутубалина О.В.* Аэрокосмические методы географических исследований: учебник для студ. учреждений высш. проф. образования. — М.: Издательский центр «Академия», 2011. — 416 с.
 - 56 *Ковалев Н.А., Лупян Е.А., Балашов И.В., Барталев С.А., Бурцев М.А., Ершов Д.В., Кривошеев Н.П., Мазуров А.А.* ИСДМ-Рослесхоз: 15 лет эксплуатации и развития // Современные

- проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2020. — №17(7). — С. 283-291.
- 57 *Когаловский М.Р.* Перспективные технологии информационных систем. — М.: ДМК Пресс; Компания АйТи, 2003. — 288 с.
- 58 *Коган Р.М., Глаголев Р.М.* Система пространственного прогноза возникновения пожаров по погодным и лесорастительным условиям // *Безопасность в техносфере.* — 2013. — №5. — С. 11-20.
- 59 *Комраков П.В., Бабурин С.А.* Открытые пожары твердых горючих материалов // *Физико-химические основы развития и тушения пожаров: учеб. пособие / С.А. Бобков, А.В. Бабурин, П.В. Комраков.* — М.: Академия ГПС МЧС России, 2014. — Гл. 4. — С. 43-66.
- 60 *Кондратенко А.В., Симонян А.А., Великанова Л.О.* Влияние информационных технологий на экономический рост и производительность труда // *Информационное общество: современное состояние и перспективы развития.* — 2017. — С. 108-112.
- 61 *Конев Э.В.* Физические основы горения растительных материалов. — Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1977. — 239 с.
- 62 *Коннова Л.А., Львова Ю.В., Руднев Е.В.* О проблемных вопросах природных пожаров в арктической тундре // *Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России».* — 2020. — №2. — С. 1-5.
- 63 *Копенкина Л.В., Гамаюнов С.Н.* Ретроспективный анализ производства торфа в России // *Проблемы и перспективы устойчивого развития торфяного дела в России: материалы Международной научно-практической конференции, Тверь, 17-19 сентября 2018 года.* — Тверь: ООО "Триада", 2018. — С. 65-71.
- 64 *Коровин Г.Н., Самусенко И.Ф., Поломина З.С. [и др.]* Оценка пожарной опасности в лесу и расчет параметров лесных пожаров на ЭВМ: методические указания. — Л.: ЛенНИИЛХ, 1977. — 64 с.
- 65 *Котельников Р.В., Лупян Е.А., Барталев С.А., Ершов Д.В.* Космический мониторинг лесных пожаров: история создания и развития ИСДМ-Рослесхоз // *Лесоведение.* — 2019. — №5. — С. 399-409.
- 66 *Кулик В.Я., Лобанов С.А.* Гидрологический прогноз лесных пожаров и их предотвращение // *Экологический вестник Приморья.* — Владивосток: Маяк, 2002. — №3. — С. 140-142.
- 67 *Курбатский Н.П.* Исследование количества и свойств лесных горючих материалов // *Вопросы лесной пирологии.* — Красноярск: ИЛиД СО АН СССР, 1970. — С. 5-58.
- 68 *Курбатский Н.П.* Пожарная опасность в лесу и ее измерение по местным шкалам // *Лесные пожары и борьба с ними.* — М.: изд-во АН СССР, 1963. — С. 5-30.
- 69 *Курбатский Н.П.* Терминология лесной пирологии // *Вопросы лесной пирологии.* — Красноярск: ИЛиД СО АН СССР, 1972. — С. 171-231.
- 70 *Курбатский Н.П., Доррер Г.А., Дорогов Б.И.* Расчет распределения источников пожара в лесу // *Лесное хозяйство.* — 1978. — №7. — С. 76-78.
- 71 *Курбатский Н.П., Красавина Н.Н., Жданко В.А.* Лесные почвенные пожары и борьба с ними. — Л.: ЛенНИИЛХ, 1957. — 32 с.
- 72 *Левачев Е.В.* Философско-методологические проблемы математизации современной географии // *Диалог культур в эпоху глобальных рисков: материалы Международной научной конференции* — Минск: БГУ, 2016. — С. 606-609.
- 73 *Лесной кодекс РФ от 04.12.2006 №200-ФЗ (ред. от 30.12.2021) (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.03.2022) // Собрание законодательства РФ, 2006, №50, ст. 5278; 2011, № 1, ст. 54.*

- 74 *Лупян Е.А., Барталев С.А., Балашов И.В., Егоров В.А., Еришов Д.В., Кобец Д.А., Сенько К.С., Стыценок 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. — №14(6). — С. 158-175.
- 75 *Лупян Е.А., Барталев С.А., Еришов Д.В., Котельников Р.В., Балашов И.В., Бурыцев М.А., Егоров В.А., Ефремов В.Ю., Жарко В.О., Ковганко К.А., Колбудаев П.А., Крашенинникова Ю.С., Прошин А.А., Мазуров А.А., Уваров И.А., Стыценок Ф.В., Сычугов И.Г., Флитман Е.В., Хвостиков С.А., Шуляк П.П.* Организация работы со спутниковыми данными в информационной системе дистанционного мониторинга лесных пожаров Федерального агентства лесного хозяйства (ИСДМ-Рослесхоз) // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.* — 2015. — №12(5). — С. 222-250.
- 76 *Лупян Е.А., Стыценок Ф.В., Сенько К.С., Балашов И.В., Мазуров А.А.* Оценка площадей пожаров на основе детектирования активного горения с использованием данных шестой коллекции приборов MODIS // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.* — 2021. — №18(4). — С. 178-192.
- 77 *Лурье И.К.* Геоинформационное картографирование. Методы геоинформатики и цифровой обработки космических снимков. — Книжный дом Университет Москва, 2016. — 424 с.
- 78 *Матвеев П.М., Матвеев А.М.* Лесная пирология. — Красноярск: СибГТУ, 2002. — 316 с.
- 79 *Мелехов И.С.* Борьба с лесными пожарами. — М.: Гослестехиздат, 1938. — 68 с.
- 80 *Мелехов И.С.* Лесные пожары и борьба с ними. — Архангельск: Севкрайгиз, 1934. — 46 с.
- 81 *Мелехов И.С.* Природа леса и лесные пожары. — Архангельск, 1947. — 60 с.
- 82 *Мелехов Ф.Н.* О теоретических основах лесной пирологии. — М.: АЛТИ, 1944. — 19 с.
- 83 Национальный атлас России. Том 2. Природа и экология / *И.Г. Авенариус, А.Л. Александровский, В. А. Артамонов [и др.]*. — М.: Роскартография, 2008. — 495 с.
- 84 *Нестеров В.Г.* Горимость леса и методы ее определения. — М.: Гослесбуиздат, 1949. — 76 с.
- 85 *Нестеров В.Г.* Пожарная охрана леса. Лесное пожароведение. — М.: Гослестехиздат, 1945. — 176 с.
- 86 *Нестеров В.Г., Гриценко М.В., Шабунина Т.А.* Использование температуры точки росы при расчете показателя горимости леса // *Гидрология и метеорология.* — 1968. — № 9.
- 87 *Никитин И.В., Гриценко Т.Ю.* Сравнение подходов монолитной архитектуры и микросервисной архитектуры при реализации серверной части веб-приложения // *Дневник науки.* — 2020. — №3. — С. 22.
- 88 *Николаев В.А.* Адаптивная пространственно-временная структура агроландшафта // *Вестник Московского университета. Серия 5. География.* — 1999. — №1. — С. 22-26.
- 89 *Ожогин И.М.* Лесные пожары и борьба с ними // *Труды Костромского науч. об-ва по изучению местного края.* — 1924. — №33.
- 90 *Ожогин И.М.* Связь между влажностью воздуха и лесными пожарами // *Лесное хозяйство.* — 1939. — №8. — С. 20-24.
- 91 *Онуцин А.А., Космынин А.В., Гапаров К.К., Корец М.А.* Моделирование и ГИС как средство восполнения информационного дефицита при лесогидрологических исследованиях // *Сибирский экологический журнал.* — 2003. — №6. — С. 749–754.
- 92 *Павлейчик В.М.* Многолетняя динамика природных пожаров в степных регионах (на примере Оренбургской области) // *Вестник ОГУ.* — 2016. — №6(194). — с. 74-80.
- 93 *Плотникова А.С., Еришов Д.В.* Метод актуализации карт классов природной пожарной

- опасности лесной территории с помощью спутниковых тематических продуктов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2015. — №12(1). — С. 181–189.
- 94 Подольская А.С., Еришов Д.В., Шуляк П.П. Применение метода оценки вероятности возникновения лесных пожаров в ИСДМ-Рослесхоз // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2011. — №1. — С. 118-126.
- 95 Пономарев Е.И., Швецов Е.Г. Характеристики категорий пожаров растительности в Сибири по данным спутниковых и других наблюдений // Исследование Земли из космоса. — 2013. — №5. — С. 45-54.
- 96 Пономарчук А.И., Пьянков С.В. Оценка дискриминирующего влияния пространственных факторов на риски возникновения лесных пожаров // Географический вестник. — 2016. — № 4(39). — С. 118-128.
- 97 Постановление Правительства РФ от 07.10.2020 №1614 «Об утверждении Правил пожарной безопасности в лесах» (вступ. в силу с 01.01.2021) // Собрание законодательства РФ, 2021.
- 98 Постановление Правительства РФ от 11.11.2015 №1219 (ред. от 09.03.2022) "Об утверждении Положения о Министерстве природных ресурсов и экологии Российской Федерации и об изменении и признании утратившими силу некоторых актов Правительства Российской Федерации" // Собрание законодательства РФ, 2022.
- 99 Постановление Правительства РФ от 23.09.2010 N 736 (ред. от 09.03.2022) "О Федеральном агентстве лесного хозяйства" // Собрание законодательства РФ, 2022.
- 100 Постников В.М., Спиридонов С.Б. Методы выбора весовых коэффициентов локальных критериев // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. — 2015. — № 6. — С. 267–287.
- 101 Приказ Федерального агентства Лесного хозяйства РФ от 05.07.2011 №287 "Об утверждении классификации природной пожарной опасности лесов и классификации пожарной опасности в лесах в зависимости от условий погоды" // Российская газета, 24.08.2011. — №186.
- 102 Прошин А.А., Романов-ст. А.А., Романов-мл. А.А., Толпин В.А. Организация оперативной поставки данных спутниковых наблюдения пожаров в систему мониторинга критически важных объектов и ресурсов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2005. — №2(1). — С. 176-181.
- 103 Родин Л.Е. Выжигание растительности как прием улучшения злаково-полюнных пастбищ // Советская ботаника. — 1946. — №3. — С. 147-162.
- 104 Родин Л.Е. Пирогенный фактор и растительность аридной зоны // Ботанический журнал. — 1981. — №66(12). — С. 1673-1684.
- 105 Россия в цифрах. 2021: Крат.стат.сб./Росстат. — М., 2021. — С. 150. — 275 с.
- 106 Руководство по использованию блока открытых данных ИСДМ-Рослесхоз / ФБУ «Авиалесохрана» // Руководство пользователя информационных узлов ИСДМ-Рослесхоз. — Москва, 2019. — 12 с.
- 107 Серапинас Б.Б. Математическая картография: Учебник для вузов. — М.: Издательский центр «Академия», 2005. — 336 с. — С. 249-265.
- 108 Сирин А., Минаева Т., Возбранная А. Как избежать торфяных пожаров? // Наука в России. — 2011. — №2. — С. 13-21.
- 109 СканЭкс: лидер в сфере спутникового мониторинга [Электронный ресурс] / ГК «СканЭкс», 2022. — URL: <https://scanex.ru> (дата обращения: 25.04.2022).
- 110 Скворецкий В.И. О рационализации авиаохраны в Западной Сибири //Лесное хозяйство. — 1955. — №1. — С. 51-53.

- 111 *Солнцев Н.А.* Морфологическая структура географического ландшафта. — М.: МГУ, 1962. — 54 с.
- 112 *Соловьев С.В.* Экологические последствия лесных и торфяных пожаров: Дис.... канд. техн. наук. — М.: Академия ГПС МЧС России, 2006. — 222 с.
- 113 *Софронов М.А.* Лесные пожары в горах южной Сибири. — М.: Наука, 1967. — 148 с.
- 114 *Софронов М.А.* Пирологическая характеристика растительности в верхней части бассейна р. Турухан // Лесные пожары и борьба с ними: сб. науч. тр. — М.: ВНИИЛМ, 1988. — С. 106-117.
- 115 *Софронов М.А., Вакуров А.Д.* Огонь в лесу. — Новосибирск: Наука, 1981. — 124 с.
- 116 *Софронов М.А., Волокитина А.В.* Пирологическое районирование в таёжной зоне. — Новосибирск: Наука, 1990. — 205 с.
- 117 *Софронов М.А., Волокитина А.В.* Типы основных проводников горения при низовых пожарах // Лесной журнал. — 1985. — №5. — С. 12-17.
- 118 *Софронов М.А., Волокитина А.В., Фомина О.А. [и др.]* Методические рекомендации по оценке и прогнозу пожарной опасности на основе карт лесных горючих материалов и метеопрогнозов // Красноярск, 1992. — 47 с.
- 119 *Софронов М.А., Гольдаммер И.Г., Цветков П.А.* Пожарная опасность в природных условиях. — Красноярск: Ин-т леса им. В. Н. Сукачева СО РАН, 2005. — 322 с.
- 120 *Софронов М.А., Софронова Т.М., Волокитина А.В.* Оценка пожарной опасности по условиям погоды с использованием метеопрогнозов // Лесное хозяйство. — 2004. — №6 — С. 31-32.
- 121 *Софронова Т.М., Волокитина А.В., Софронов М.А.* Оценка пожарной опасности по условиям погоды в горных лесах Южного Прибайкалья // География и природные ресурсы. — 2008. — № 2. — С. 74-80.
- 122 *Софронова Т.М., Фельде О.В.* Прототип двуязычного электронного глоссария пирологической терминологии // Вестник Томского государственного университета. — 2011. — №345. — С. 38-43.
- 123 *Сочава В.Б.* Введение в учение о геосистемах // Новосибирск: Наука, 1978. — 318 с.
- 124 *Стародумов А.М.* Шкала пожарной опасности погоды для условий Хабаровского края, Приморья и Амурской области. — Сборник трудов ДальНИИЛХ. — 1964. — №6. — С. 176-185.
- 125 *Сухинин А.И.* Вероятность обнаружения лесных пожаров дистанционными методами // Лесные пожары и борьба с ними: изд. ВНИИПОМлесхоз, Красноярск, 1991.
- 126 *Сухинин А.И., Макрей Д.Дж., Пономарев Е.И.* Геоинформационная система оценки, картирования и прогноза пожароопасного состояния лесов на основе спутникового мониторинга. — Красноярск: Интерэкспо Гео-Сибирь, 2006 — 8 с.
- 127 *Сухинин А.И., Пономарев Е.И.* Картирование и краткосрочное прогнозирование пожарной опасности в лесах Восточной Сибири по спутниковым данным // Сиб. экол. журн. — 2003. — №10(6). — С. 669 – 677.
- 128 *Тишков А.А.* Пожары в степях и саваннах // Вопросы степеведения. — 2003. — №4. — С. 9-22.
- 129 *Удилов В.П.* Кинетические характеристики процессов самовозгорания торфов Сибири и их использование при прогнозе и профилактике пожаров: Дис. канд. техн. наук. — М.: ВИПТШ МВД СССР, 1986. — 211 с.
- 130 Указ Президента РФ от 11.07.2004 №868 (ред. от 30.12.2021) "Вопросы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и

- ликвидации последствий стихийных бедствий" // Собрание законодательства РФ, 2021.
- 131 ФБУ "Авиалесоохрана" разработан предварительный прогноз пожарной опасности в лесах Российской Федерации на март и апрель 2022 года [Электронный ресурс] / ФБУ «Авиалесоохрана», 2022. — URL: <https://aviales.ru/popup.aspx?news=7061> (дата обращения: 21.04.2022).
- 132 Федеральный закон "О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации в части совершенствования деятельности в области пожарной безопасности" от 22.12.2020 N 454-ФЗ (посл. ред.) // Собрание законодательства РФ, 2021.
- 133 Федеральный закон от 10.01.2002 №7-ФЗ (ред. от 26.03.2022) "Об охране окружающей среды" (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.09.2022) // Собрание законодательства РФ, 2022.
- 134 Федеральный закон от 21.12.1994 N 69-ФЗ (ред. от 14.07.2022) "О пожарной безопасности" (с изм. и доп., вступ. в силу с 13.10.2022) // Собрание законодательства РФ, 2022.
- 135 Федеральный закон от 22.06.2008 года №123-ФЗ "Технический регламент о требованиях пожарной безопасности" (с изм. на 30.04.2021 года) // Собрание законодательства РФ, 2022.
- 136 Федеральный закон от 30.12.2009 года №384-ФЗ "Технический регламент о безопасности зданий и сооружений" (с изм. на 02.07.2013 года) // Собрание законодательства РФ, 2014.
- 137 *Фильков А.И.* Определение термокинетических постоянных процесса сушки степных горючих материалов // Теплофизика и аэромеханика. — 2012. — №19(6). — С. 731-738.
- 138 *Фильков А.И.* Физико-математическое моделирование возникновения природных пожаров. — Томск: Издательский Дом Томского государственного университета, 2014. — 276 с.
- 139 *Фуряев В.В.* Пожароустойчивость лесов и методы ее повышения // Прогнозирование лесных пожаров. — 1978. — С. 123-146.
- 140 *Фуряев В.В.* Шкалы пожарной опасности для лесов Забайкалья // Лесные пожары и борьба с ними. — М.: Изд-во АН СССР, 1963. — С. 76-107.
- 141 *Хвостиков С.А., Барталев С.А., Лупян Е.А.* Вероятностное прогнозирование развития природных пожаров методом Монте-Карло на основе интеграции в имитационную модель данных спутникового детектирования очагов горения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2016. — №13(5). — С. 145-156.
- 142 *Храмцов С.П.* Вода для тушения пожаров // Пожаровзрывобезопасность. — 2007. — №16(4). — С. 72-75.
- 143 Хронология лесопожарного зонирования [Электронный ресурс] / Филиал ФБУ ВНИИЛМ «Центр лесной пирологии», 2022. — URL: <https://firescience.ru/event/092019/zonirovanie.html> (дата обращения: 12.04.2022).
- 144 *Цветков П.А.* К вопросу о диагностике лесных пожаров // Современные исследования типологии и пирологии леса. — 1976. — С. 108-114.
- 145 *Цветков П.А., Буряк Л.В.* Исследования природы пожаров в лесах Сибири // Сибирский лесной журнал. — 2014. — №3. — С. 25-42.
- 146 *Шацкий А.Е.* Несколько слов о подземном или торфяном пожаре // Лесоводство и охота. — 1856. — №23. — С. 180.
- 147 *Швецов Е.Г., Сухинин А.И., Пономарев Е.И.* Исследование влияния погодных условий на возникновение пожаров от гроз // Хвойные бореальной зоны. — 2008. — №25(1-2). — С. 47-50.
- 148 *Шешуков М.А.* Пирогенез – важнейший фактор формирования лесов // Горение и пожары в лесу. — Красноярск, 1984. — С. 99–100.
- 149 *Шилин Б.В., Арцыбашев Е.С.* Перспективы использования тепловой аэросъемки для обнаружения лесных пожаров // Лесное хозяйство. — 1969. — №7.

- 150 *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. — №81(4). — С. 19-30.
- 151 *Шнигунова Ю.А., Занина И.А.* Роль человеческого фактора в возникновении лесных пожаров // Фундаментальные и прикладные науки сегодня: Материалы X международной научно-практической конференции, North Charleston, USA, 26–27 декабря 2016 года. — North Charleston, USA: CreateSpace, 2016. — С. 73-76.
- 152 *Шур Ю.З., Неашиатаев В.Ю., Степченко А.А., Шаповал Н.В.* Региональные шкалы оценки природной пожарной опасности лесов // Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства. — 2020. — №2. — С. 59-69.
- 153 *Яковлев А.П.* Пожароопасность сосновых и лиственничных лесов // Лесные пожары в Якутии и их влияние на природу леса. — Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1979. — С. 195-213.
- 154 *Ackerman S.A.* MODIS Atmosphere L2 Cloud Mask Product (35_L2). NASA MODIS Adaptive
- 155 *Anderson K.R., Englefield P., Carr R.* Predicting fire-weather severity using seasonal forecasts // Materials of the 7th Symposium on Fire and Forest Meteorology. — Bar Harbor, ME, 23–25 October 2007. — Am. Meteorol. Soc., Boston, MA, 2007.
- 156 *Ang L.M., Seng K.P.* GPU-Based Embedded Intelligence Architectures and Applications // Electronics. — 2021. — №10(8). — P. 952-958.
- 157 *Barber J.R.* Research and Development for Improved Fire Prevention and Suppression in Rural Victoria // Proceedings of the symposium on dynamics and management of Mediterranean-type ecosystems. — 1977. — P. 490-495.
- 158 *Barnes E.M., Clarke T.R., Richards S.E. [et al.]* Coincident detection of crop water stress, nitrogen status and canopy density using ground-based multispectral data // Proceedings of the Fifth International Conference on Precision Agriculture. — 2000. — 15 p.
- 159 *Bennet J.* OpenStreetMap. — Birmingham: Packt Publishing Ltd, 2010. — 96 p.
- 160 *Blackburn G.A.* Spectral indices for estimating photosynthetic pigment concentrations: a test using senescent tree leaves // International Journal of remote sensing. — 1998. — № 19(4). — P. 657-675.
- 161 *Bourgeau-Chavez L.L., Kasischke E.S., Rutherford M.D.* Evaluation of ERS SAR data for prediction of fire danger in a boreal region // International Journal of Wildland Fire. — 1999. — №9(3). — P. 183–194.
- 162 *Burgan R.E.* 1988 Revisions to the 1978 National Fire-Danger Rating System. — USDA Forest Service, Southeastern Forest Experiment Station, Research Paper SE-273. — Asheville, North Carolina, 1988. — 39 p.
- 163 *Camia A.* Scientific studies on forest fire danger rating and fire behavior prediction in Piedmont // Proceedings of P.A.R.I. Project. — Torino, 1996. — P. 351-360.
- 164 *Camia A., Bovio G., Aguado I., Stach N.* Meteorological fire danger indices and remote sensing // Remote sensing of large wildfires in the European mediterranean Basin. — Springer, 1999. — P. 39-59.
- 165 Canadian Wildland Fire Information System [Электронный ресурс] / Natural Resources Canada. Government of Canada, 2022. — URL: <https://cwfis.cfs.nrcan.gc.ca/> (дата обращения: 15.04.2022).
- 166 *Carabajal C.C., Harding D.J., Boy J.-P., Danielson J.J., Gesch D.B., Suchdeo V.P.* Evaluation of the Global Multi-Resolution Terrain Elevation Data 2010 (GMTED2010) Using ICESat Geodetic Control // International Symposium on Lidar and Radar Mapping: Technologies and Applications. — 2011. — №8286. — P. 532-544.

- 167 *Chatry C.* Éléments de prospective pour l'élaboration d'une politique publique de prévention contre les incendies de forêts dans le cadre de l'adaptation au changement climatique // *Revue forestière française*. — 2011. — P. 403-410.
- 168 *Chuvienco E., Congalton R.G.* Application of remote sensing and geographic information systems to forest fire hazard mapping // *Remote sensing of Environment*. — 1989. — №29(2). — P. 147-159.
- 169 *Chuvienco E., Martin M.P.* Global fire mapping and fire danger estimation using AVHRR images // *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. — 1994. — №60(5). — P. 563-570.
- 170 *Chuvienco E., Salas J.* Mapping the spatial distribution of forest fire danger using GIS // *International journal of geographical information systems*. — 1996. — №10(3). — P. 333-345.
- 171 *Current Titles in Wildland Fire*. — Wildland Fire Research Institute (A 501(C)3 Not-For-Profit Corporation). — August, 2022. — №8. — 109 p.
- 172 *Danielson J., Gesch D.* Global Multi-resolution Terrain Elevation Data 2010 (GMTED2010) // U.S. Department of the Interior U.S. Geological Survey, Open-File Report, 2011. — №1073. — 26 p.
- 173 *Dasgupta S., Qu J., Hao X.* Design of a susceptibility index for fire risk monitoring // *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. — 2006. — №3(1). — P. 140-144.
- 174 *Data Products MODIS* [Электронный ресурс] // NASA, 2022. — URL: <https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct> (дата обращения: 21.05.2022).
- 175 *De Vasconcelos M.P., Silva S., Tome M., Alvim M.* Spatial prediction of fire ignition probabilities: comparing logistic regression and neural networks// *Photogrammetric engineering and remote sensing*. — 2001. — №67(1). — P. 73-81.
- 176 *Deeming J.E.* The National Fire-Danger Rating System – 1978 / *J.E. Deeming, R.E. Burgan, J.D. Cohen*. — USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, General Technical Report INT-39. — Ogden, Utah, 1977. — 63 p.
- 177 *Deeming J.E., Lancaster J.W., Forsberg M.A. [et al.]* The National Fire-Danger Rating System. — USDA Forest Service, Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station, Research Paper RM-84. — Ft. Collins, Colorado, 1972. — Revised 1974. — 165 p.
- 178 *Desbois N., Vidal A.* Real-time monitoring of vegetation flammability using NOAA-AVHRR thermal infrared data // *EARSel Advances in Remote Sensing*. — №4. — P. 25-32.
- 179 *Direct Broadcast MODIS* [Электронный ресурс] // NASA, 2022. — URL: <https://modis.gsfc.nasa.gov/data/directbrod> (дата обращения: 21.05.2022).
- 180 *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. — Melbourne: Centre for Australian Weather and Climate Research, 2009. — 91 p.
- 181 *Drained Peatlands Central Russia and Siberia (Greenpeace) v14102019* / Границы осушенных торфяников [Электронный ресурс] / Greenpeace, CC-BY-SA, 2020. — URL: <https://qms.nextgis.com/geoservices/2070/> (дата обращения: 19.09.2021).
- 182 *Drobyshev I., Niklasson M., Linderholm H.W.* Forest fire activity in Sweden: climatic controls and geographical patterns in 20th century // *Agricultural and Forest Meteorology*. — 2012. — №15(154). — P. 174-186.
- 183 *Eldawy A., Mokbel M.F.* The era of big spatial data // 31st IEEE International Conference on Data Engineering Workshops. — 2015. — P. 42-49.
- 184 *El-Hendawy S., Al-Suhaibani N., Dewir Y.H., Elsayed S., Alotaibi M., Hassan W., Refay Y.* Ability of Modified Spectral Reflectance Indices for Estimating Growth and Photosynthetic Efficiency of Wheat under Saline Field Conditions // *Agronomy*. MDPI. — 2019. — №9(35). — 20 p.

- 185 *Emmanuel R.* Urban vegetational change as an indicator of demographic trends in cities: the case of Detroit // *Environment and Planning B: Planning and Design*. — 1997. — № 24(3). — P. 415-426.
- 186 ERA5: data documentation [Электронный ресурс] // ECMWF, 2022 – URL: <https://confluence.ecmwf.int/display/CKB/ERA5> (дата обращения: 15.06.2022).
- 187 European Forest Fire Information System EFFIS [Электронный ресурс] / European Commission, 2022. — URL: <https://effis.jrc.ec.europa.eu/> (дата обращения: 12.03.2022).
- 188 *Feser F., Rockel B., von Storch H., Winterfeldt J., Zahn M.* Regional climate models add value to global model data: a review and selected examples // *Bulletin of the American Meteorological Society*. — 2011. — №92(9). — P. 1181-1192.
- 189 *Filella I., Penuelas J.* The red edge position and shape as indicators of plant chlorophyll content, biomass and hydric status // *International journal of remote sensing*. — 1994. — № 15(7). — P. 1459-1470.
- 190 *Fiorucci P., D'Andrea M., Negro D. [et al.]* Manuale d'uso del Sistema Previsionale Della Pericolosità Potenziale Degli Incendi Boschivi RIS. I. CO / P. *Fiorucci, M. D'Andrea, D. Negro [et al.]*. — 2011.
- 191 *Fiorucci P., Gaetani F., Minciardi R.* Development and application of a system for dynamic wildfire risk assessment in Italy // *Environmental Modelling & Software*. — 2008. — 23(6). — P. 690-702.
- 192 *Gao B.C.* NDWI—a normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space // *Remote Sensing of Environment*. — 1996. — №58. — P. 257 – 266.
- 193 *Garrard C.* Geoprocessing with Python // Manning Publications, 2016. — 360 p.
- 194 *Giglio L., Schroeder W., Hall J.V., Justice C.O.* MODIS Collection 6 and Collection 6.1 Active Fire Product User's Guide // NASA LDOPE, 2021. — 64 p.
- 195 *Giglio L., Schroeder W., Justice C.O.* The collection 6 MODIS active fire detection algorithm and fire products // *Remote Sensing of Environment*. — 2016. — №178. — P. 31-41.
- 196 *Giglio L., Descloitres J., Justice C.O.* An enhanced contextual fire detection algorithm for MODIS // *Remote Sensing of Environment*. — 2003. — №87(2-3). — P. 273-282.
- 197 *Gitelson A.A., Kaufman Y.J., Stark R., Rundquist D.* Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction // *Remote sensing of Environment*. — 2002. — № 80(1). — P. 76-87.
- 198 *Gizatullin A.T., Alekseenko N.A.* Prediction of Wildfires Based on the Spatio-Temporal Variability of Fire Danger Factors // *Geography, Environment, Sustainability*. — 2022. — №15(2). — C. 31-37.
- 199 *Goldammer J.G.* Regional climate change and forest fires // *Large-area forest fires*. — Warsaw, Forest Research Institute, 2004. — P. 5-8.
- 200 *Hamilton M.P., Salazar L.A., Palmer K.E.* Geographic information systems: providing information for wildland fire planning // *Fire Technology*. — 1989. — №25(1). — P. 5-23.
- 201 *Hendawitharana S., Ariyanayagam A., Mahendran M., Gonzalez F.* LiDAR-based Computational Fluid Dynamics heat transfer models for bushfire conditions // *International Journal of Disaster Risk Reduction*. — 2021. — №66. — P. 102587-102595.
- 202 *Hernandez-Leal P.A., Gonzalez-Calvo A., Arbelo M.* Synergy of GIS and remote sensing data in forest fire danger modeling // *IEEE Journal of selected topics in applied earth observations and remote sensing*. — 2008. — №1(4). — P. 240-247.
- 203 *Hersbach H., Bell B., Berrisford P.* The ERA5 global reanalysis // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. — 2020. — №146(730). — P. 1999-2049.
- 204 *Hersbach H., Dee D.* 2016: ERA5 reanalysis is in production // *ECMWF Newsletter*. — 2016. —

- №147. — P. 7.
- 205 *Hewson T.* Use and Verification of ECMWF products in Member and Co-operating States // ECMWF, 2021. — 35 p.
- 206 *Hirsch S., Kruckeberg R., Madden F.* The bi-spectral forest detection system // Proceedings of the 7th International Symposium on Remote Sensing of Environment. — Ann Arbor Environmental Research Institute of Michigan, 1971. — P. 2253–2259.
- 207 *Hochreiter S., Schmidhuber J.* Long Short-Term Memory // Neural Computation. — 1997. — №9(8). — P. 1735-1780.
- 208 *Hoffhine E.F.* Forest change detection, harvest and cover type distinction using multiple dates of Landsat Thematic Mapper: Master's thesis. — Maine: University of Maine. — 2000. — 120 p.
- 209 *Hoffmann A.A., Schindler L., Goldammer J.G.* Aspects of a fire information system for East Kalimantan, Indonesia // Proceedings of the 3rd international symposium on Asian tropical forest management. — Samarinda, 1999. — P. 20-23.
- 210 *Huete A., Justice C.O., Liu H.* Development of vegetation and soil indices for MODIS-EOS // Remote Sensing of environment. — 1994. — № 49(3). — P. 224-234.
- 211 *Hulley G., Freepartner R., Malakar N., Sarkar S.* MODIS Land Surface Temperature and Emissivity Product (MxD21) User Guide // NASA LDOPE, 2022. — 37 p.
- 212 *Ibrahim M.H., Sayagh M., Hassan A.E.* A study of how Docker Compose is used to compose multi-component systems // Empirical Software Engineering. — 2021. — №26(6). — P. 1-27.
- 213 *Johnson S.J., Stockdale T.N., Ferranti L., Balmaseda M.A., Molteni F., Magnusson L., Tietsche S., Decremmer D., Weisheimer A., Balsamo G., Keeley S.P.E., Mogensen K., Zuo H., Monge-Sanz B.M.* SEAS5: the new ECMWF seasonal forecast system / *S.J. Johnson, T.N. Stockdale, L. Ferranti [et al.]* // Geoscientific Model Development. — 2019. №12(3). — P. 1087-1117.
- 214 *Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., Collins W., Deaven D., Gandin L., Iredell M., Saha S., White G., Wollen J., Zhu Y., Chellian M., Ebisuzaki W., Higgins W., Janowiak J., Mo K.C., Ropelewski C., Wang J., Leetma A., Reynolds R., Jenne R., Joseph D.* The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project // Bulletin of the American meteorological Society. — 1996. — №77(3). — P. 437-472.
- 215 *Kase H.* Ein Vorschlag für eine Methode zur Bestimmung und Vorhersage der Waldbrandgefährdung mit Hilfe komplexer Kennziffern // Akademie Verlag Berlin, 1969 — 68 p.
- 216 *Kaufman Y.J., Tanre D.* Atmospherically resistant vegetation index (ARVI) for EOS-MODIS // IEEE transactions on Geoscience and Remote Sensing. — 1992. — № 30(2). — P. 261-270.
- 217 *Kopecky M., Macek M., Wild J.* Topographic Wetness Index calculation guidelines based on measured soil moisture and plant species composition // Science of The Total Environment. — 2021. — № 757. — P. 143785.
- 218 *Lawson B.D., Armitage O.B.* Weather Guide for the Canadian Forest Fire Danger Rating System // Natural Resources Canada, Canadian Forest Service, Northern Forestry Centre. — Edmonton, 2008. — 84 p.
- 219 *Lawson B.D., Stocks B.J., Alexander M.E., Van Wagner C.E.* A system for predicting fire behavior in Canadian forests // Proc. Eighth Conf. Fire and Forest Meteorology. Soc. Am. For., Bethesda, Md. SAF Publ. — 1985. — №85(4). — P. 6-16.
- 220 *Lean K., Bormann N.* EUMETSAT/ECMWF Fellowship Programme Research Report // ECMWF, 2021. — 2021. — 31 p.
- 221 *Liang H., Lin Y., Yang G., Su Z.* Application of random forest algorithm on the forest fire prediction in Tahe area based on meteorological factors // Scientia Silvae Sinicae. — 2016. — №52(1). — P. 89-98.

- 222 *Liang H., Zhang M., Wang H.* A neural network model for wildfire scale prediction using meteorological factors // *IEEE Access.* — 2019. — №7. — P. 176746-176755.
- 223 *Lindsey R., Herring D.* MODIS Brochure // NASA. — 2005. — 21 p.
- 224 *Lipton Z.C., Berkowitz J., Elkan C.* A critical review of recurrent neural networks for sequence learning // *arXiv preprint arXiv:1506.00019.* — 2015. — 38 p.
- 225 *Lozano F.J., Suarez-Seoane S., de Luis E.* Assessment of several spectral indices derived from multi-temporal Landsat data for fire occurrence probability modeling // *Remote Sensing Environment.* — 2007. — №107. — P. 533–544.
- 226 LP DAAC2Disk Download Manager User Guide / LP DAAC, USGS EROS Center. — 2020. — 8 p.
- 227 *Maeda 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. — №11(4). — P. 265–272.
- 228 *Makela H.M., Venalainen A., Jylha K., Lehtonen I.* Probabilistic projections of climatological forest fire danger in Finland // *Climate Research.* — 2014. — №60(1). — P. 73-85.
- 229 *Maselli F., Rodolfi A., Bottari L., Romanelli S., Conese C.* Classification of Mediterranean vegetation by TM and ancillary data for the evaluation of fire risk // *International Journal of Remote Sensing.* — №21(17). — P. 3303-3313.
- 230 *Maul G.A., Gordon H.R.* On the use of the Earth Resources Technology Satellite (LANDSAT-1) in optical oceanography // *Remote Sensing of Environment.* — 1975. — №4. — P. 95-128.
- 231 *McArthur A.G.* Fire danger rating systems [Mediterranean Countries]. — FAO, Rome (Italy). — Forestry Dept. FAO/UNESCO Technical Consultation on Forest Fires in the Mediterranean Region (in collaboration with IUFRO), Marseille (France). — 1977.
- 232 *McArthur A.G., McArthur M.R.* Fire danger rating tables for annual grasslands. — Forestry and Timber Bureau. — 1960.
- 233 *Minghini M., Frassinelli F.* OpenStreetMap history for intrinsic quality assessment: Is OSM up-to-date? // *Open Geospatial Data, Software and Standards.* — 2019. — №4(1). — P. 1-17.
- 234 *Moderchai H.* How good is volunteered geographical information? A comparative study of OpenStreetMap and Ordnance Survey datasets // *Environment and Planning B: Planning and Design.* — 2010. — №37(4). — P. 682-703.
- 235 MODIS Land C61 Changes [Электронный ресурс] // NASA, 2019. — URL: https://landweb.modaps.eosdis.nasa.gov/QA_WWW/forPage/MODIS_Land_C61_Changes.pdf (дата обращения: 19.02.2022).
- 236 *Möller M., Volk M., Friedrich K., Lymburner L.* Placing soil-genesis and transport processes into a landscape context: a multiscale terrain – analysis approach // *Journal of Plant Nutrition and Soil Science.* — 2008. — №171(3). — P. 419-430.
- 237 *Mooney P., Minghini M.* A review of OpenStreetMap data // *Mapping and the Citizen Sensor.* — 2017. — P. 37-59.
- 238 *Mrozewski T.* Canadian Forest Fire Data // *Bulletin-Association of Canadian Map Libraries and Archives (ACMLA).* — 2018. — №160. — P. 17-19.
- 239 OSM Stats [Электронный ресурс] // OpenStreetMaps, 2022. — URL: https://planet.openstreetmap.org/statistics/data_stats.html (дата обращения: 02.03.2022).
- 240 *Padilla M., Vega-Garcia C.* On the comparative importance of fire danger rating indices and their integration with spatial and temporal variables for predicting daily human-caused fire occurrences in Spain // *International Journal of Wildland Fire.* — 2011. — №20(1). — P. 46-58.
- 241 *Palacio M.J.L., MacFarlane I.* Predicting California Wildfire Risk with Deep Neural Networks //

- CS230: Deep Learning. — Stanford University, CA, 2021. — P. 1-6.
- 242 *Perez C.C.* Determination of biophysical variables using remote sensing techniques. — Lincoln: The University of Nebraska. — 1999. — P. 5647-5647.
- 243 *Prapas I., Kondylatos S., Papoutsis I.* Deep Learning Methods for Daily Wildfire Danger Forecasting, // arXiv preprint arXiv:2111.02736. — 2021. — 6 p.
- 244 *Rabii H.A.* An Investigation of the utility of Landsat-2 MSS data to the fire-danger rating area, and forest fuel analysis within Crater Lake National Park: Ph.D. thesis. — Oregon, 1979. — 435 p.
- 245 *Ren S., Chen X., An S.* Assessing plant senescence reflectance index-retrieved vegetation phenology and its spatiotemporal response to climate change in the Inner Mongolian Grassland // International journal of biometeorology. — 2017. — №61(4). — P. 601-612.
- 246 *Riggs G.A., Hall D.K., Salomonson V.V.* A snow index for the Landsat thematic mapper and moderate resolution imaging spectroradiometer // In Proceedings of IGARSS'94-1994 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. — 1994. — №4. — P. 1942-1944.
- 247 *Romero A., Aquado I., Yebra M.* Estimation of dry matter content in leaves using normalized indexes and PROSPECT model inversion // International Journal of Remote Sensing. — 2012. — №33. — P. 396-414.
- 248 *Rothermel R.C.* How to predict the spread and intensity of forest and range fires. — USDA, Forest Service Inter-Maintain forest and range experiment Station. General technical report INT-143. — Ogden, USA, 1983. — 161 p.
- 249 *Rouse J.W., Haas R.H., Schell J.A., Deering D.W.* Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS // Third ERTS Symposium, NASA SP-351-I. — 1973. — P. 309-317.
- 250 *San-Miguel-Ayanz J., Costa H., de Rigo D.* Basic criteria to assess wildfire risk at the Pan-European level. — European Union, 2018. — 26 p.
- 251 *San-Miguel-Ayanz J., Schulte E., Schmuck G. [et al.]* Comprehensive monitoring of wildfires in Europe: the European Forest Fire Information System (EFFIS) // Assessing Hazards, Emergencies and Disaster Impacts. — InTech, 2012. — P. 87-105.
- 252 *Schueler C.F., Lee T.F., Miller S.D.* VIIRS constant spatial-resolution advantages // International Journal of Remote Sensing. — 2015. — №34(16). — C. 5761-5777.
- 253 *Schunk C., Wastl C., Leuchner M., Menzel A.* Fine fuel moisture for site-and species-specific fire danger assessment in comparison to fire danger indices // Agricultural and Forest Meteorology. — 2017. — №234. — P. 31-47.
- 254 *Selander N.* Using Python to Implement a GIS API. — Comstock: MSUM, 2022. — 21 p.
- 255 *Sterling Va.* NOAA Technical Memorandum NWS T&EL 10. Analysis of Cloud Sensors: A Manual Height Measurement System. — US Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Weather Service. — 1971. — 15 p.
- 256 *Stocks B.J., Lawson B.D., Alexander M.E., Van Wagner C.E., McAlpine R.S., Lynham T.J., Dubé D.E.* The Canadian forest fire danger rating system: an overview // The Forestry Chronicle. — 1989. — №65(6). — P. 450-457.
- 257 *Sudhakar S., Vijayakumar V., Kumar C.S., Priya V., Ravi L., Subramaniaswamy V.* Unmanned Aerial Vehicle (UAV) based Forest Fire Detection and monitoring for reducing false alarms in forest-fires // Computer Communications. — 2020. — №149. — P. 1-16.
- 258 *Sulla-Menashe D., Friedl M.A.* User Guide to Collection 6 MODIS Land Cover (MCD12Q1 and MCD12C1) Product // NASA LDOPE, 2022. — 20 p.
- 259 *Tedim F., Xanthopoulos G., Leone V.* Forest fires in Europe: Facts and challenges // Wildfire hazards, risks and disasters. — 2015. — p. 77-99.
- 260 *Tom G., Rosen P.A., Crippen R.* The Shuttle Radar Topography Mission // NASA. — 2015. —

- 43 p.
- 261 *Unzueta A.F., Sedano F., Illera P.* Fire danger indices derived from NOAA-AVHRR images: a comparison and interpretation using meteorological variables // *Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology*. — 1998. — №3499. — P. 384-395.
 - 262 *User's Guide to EFFIS application / The European Forest Fire Information System*. — Copernicus, 2018. — Version 2.3.2. — 14 p.
 - 263 *Van Wagner C.E., Forest P.* Development and Structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System. — *Forestry Technical Report, Canadian Forestry Service Headquarters, Ottawa, 1987*.
 - 264 *Vermote E.F., Roger J.C., Ray J.P.* MODIS Surface Reflectance User's Guide. Collection 6.1 // NASA LDOPE, 2022. — 37 p.
 - 265 *Viegas D.X., Bovio G., Ferreira A.* Comparative study of various methods of fire danger evaluation in southern Europe // *International Journal of wildland fire*. — 1999. — №9(4). — P. 235-246.
 - 266 *Viloria A., Acuna G.C., Franco D.J., Hernandez-Palma H. Fuentes J.P., Rambal E.P.* Integration of data mining techniques to PostgreSQL database manager system // *Procedia Computer Science*. — 2019. — №155. — P. 575-580.
 - 267 *Vincent W.S.* Django for Beginners: Build websites with Python and Django. — . WelcomeToCode, 2021. — 296 p.
 - 268 *Vlachas P.R., Pathak J., Hunt B.R., Sapsis T.P., Girvan M., Ott E., Koumoutsakos P.* Backpropagation algorithms and reservoir computing in recurrent neural networks for the forecasting of complex spatiotemporal dynamics // *Neural Networks*. — 2020. — №126. — P. 191-217.
 - 269 *Wan Z.* MODIS Land Surface Temperature Products User's Guide. Collection 6.1 // NASA LDOPE, 2019. — 37 p.
 - 270 *Wang L., Raymond E.J.R., Qu J.J.* Remote sensing of fuel moisture content from ratios of narrow-band vegetation water and dry-matter indices // *Remote Sensing Environment*. — 2013. — №129. — P. 103–110.
 - 271 *Wang Y., Anderson K.R., Suddaby R.M.* Updated source code for calculating fire danger indices in the Canadian Forest Fire Weather Index System // *Information Rep. NOR-X-424*. — Canadian Forest Service, Northern Forestry Centre, Natural Resources Canada, 2015. — 26 p.
 - 272 *Waters M.P.* An Application of Geosynchronous Meteorological Satellite Data in Fire Danger Assessment // *General Technical Report RM*. — 1976. — №32. — P. 54-58.
 - 273 *WFAS – Wildland Fire Assessment System [Электронный ресурс] / USFS (United State Fire Service), 2022*. — URL: <https://www.wfas.net/> (дата обращения: 15.04.2022).
 - 274 *WFAS User's Guide [Электронный ресурс] / USFS (United State Fire Service), 2022*. — URL: <https://www.wfas.net/maps/TMJavaResources/wfasHelp.htm> (дата обращения: 16.04.2022).
 - 275 *Wiki OSM [Электронный ресурс] // OpenStreetMaps, 2022* — URL: <https://wiki.openstreetmap.org/wiki> (дата обращения: 02.02.2022).
 - 276 *WildfireSAFE [Электронный ресурс] / USFS (United State Fire Service), 2022*. — URL: <https://wildfiresafe.fs.usda.gov/pro> (дата обращения: 16.04.2022).
 - 277 *Williams D.E.* Future application of meteorology in fire control // *The Forestry Chronicle*. — 1967. — №43(1). — P. 89-92.
 - 278 *WMO Lead Centre for Deterministic Forecast Verification (WMO-LCDNV) [Электронный ресурс] // ECMWF, 2022* – URL: <https://apps.ecmwf.int/wmolcdnv> (дата обращения: 15.05.2022).
 - 279 *Woolford D.G., Martell D.L., McFayden C.B., Evens J., Stacey A., Wotton B.M., Boychuk D.* The

- development and implementation of a human-caused wildland fire occurrence prediction system for the province of Ontario, Canada // *Canadian Journal of Forest Research*. — 2021. — №51(2). — P. 303-325.
- 280 *Yates H.W., Tarpley H.W., Schneider S.R.* The role of meteorological satellites in agricultural remote sensing // *Remote sensing of environment*. — 1984. — № 14(1-3). — P. 219-233.
- 281 *Yool S.R., Eckhardt D.W., Estes J.E., Cosentino M.J.* Describing the brushfire hazard in Southern California // *Annals of the American Association of Geographers*. — 1985. — №75(3). — P. 417-430.
- 282 *Yu B., Chen F., Li B., Li W., Mungquan W.* Fire Risk Prediction Using Remote Sensed Products: A Case of Cambodia // *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. — 2017. — №83(1). — P. 19-25.
- 283 *Zarco-Tejada P.J., Ustin S.L.* Modeling canopy water content for carbon estimates from MODIS data at land EOS validation sites // *International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. — 2001. — №1. — P. 342-344.
- 284 *Zevenbergen L.W., Thorne C.R.* Quantitative analysis of land surface topography // *Earth surface processes and landforms*. — 1987. — № 12(1). — P. 47-56.
- 285 *Zhang H., Wei J., Yang Q., Baartman J.E.M., Gai L., Yang X., Li S., Yu J., Ritsema C.J., Geissen V.* An improved method for calculating slope length (λ) and the LS parameters of the Revised Universal Soil Loss Equation for large watersheds // *Geoderma*. — 2017. — № 308. — P. 36-45.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1. ОБЗОРНАЯ ТАБЛИЦА ОЦЕНОЧНЫХ И ПРОГНОЗНЫХ МЕТОДИК МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ

№	Методика	Показатели пожарной опасности	Источники данных	Территория применения
Национальные методики				
1	российская (Нестеров, 1949; 1968)	<ul style="list-style-type: none"> — температура воздуха; — температура точки росы; — суточное количество осадков; 	наземные метеорологические измерения	Россия (СССР)
2	российская (Вонский, Жданко, 1976)	<ul style="list-style-type: none"> — температура воздуха; — температура точки росы; — дата схода снежного покрова; — суточное количество осадков; 		
3	российская (Софронов, 1992)	<ul style="list-style-type: none"> — температура воздуха; — температура точки росы; — суточное количество осадков; — суточная продолжительность осадков; 		Россия, районы Сибири
4	канадская (Lawson, Armitage, 2008)	<ul style="list-style-type: none"> — температура воздуха; — относительная влажность воздуха; — скорость ветра; — суточное количество осадков; — световая продолжительность дня; — FFMC (Fine Fuel Moisture Code) – влагосодержание тонких ГМ; — DMC (Duff Moisture Code) – влагосодержание массивных ГМ; — DC (Drought Code) – засушливость ГМ; — ISI (Initial Spread Code) – интенсивность воспламенения; — BUI (Buildup Index) – запас ГМ для потенциального возгорания; — FWI (Fire Weather Index) – пожарная опасность по условиям погоды; 	наземные метеорологические измерения	Канада

5	американская (<i>Deeming et al., 1977;</i> <i>Burgan, 1988</i>)	<ul style="list-style-type: none"> — тип горючего материала, тип растительности; — уклон; — тип климата; — относительная влажность воздуха; — температура воздуха (текущая, максимальная, минимальная); — скорость ветра; — влагосодержание растительности; — суточное количество осадков; — вегетационный индекс NDVI; — временной лаг (время высыхания материала); — KBDI (Keetch-Byram Drought Index) – показатель засушливости; — IC (Ignition Component) – потенциал возгорания; — SC (Spread Component) – скорость возгорания (по скорости ветра, уклону рельефа и влагосодержанию мертвых остатков); — ERC (Energy Release Component) – интенсивность возгорания, энергоемкость на единицу площади (Вт/км²); — OI (Occurrence Index) – реальная вероятность возгорания с учетом наличия источников зажигания; — BI (Burning Index) – оценка усилий для тушения пожара; — FLI (Fire Load Index) – оценка усилий необходимых для ликвидации возгораний на территории за период времени; 	наземные и спутниковые метеорологические измерения, геоморфологические и геоботанические описания участка	США
6	австралийская (<i>McArthur, 1960</i>)	<ul style="list-style-type: none"> — влагосодержание ГМ; — минимальная суточная относительная влажность воздуха; — максимальная суточная температура; — среднесуточная скорость ветра; — KBDI – индекс засухи Китча-Байрама; — число дней после выпадения осадков; — индекс МакАртура пожарной опасности; 	наземные метеорологические измерения	Австралия
7	итальянская	— суточные количество осадков, температура и влажность воздуха, скорость ветра и длительность солнечного сияния (<i>Camia, 1996</i>);	метеорологические измерения,	Италия

		<ul style="list-style-type: none"> — плотность населения, близость дорог, типы земель, высота, уклон, экспозиция (<i>Maselli et al., 2000</i>); — индекс МакАртура, индекс FWI (<i>Fiorucci et al., 2008; 2011</i>); 	картографические и архивные статистические материалы	
8	греческая (<i>Stergiopoulos et al., 2007</i>)	<ul style="list-style-type: none"> — тип растительности; — температура и влажность воздуха, скорость ветра; — статистическая плотность возгораний; 		Греция
9	испанская (<i>Padilla, Vega-Carcia, 2011</i>)	<ul style="list-style-type: none"> — температура и влажность воздуха; — типовое влагосодержание материалов; — поправка на экспозицию и уклон; — условия поступления солнечной радиации (расположение, интенсивность, длительность); — скорость и направление ветра; 	метеорологические измерения, цифровая модель рельефа	Испания
10	португальская (<i>Viegas et al., 1999</i>)	<ul style="list-style-type: none"> — комплексный показатель Нестерова; — суточное количество осадков; — скорость и направление ветра 	наземные и спутниковые метеорологические измерения	Португалия
11	французская (<i>Chatry, 2011</i>)	<ul style="list-style-type: none"> — водный баланс почвы; — количество осадков, температура воздуха, скорость и направление ветра, интенсивность солнечной радиации, облачность; — тип растительности; 	картографические материалы, метеорологические измерения	Франция
12	немецкая	<ul style="list-style-type: none"> — индекс Баумгартнера: кумулятивный баланс за последние 5 дней между приходящими осадками и суммарным испарением (<i>Goldammer, 2004</i>); — модифицированный индекс Нестерова (лесопожарный индекс Кенна: температура воздуха, дефицит насыщения воздуха, количество осадков, глубина снежного покрова, параметры ветра, фенологические состояния растительности (<i>Kase, 1969</i>); 	метеорологические измерения, геоботанические описания	Германия
13	норвежская (<i>Schunk et al., 2017</i>)	<ul style="list-style-type: none"> — индекс Кенна; — сезонный запас растительных ГМ; — доли постоянного снежного и ледового покрытия; 	метеорологические измерения	Норвегия
14	шведская	<ul style="list-style-type: none"> — индекс Кенна; 		Швеция

	<i>(Drobyshev et al., 2012)</i>	<ul style="list-style-type: none"> — индекс FWI; — индекс влагосодержания почвенной подстилки: дождевой сток; 		
15	финская <i>(Makela et al., 2014)</i>	<ul style="list-style-type: none"> — температура и влажность воздуха; — количество осадков за последние двое суток; — облачность и атмосферное давление; — скорость и направление ветра; — влагосодержание ГМ; — частота возгораний; 	метеорологические измерения, геоботанические описания	Финляндия
Прочие методики. Этап 1. Появление новых источников данных (1960-1980)				
16	Использование авиасъемки <i>(Hirsch et al., 1971)</i>	— интенсивность спектрального излучения в среднем и тепловом инфракрасном диапазоне;	снимки со спектральных съемочных систем на авианосителях	локальные районы США
17	Корреляции спутниковых метеоданных с наземными <i>(NFDRS72, Waters, 1976)</i>	<ul style="list-style-type: none"> — облачный покров; — температура воздуха на разных барических уровнях; — интенсивность и продолжительность солнечной радиации; — типы растительности с 1-часовым временным лагом 	наземные метеорологические измерения, данные ДЗЗ NOAA 1-5	США
18	Дешифрирования по данным Landsat 1,2 <i>(Barber, 1977; Rabii, 1979)</i>	<ul style="list-style-type: none"> — тип растительности (визуально дешифрируемый); — плотность и высота жизненных форм растительности; — влагосодержание ГМ; 	космические снимки Landsat 1, 2	отдельные районы Северной Америки
Прочие методики. Этап 2. Развитие методов и технологий обработки данных (1980-2000)				
19	Геоинформационная комбинация факторов <i>(Yool et al., 1985; Hamilton et al., 1989; Chuvieco, Congalton, 1989)</i>	<ul style="list-style-type: none"> — тип растительности; — высота, уклон, экспозиция рельефа; — близость к дорогам и населенным пунктам; — температура и влажность воздуха; — суточное количество осадков; 	космические снимки, ЦМР, метеорологические измерения, статистические данные	территории США и Европы

20	Применение спектральных индексов (<i>Camia et al., 1999</i>)	<ul style="list-style-type: none"> — индекс NDVI; — коэффициент корреляции NDVI с DC из CFFDRS (-0,71); — коэффициент корреляции NDVI с KBDI из NFDRS (-0,87); 	космические снимки, метеорологические измерения	Калифорния, США
21	Спутниковая адаптация методики Нестерова <i>Сухинин и др., 2006</i>)	<ul style="list-style-type: none"> — альbedo спектрального отражения в каналах AVHRR; — суточное количество осадков; — радиационная температура поверхности; — температура точки росы; 	данные ДЗЗ AVHRR (NOAA)	леса Сибири, Россия
22	Оценка пожарной опасности по радиолокационным данным (<i>Hoffman et al., 2000</i>)	<ul style="list-style-type: none"> — тип растительности (дешифрируемый по радиолокационным данным); — содержание влаги в приповерхностном слое почвы; — количество дней от последних жидких осадков; 	радиолокационные снимки со спутников ERS 1, 2, дополнительно карты типов земель, метеоданные	Восточный Калимантан
23	Комбинация метео- и радиолокационных данных (<i>Bourgeau-Chavez et al., 1999</i>)	<ul style="list-style-type: none"> — показатели CFFDRS – DC, DMC, FWI; — обратное рассеяние радиоволн (ERS-1) 	радиолокационные снимки (ERS-1), метеорологические измерения	бореальные леса Канады
Прочие методики. Этап 3. Обработка больших пространственных данных (2000-настоящее время)				
24	Использование данных БПЛА (<i>Sudhakar et al., 2020</i>)	<ul style="list-style-type: none"> — интенсивность спектрального излучения в видимых и инфракрасных каналах, отражающая состояние ГМ; 	снимки с беспилотных летательных аппаратов	локальные участки по всему миру
25	Применение лазерной съемки (<i>Hendawitharana et al., 2021</i>)	<ul style="list-style-type: none"> — расстояние до объектов как основа пространственной структуры ГМ; — тип растительности; 	данные с лидаров	
26	Физическое моделирование возгорания	<ul style="list-style-type: none"> — индекс пожарной уязвимости FSI (Fire Susceptibility Index, <i>Dasgupta et al., 2006</i>); — энергия воспламенения ГМ; — температура и влагосодержание объекта на основе тепловых каналов; 	космические снимки MODIS, натурные инструментальные измерения физических величин	локальные участки США и России

		<ul style="list-style-type: none"> — энергия, необходимая на испарение текущего количества влаги; — количество запасов ГМ (Фильков, 2014); 		
27	Вероятностное моделирование пожарной опасности (Подольская и др., 2011)	<ul style="list-style-type: none"> — число дней с антропогенной нагрузкой; — число дней с грозовой активностью; — число пожаров по вине человека; — число пожаров из-за гроз; — длительность пожароопасного сезона; 	архивные статистические материалы о пожарах и их причинах	регионы России
28	Нейросетевой поиск вероятностных образов возгораний (De Vasconcelos et al., 2001)	<ul style="list-style-type: none"> — положение в рельефе (высота, уклон, экспозиция); — тип использования земель; — близость объектов антропогенной инфраструктуры; 	ЦМР, картографические материалы	леса Португалии
29	Нейросетевая оценка вероятности возгорания (Maeda et al., 2009)	<ul style="list-style-type: none"> — спектральный индекс NDVI; 	космические снимки MODIS	амазонские леса Бразилии
30	Нейросетевое моделирование пожарной опасности (Yu et al., 2017)	<ul style="list-style-type: none"> — спектральные вегетационные индексы; — интенсивность обратного рассеяния радиоволн; — переменные погоды; 	метеорологические измерения, радиолокационные снимки	муссонные леса Камбоджи
31	Нейросетевое дешифрирование ГМ (Palacio, MacFarlane, 2021)	<ul style="list-style-type: none"> — сезонные статистические показатели спектральной отражательной способности; — спектральные вегетационные индексы; 	снимки Landsat 7, 8	Калифорния, США
32	Интегрирования параметров ландшафта в пожарную опасность (Prapas et al., 2021)	<ul style="list-style-type: none"> — переменные погоды; — спектральная отражательная способность; — близость к дорогам, населенным пунктам, туристическим зонам; — положение в рельефе (высота, уклон, экспозиция в рельефе) 	метеорологические измерения, снимки MODIS, слои карты OSM, ЦМР EU-DEM	локальные участки в Западной Европе

ПРИЛОЖЕНИЕ 2. БАЗОВЫЙ СЦЕНАРИЙ РЕАЛИЗАЦИИ НЕЙРОННОЙ СЕТИ С ДОЛГОЙ КРАТКОСРОЧНОЙ ПАМЯТЬЮ (LSTM) НА ЯЗЫКЕ PYTHON

```
## Импорт библиотек
import numpy as np
from tensorflow import keras
from tensorflow.keras import layers

## Инициирование начальных параметров
BATCH_SIZE = 256
BUFFER_SIZE = 10000

## Загрузка данных обучающего набора
(x_train, y_train), (x_val, y_val) = np.load (r"Путь/к/обучающему/набору")
x_train = keras.preprocessing.sequence.pad_sequences(x_train)
x_val = keras.preprocessing.sequence.pad_sequences(x_val)
NUM_FEATURES = x_train.shape[0]

## Построение модели на основе библиотеки keras
# Входной слой из 52 показателей
inputs = keras.Input(shape=(None,52), dtype="float64")
# Преобразуем входной слой в плотный вектор
inputs_vector = layers.Embedding(NUM_FEATURES, 52)(inputs_vector)
# Добавляем 1 LSTM-слой с длиной последовательности 30 + 14
hidden = layers.LSTM(44, return_sequences=True)(hidden)
# Выходной слой из 1 показателя ВПВ
outputs = layers.Dense(1, activation="sigmoid")(hidden)
# Формируем образ нейронной сети
model = keras.Model(inputs, outputs)

## Обучение модели
model.compile(optimizer="adam", loss="binary_crossentropy",
metrics=["accuracy"])
model.fit(x_train, y_train, batch_size=BATCH_SIZE, epochs=37, validation_data
=(x_val, y_val))
```

ПРИЛОЖЕНИЕ 3. СВЯЗЬ КЛАССОВ ПОСТОЯННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ СО СЛУЧАЯМИ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ВОЗГОРАНИЙ НА ТЕРРИТОРИИ РФ ЗА 2001-2020 ГГ.

Приводится распределение постоянных показателей пожарной опасности по территории России, вычисляемых на основе цифровой модели рельефа GMTED2010, картографических слоев OSM, космических снимков MODIS и их пространственно-временной привязки. Для классов этих показателей рассчитывается статистическая частота возгораний на основе набора данных, содержащего точки возникновения природных пожаров за 2001-2020 гг.

П3.1 Абсолютная высота

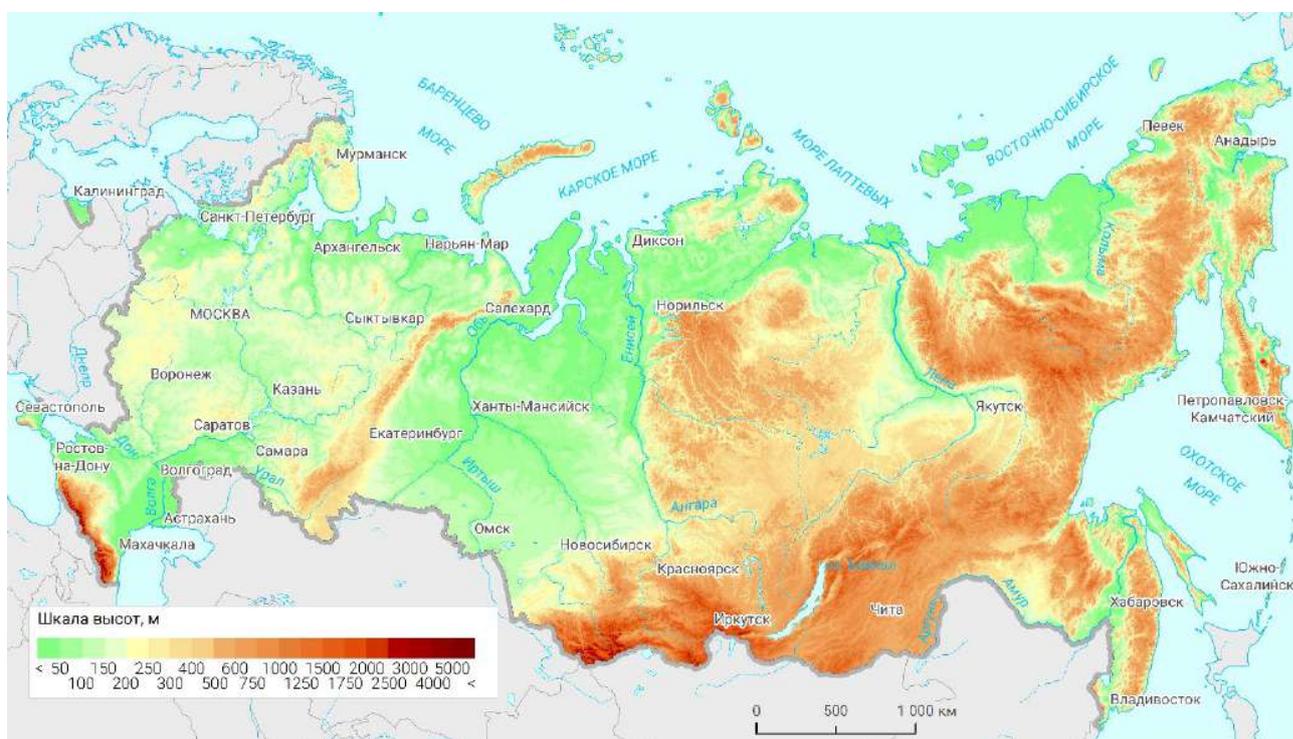


Рисунок П3.1. Распределение абсолютных высот по территории России составлено автором на основе ЦМР GMTED2010

Таблица П3.1. Статистическая частота возгораний по классам абсолютных высот

Классы абсолютных высот, м	Статистическая частота возгораний, %
менее 50	0,71
50...100	3,43
100...150	10,85
150...200	13,78
200...250	14,80
250...300	16,01

Классы абсолютных высот, м	Статистическая частота возгораний, %
300...400	10,72
400...500	15,99
500...600	4,98
600...750	5,07
750...1000	2,37
1000...1250	1,05
1250...1500	0,14
1500...1750	0,01
1750...2000	0,02
более 2000	0,06

П3.2 Уклон поверхности



Рисунок П3.2. Распределение уклонов поверхности по территории России составлено автором на основе ЦМР GMTED2010

Таблица П3.1. Статистическая частота возгораний по классам уклона

Классы уклона, °	Статистическая частота возгораний, %
менее 1	40,37
1...2	39,11
2...3	12,22
3...5	3,59
5...10	3,01
10...35	1,54
более 35	0,16

П3.3 Экспозиция поверхности



Рисунок П3.3. Распределение экспозиций поверхности по территории России составлено автором на основе ЦМР GMTED2010

Таблица П3.3. Статистическая частота возгораний по классам экспозиции

Классы экспозиции	Значения, °	Статистическая частота возгораний, %
плоские поверхности	-	0,01
северная	337,5...22,5	11,04
северо-восточная	22,5...67,5	10,77
восточная	67,5...112,5	11,82
юго-восточная,	112,5...157,5	7,39
южная	157,5...202,5	21,07
юго-западная	202,5...247,5	20,41
западная	247,5...292,5	10,66
северо-западная	292,5...337,5	6,85

ПЗ.4 Горизонтальная кривизна поверхности

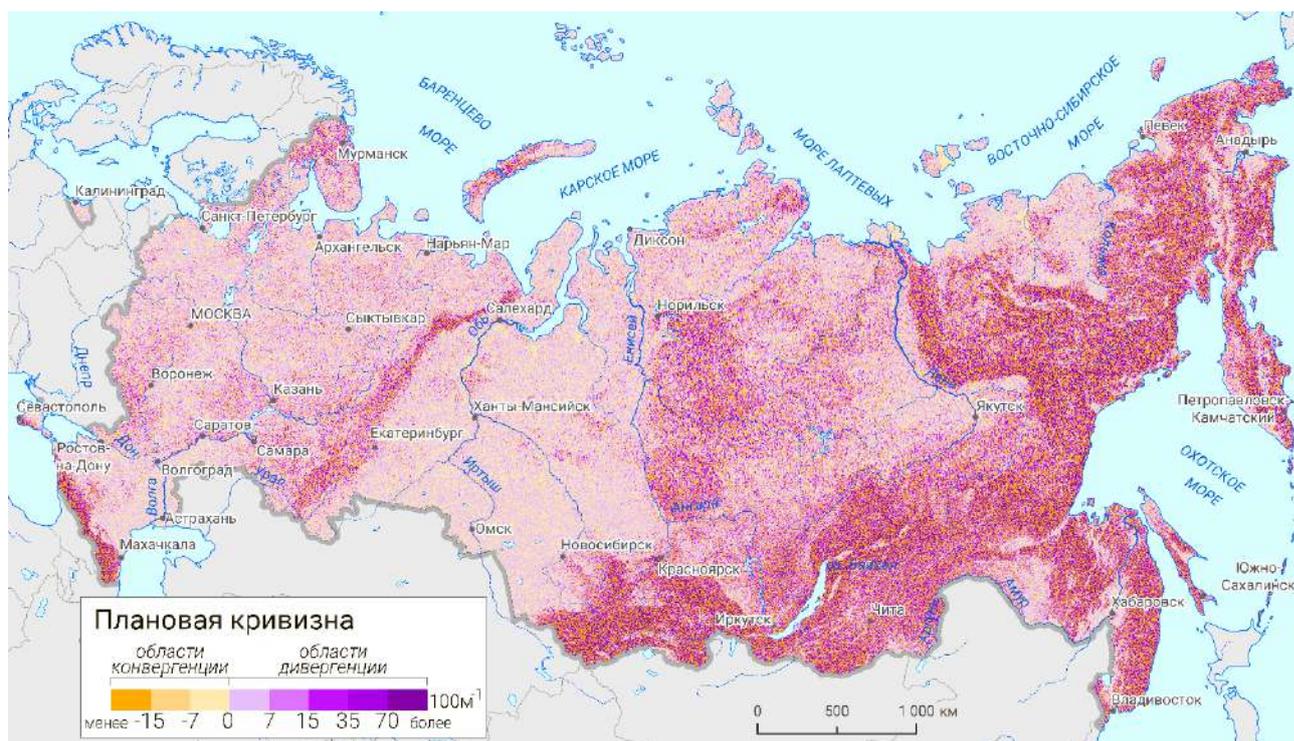


Рисунок ПЗ.4. Распределение горизонтальной (плановой) кривизны поверхности территории России
составлено автором на основе ЦМР GMTED2010

Таблица ПЗ.4. Статистическая частота возгораний по классам плановой кривизны

Классы плановой кривизны, 1/100 м	Статистическая частота возгораний, %
менее -15	0,05
-15...-7	7,56
-7...0	8,08
0...7	31,79
7...15	33,14
15...35	9,26
35...70	6,15
более 70	3,98

П3.5 Вертикальная кривизна поверхности



Рисунок П3.5. Распределение вертикальной кривизны поверхности территории России составлено автором на основе ЦМР GMTED2010

Таблица П3.5. Статистическая частота возгораний по классам вертикальной кривизны

Классы вертикальной кривизны, 1/100 м	Статистическая частота возгораний, %
менее -30	5,80
-30...-15	6,96
-15...-5	14,00
-5...0	21,51
0...5	22,43
5...20	18,61
20...50	7,41
более 50	3,28

П3.6 Общая кривизна поверхности



Рисунок П3.6. Распределение общей кривизны поверхности территории России составлено автором на основе ЦМР GMTED2010

Таблица П3.6. Статистическая частота возгораний по классам общей кривизны

Классы общей кривизны, 1/100 м	Статистическая частота возгораний, %
менее -50	5,27
-50...-25	7,24
-25...-10	13,48
-10...-5	8,76
-5...0	16,00
0...5	15,09
5...10	8,50
10...25	12,67
25...50	7,20
более 50	5,79

П3.7 Расчлененность поверхности TRI

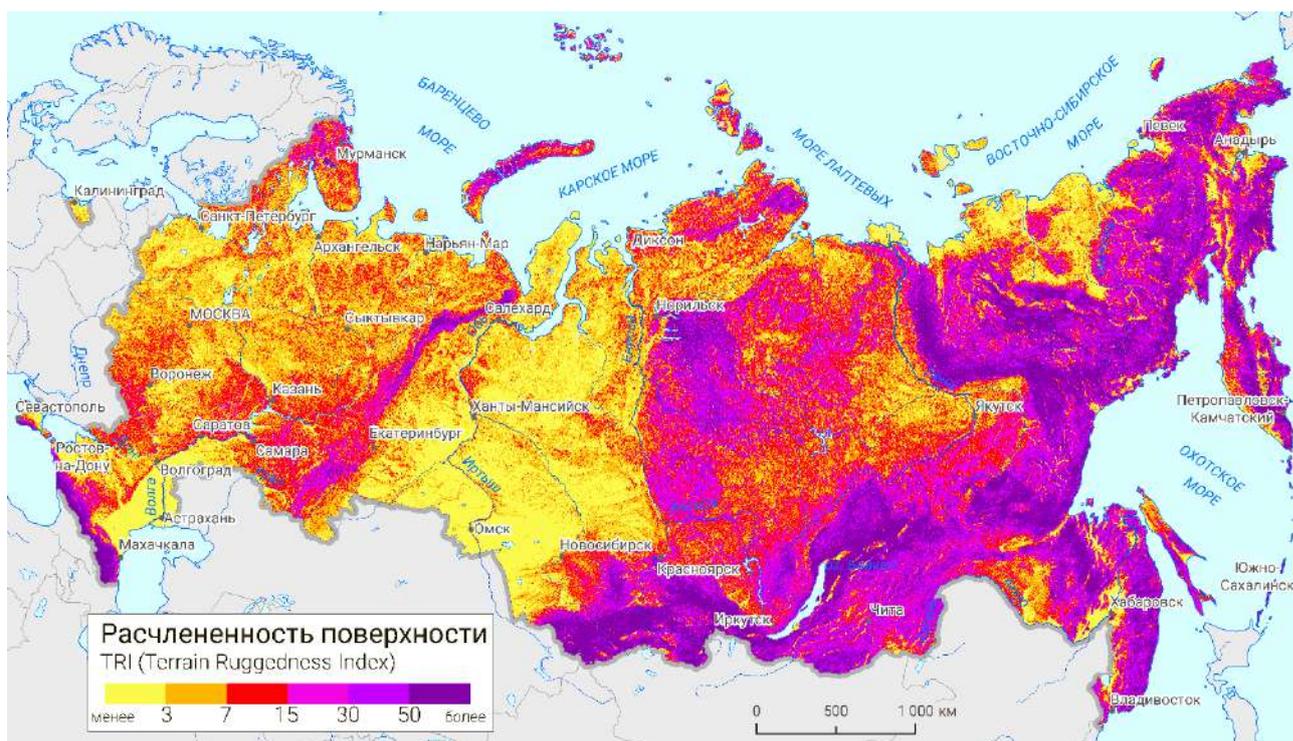


Рисунок П3.7. Распределение индекса TRI по территории России
составлено автором на основе ЦМР GMTED2010

Таблица П3.7. Статистическая частота возгораний по классам расчлененности TRI

Классы расчлененности, TRI	Статистическая частота возгораний, %
0...3	25,71
3...7	28,49
7...15	26,02
15...30	11,60
30...50	4,42
более 50	3,77

П3.8 Индекс LS



Рисунок П3.8. Распределение индекса LS по территории России
составлено автором на основе ЦМР GMTED2010

Таблица П3.8. Статистическая частота возгораний по классам индекса LS

Классы индекса LS	Статистическая частота возгораний, %
0...0,1	19,09
0,1...0,5	34,80
0,5...1	23,02
1...2	21,80
более 2	1,28

П3.9 Индекс влажности рельефа TWI



Рисунок П3.9. Распределение индекса TWI по территории России
составлено автором на основе ЦМР GMTED2010

Таблица П3.9. Статистическая частота возгораний по классам индекса TWI

Классы индекса TWI	Статистическая частота возгораний, %
менее -5	7,27
-5...-2	39,12
-2...-1	19,00
-1...0	19,63
0...1	3,85
1...2	1,84
2...5	6,50
более 5	2,79

ПЗ.10 Индекс баланса массы МВІ

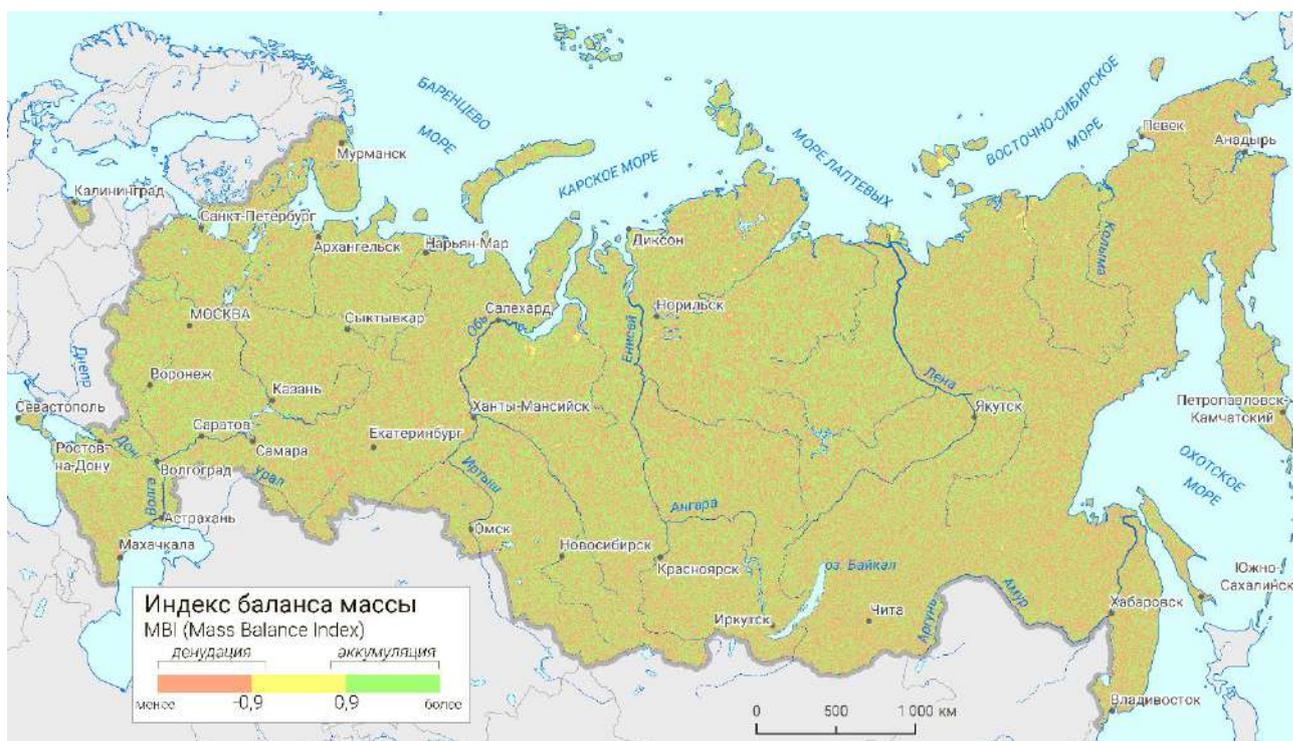


Рисунок ПЗ.10. Распределение индекса МВІ по территории России составлено автором на основе ЦМР GMTED2010

Таблица ПЗ.10. Статистическая частота возгораний по классам индекса МВІ

Классы индекса МВІ	Статистическая частота возгораний, %
менее -0,9 (до -1)	50,63
-0,9...0,9	0,09
более 0,9 (до +1)	49,27

ПЗ.11 Взвешенные расстояния до населенных пунктов

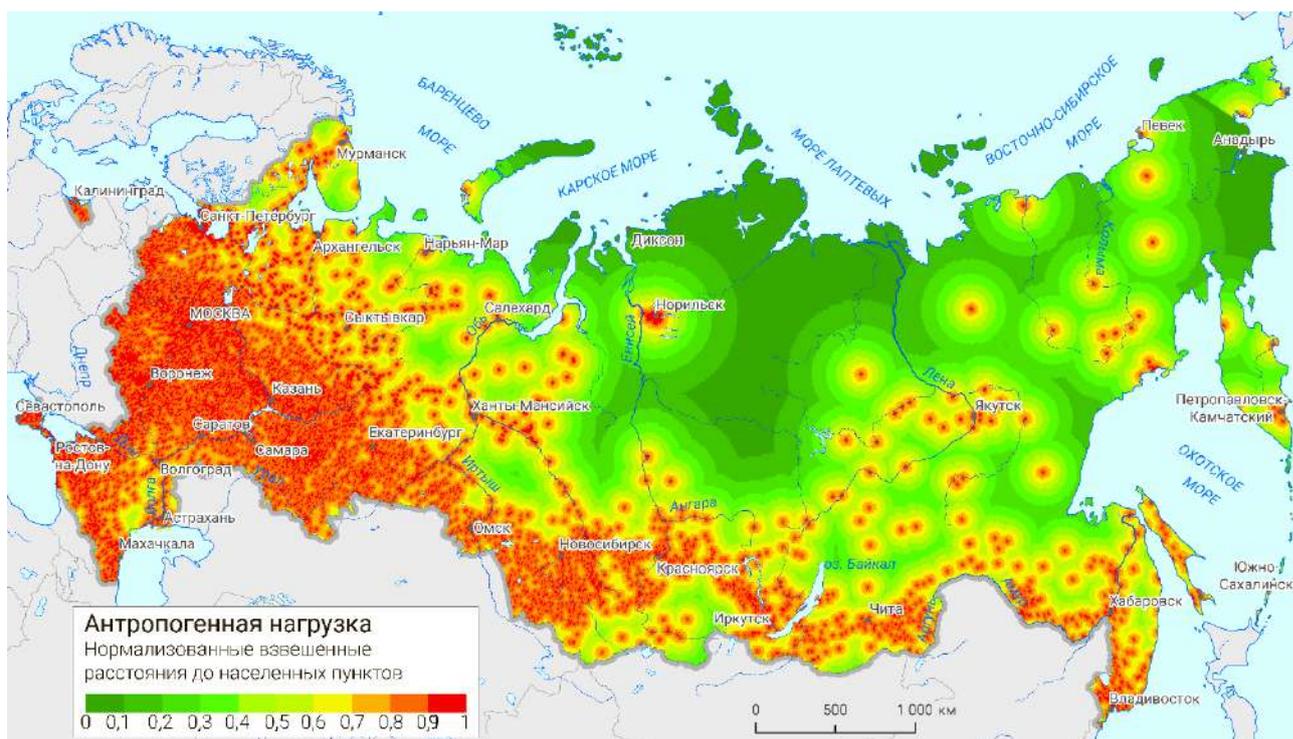


Рисунок ПЗ.11. Распределение антропогенной нагрузки по взвешенным расстояниям до населенных пунктов России
 составлено автором на основе картографических слоев OSM

Таблица ПЗ.11. Статистическая частота возгораний по классам взвешенных расстояний до населенных пунктов

Классы антропогенной нагрузки	Статистическая частота возгораний, %
0...0,1	63,38
0,1...0,2	26,66
0,2...0,3	7,93
0,3...0,4	1,06
0,4...0,5	0,89
0,5...0,6	0,06
0,6...0,7	0,01
0,7...0,8	0,00

ПЗ.12 Взвешенные расстояния до элементов дорожной сети

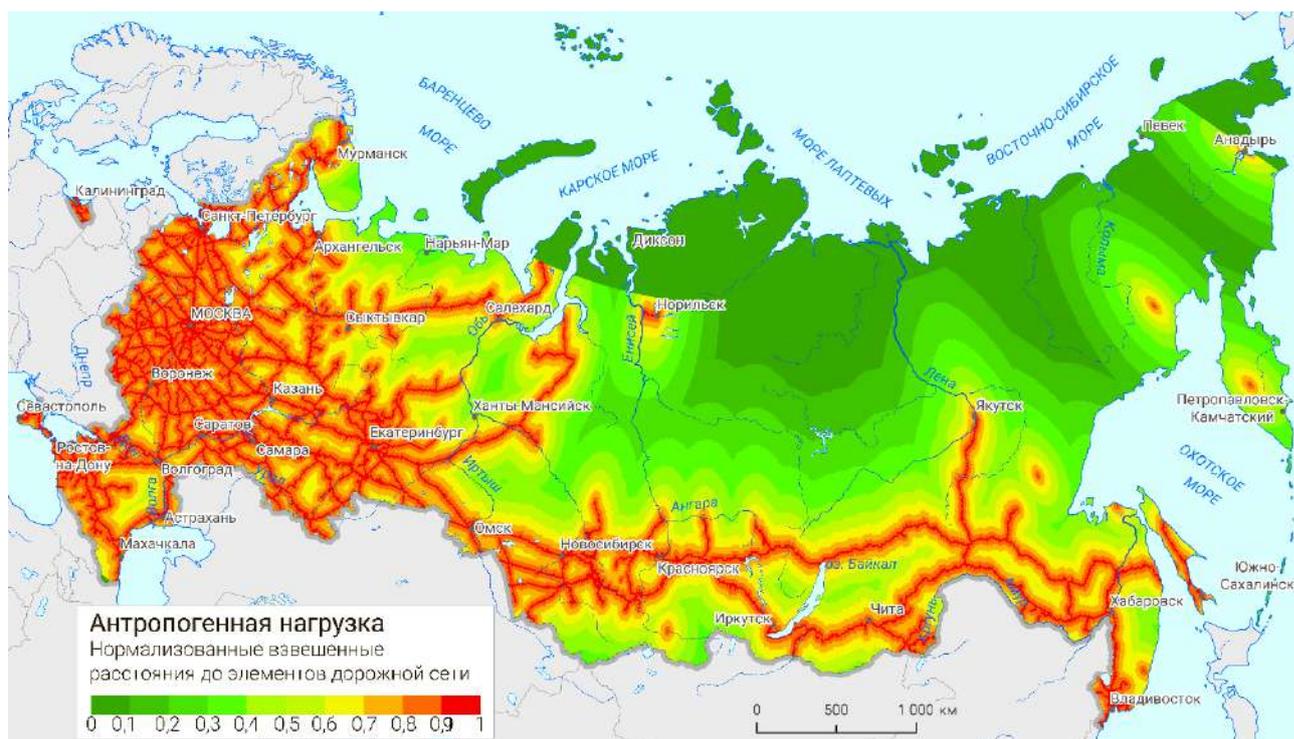


Рисунок ПЗ.12. Распределение антропогенной нагрузки по взвешенным расстояниям до дорог России составлено автором на основе картографических слоев OSM

Таблица ПЗ.12. Статистическая частота возгораний по классам взвешенных расстояний до дорог

Классы антропогенной нагрузки	Статистическая частота возгораний, %
0...0,1	29,24
0,1...0,2	23,42
0,2...0,3	14,27
0,3...0,4	11,41
0,4...0,5	12,61
0,5...0,6	6,58
0,6...0,7	2,03
0,7...0,8	0,39
0,8...0,9	0,05
0,9...1	0,00

ПЗ.13 Промышленная нагрузка



Рисунок ПЗ.13. Распределение промышленной нагрузки по территории России составлено автором на основе картографических слоев OSM

Таблица ПЗ.13. Статистическая частота возгораний по классам промышленной нагрузки

Классы промышленной нагрузки	Статистическая частота возгораний, %
присутствует	1,03
отсутствует	98,97

ПЗ.14 Сельскохозяйственная нагрузка



Рисунок ПЗ.14. Распределение сельскохозяйственной нагрузки по территории России составлено автором на основе картографических слоев OSM

Таблица ПЗ.13. Статистическая частота возгораний по классам сельскохозяйственной нагрузки

Классы сельскохозяйственной нагрузки	Статистическая частота возгораний, %
присутствует	1,23
отсутствует	98,77

П3.15 Тип растительного покрова

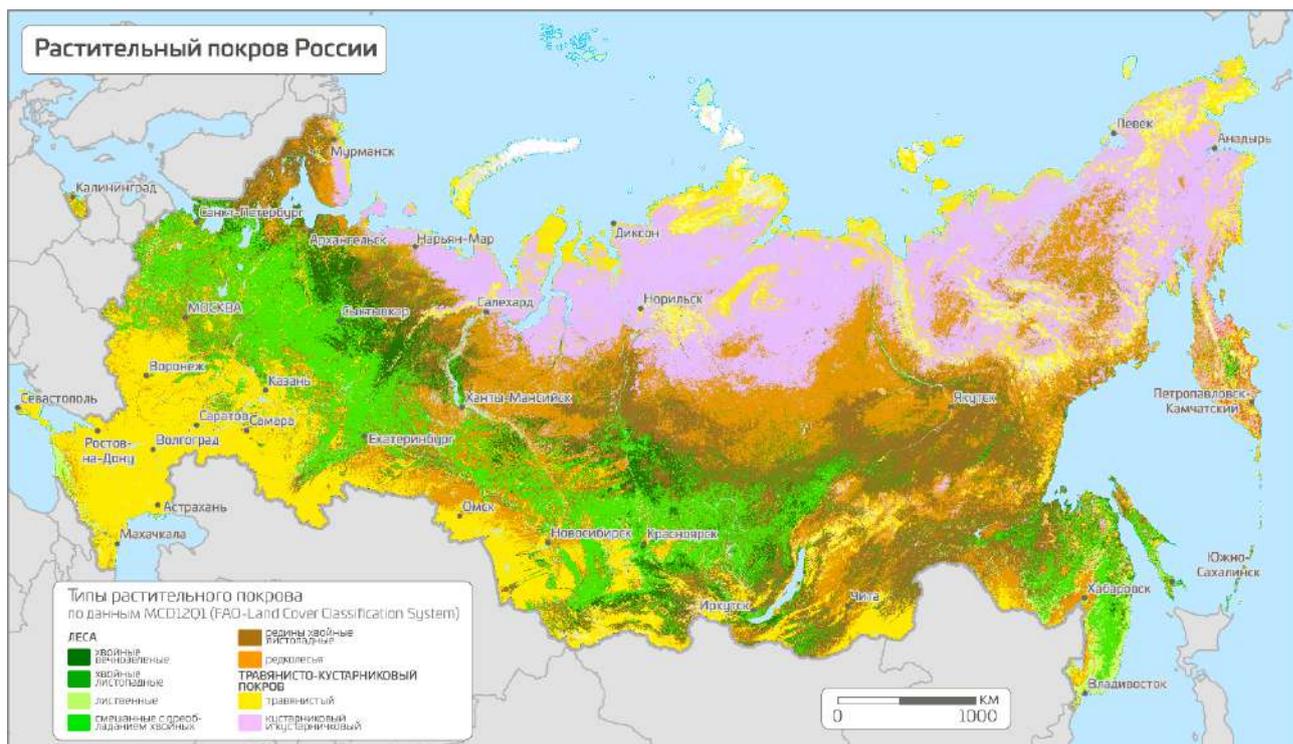


Рисунок П3.15. Растительный покров территории России составлено автором на основе продукта космической съемки MODIS MCD12

Таблица П3.15. Статистическая частота возгораний по типам растительного покрова

Тип растительного покрова	Статистическая частота возгораний, %
Пустыня	0,18
Снег/лёд	0,01
	0,02
Хвойные вечнозеленые леса	0,51
Смешанные леса, с преобладанием хвойных	7,39
Лиственные леса	1,04
Смешанные леса, с преобладанием	0,00
	0,00
Редколесья	30,11
	40,40
Травянистый покров	11,83
	0,49
Кустарниковый и кустарничковый покров	0,00
	6,39
	0,05

ПЗ.16 Географическая широта

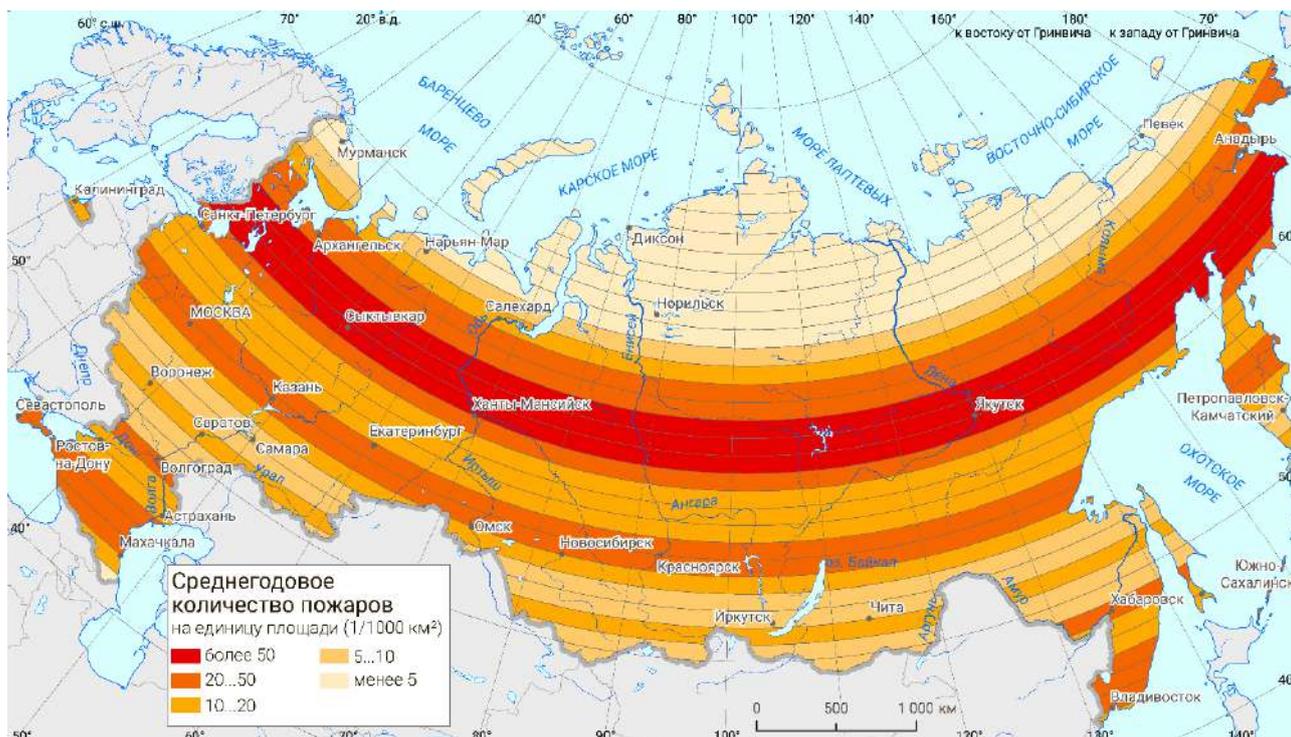


Рисунок ПЗ.16. Интенсивность природных возгораний по широтным зонам (1°) России составлено автором на основе данных о тепловых аномалиях MO/YD14

Таблица ПЗ.16. Статистическая частота возгораний по широтным зонам

Широтная зона	Статистическая частота возгораний, %
40 ... 45° с.ш.	1,24
45 ... 50° с.ш.	3,31
50 ... 55° с.ш.	7,01
55 ... 60° с.ш.	15,92
60 ... 65° с.ш.	59,17
65 ... 70° с.ш.	13,25
70 ... 75° с.ш.	0,10
75 ... 80° с.ш.	0,00

ПЗ.17 Географическая долгота

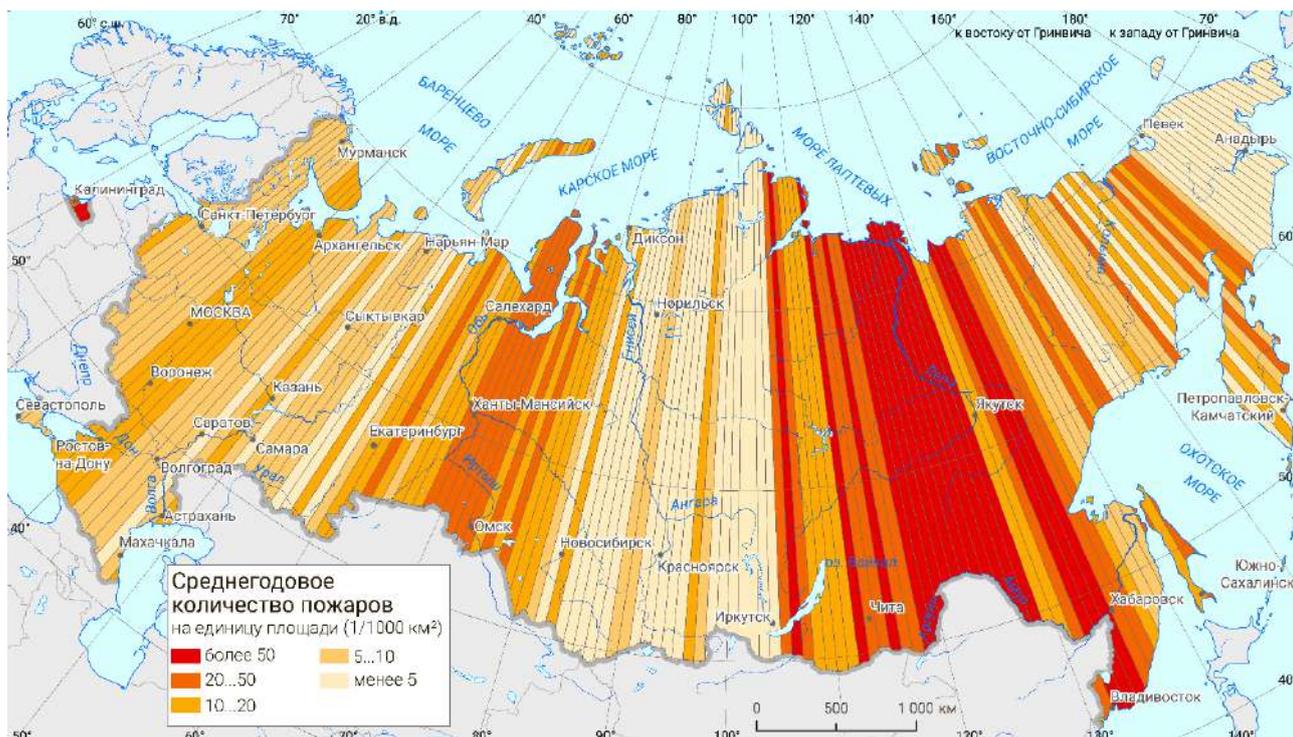


Рисунок ПЗ.17. Интенсивность природных возгораний по долготным секторам (1°) России составлено автором на основе данных о тепловых аномалиях MO/YD14

Таблица ПЗ.17. Статистическая частота возгораний по долготным секторам

Долготные сектора	Статистическая частота возгораний, %
20 ... 25° в.д.	0,15
25 ... 30° в.д.	0,14
30 ... 35° в.д.	0,87
35 ... 40° в.д.	1,64
40 ... 45° в.д.	1,64
45 ... 50° в.д.	1,21
50 ... 55° в.д.	0,84
55 ... 60° в.д.	0,84
60 ... 65° в.д.	1,59
65 ... 70° в.д.	2,69
70 ... 75° в.д.	3,48
75 ... 80° в.д.	2,54
80 ... 85° в.д.	1,51
85 ... 90° в.д.	0,54
90 ... 95° в.д.	0,56
95 ... 100° в.д.	0,72
100 ... 105° в.д.	0,46
105 ... 110° в.д.	4,81
110 ... 115° в.д.	5,89
115 ... 120° в.д.	12,43

Долготные сектора	Статистическая частота возгораний, %
125 ... 130° в.д.	23,19
130 ... 135° в.д.	8,87
135 ... 140° в.д.	3,83
140 ... 145° в.д.	2,24
145 ... 150° в.д.	0,48
150 ... 155° в.д.	0,81
155 ... 160° в.д.	0,92
160 ... 165° в.д.	1,22
165 ... 170° в.д.	0,80
170 ... 175° в.д.	0,05
175 ... 180° в.д.	0,00
180 ... -175° з.д.	0,00
-175 ... -170° з.д.	0,00

П3.18 Географическая широта и географическая долгота

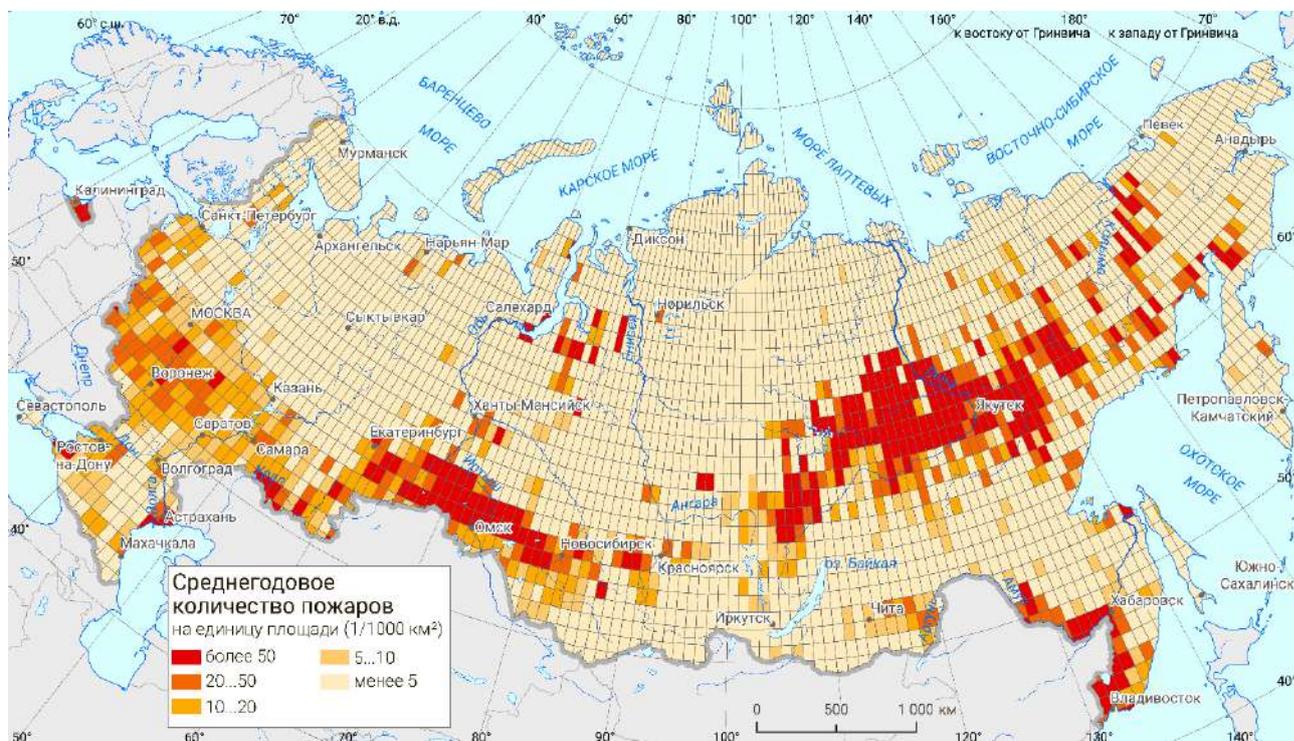


Рисунок П3.18. Интенсивность природных возгораний по широтно-долготным ячейкам (1°×1°) России

составлено автором на основе данных о тепловых аномалиях MO/YD14

ПЗ.19 Временной показатель месяца

Таблица ПЗ.18. Статистическая частота возгораний по месяцам в году

Месяц	Статистическая частота возгораний, %
январь	0,04
февраль	0,27
март	3,52
апрель	18,39
май	15,10
июнь	9,25
июль	23,81
август	17,61
сентябрь	6,57
октябрь	4,63
ноябрь	0,73
декабрь	0,06

ПРИЛОЖЕНИЕ 4. ЛИЦЕНЗИЯ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ ПРИРОДНЫХ ТЕРРИТОРИЙ РОССИИ

Лицензия Expat (MIT) на оригинальном (английском) языке:

«Copyright (c) 2022 Gizatullin A.T.

Permission is hereby granted, free of charge, to any person obtaining a copy of this software and associated documentation files (the "Software"), to deal in the Software without restriction, including without limitation the rights to use, copy, modify, merge, publish, distribute, sublicense, and/or sell copies of the Software, and to permit persons to whom the Software is furnished to do so, subject to the following conditions:

The above copyright notice and this permission notice shall be included in all copies or substantial portions of the Software.

THE SOFTWARE IS PROVIDED "AS IS", WITHOUT WARRANTY OF ANY KIND, EXPRESS OR IMPLIED, INCLUDING BUT NOT LIMITED TO THE WARRANTIES OF MERCHANTABILITY, FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE AND NONINFRINGEMENT. IN NO EVENT SHALL THE AUTHORS OR COPYRIGHT HOLDERS BE LIABLE FOR ANY CLAIM, DAMAGES OR OTHER LIABILITY, WHETHER IN AN ACTION OF CONTRACT, TORT OR OTHERWISE, ARISING FROM, OUT OF OR IN CONNECTION WITH THE SOFTWARE OR THE USE OR OTHER DEALINGS IN THE SOFTWARE».

Перевод лицензии на русский язык:

«Copyright (c) 2022 Гизатуллин А.Т.

Данная лицензия разрешает лицам, получившим копию данного программного обеспечения и сопутствующей документации (в дальнейшем именуемыми «Программное обеспечение»), безвозмездно использовать Программное обеспечение без ограничений, включая неограниченное право на использование, копирование, изменение, слияние, публикацию, распространение, сублицензирование и/или продажу копий Программного обеспечения, а также лицам, которым предоставляется данное Программное обеспечение, при соблюдении следующих условий:

Указанное выше уведомление об авторском праве и данные условия должны быть включены во все копии или значимые части данного Программного обеспечения.

ДАННОЕ ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРЕДОСТАВЛЯЕТСЯ «КАК ЕСТЬ», БЕЗ КАКИХ-ЛИБО ГАРАНТИЙ, ЯВНО ВЫРАЖЕННЫХ ИЛИ ПОДРАЗУМЕВАЕМЫХ, ВКЛЮЧАЯ ГАРАНТИИ ТОВАРНОЙ ПРИГОДНОСТИ, СООТВЕТСТВИЯ ПО ЕГО КОНКРЕТНОМУ НАЗНАЧЕНИЮ И ОТСУТСТВИЯ НАРУШЕНИЙ, НО НЕ ОГРАНИЧИВАЯСЬ ИМИ. НИ В КАКОМ СЛУЧАЕ АВТОРЫ ИЛИ ПРАВООБЛАДАТЕЛИ НЕ НЕСУТ ОТВЕТСТВЕННОСТИ ПО КАКИМ-ЛИБО ИСКАМ, ЗА УЩЕРБ ИЛИ ПО ИНЫМ ТРЕБОВАНИЯМ, В ТОМ ЧИСЛЕ, ПРИ ДЕЙСТВИИ КОНТРАКТА, ДЕЛИКТЕ ИЛИ ИНОЙ СИТУАЦИИ, ВОЗНИКШИМ ИЗ-ЗА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИЛИ ИНЫХ ДЕЙСТВИЙ С ПРОГРАММНЫМ ОБЕСПЕЧЕНИЕМ».