

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

*На правах рукописи*



**Гизатуллин Алмаз Тимербулатович**

**Геоинформационное моделирование пожарной опасности  
природных территорий России**

1.6.20 – Геоинформатика, картография

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата географических наук

Москва – 2023

Диссертация подготовлена на кафедре картографии и геоинформатики географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

**Научный руководитель –** *Алексеевко Наталья Анатольевна, кандидат географических наук, доцент, доцент кафедры картографии и геоинформатики географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова*

**Официальные оппоненты –** *Пьянков Сергей Васильевич, доктор географических наук, профессор, проректор по научной работе и инновациям, заведующий кафедрой картографии и геоинформатики Пермского государственного научно-исследовательского университета*

*Лурия Евгений Аркадьевич, доктор технических наук, заведующий отделом технологий спутникового мониторинга Института космических исследований РАН*

*Шварц Евгений Аркадьевич, доктор географических наук, руководитель Центра ответственного природопользования Института географии РАН*

Защита диссертации состоится «06» апреля 2023 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета МГУ.016.4 Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова по адресу: г. Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д.1, Географический факультет, 18 этаж, ауд. 1806.

E-mail: [dissovet.geogr.msu@gmail.com](mailto:dissovet.geogr.msu@gmail.com)

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М. В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на сайте ИАС «ИСТИНА»: <https://dissovet.msu.ru/dissertation/016.4/2385>.

Автореферат разослан «17» февраля 2023 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета МГУ.016.4,  
кандидат географических наук

Е. Ю. Матлахова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**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 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 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*, которые характеризуют 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 методiku* 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.: космические снимки MODIS, метеорологическая модель ECMWF, цифровая модель рельефа GMTED2010, картографические слои OpenStreetMap (всего более 100 тыс. продуктов на указанную территорию). 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), а также 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. Ее практическая реализация в виде информационной системы прогнозного мониторинга, спроектированной в соответствии с современными тенденциями информационного обеспечения в отрасли геоинформатики, картографии и дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), потенциально обеспечивает открытый доступ пользователей к тематическим результатам. Прототип системы опубликован на веб-странице [www.firepredict.ru](http://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 рецензируемых журналах из списка Scopus, WoS, RSCI, 4 статьи в материалах всероссийских и международных конференций и 10 тезисов докладов. 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.

**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.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

### Глава 1. Состояние вопроса оценки и прогнозирования пожарной опасности

**Природный пожар** представляет собой процесс горения, стихийно возникающий и распространяющийся на природных территориях. Ключевое определение этого явления, помимо прочих компонентов, включает в себя *объект возгорания* в виде *природного горючего материала* (Мелехов, 1934; Курбатский, 1972; Софронов, Волокитина, 1990), изучение особенностей которого для территории России представляет собой первостепенную задачу этого исследования. В качестве природных горючих материалов выступают элементы природной среды (растительность, подземные слои торфа), обладающие пирологическими свойствами, которые влияют на возможность их воспламенения.

В зависимости от вида и свойств горючих материалов выделяются основные типы природных пожаров на территории России – *лесные, степные и торфяные*. Основными проводниками горения являются растительный покров лесов, степей и подземные слои торфа соответственно.

Начало исследованиям лесных пожаров в аспекте их прогнозирования 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 горючих материалов, 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 лесной растительности, 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).

Исследования степей России в аспекте прогнозирования возгораний находятся в более дефицитном положении в силу их бóльшей контролируемости со стороны человека. Современные разработки нацелены на анализ пирологических свойств степных горючих материалов и влияния на них внешних условий в виде погодных явлений (Горяев и др., 2020) и антропогенной нагрузки (Барановский, 2006; 2007).

Торфяные пожары являются предметом давних исследований, начало которых относится еще к середине XIX столетия (Шацкий, 1856). С точки зрения их прогнозирования они изучались наряду с лесными как один из их подтипов (Мелехов, 1938; 1944; Курбатский, 1957). В настоящее время сложилось самостоятельное направление моделирования возгорания торфа с учетом физических процессов переноса влаги и теплоты (Удилов, 1986; Гришин, 2008, Винокуров и др., 2015).

В совокупности, лесные, степные и торфяные природные пожары формируют повсеместный «точечный» характер явления и охватывают территории уникальных и самых больших в мире природных геосистем – бореальных лесов, степей Евразии и торфяных болот. Обзор их исследований с точки зрения возможности прогнозирования пожаров подтверждает устойчивую актуальность изучения темы диссертации и являются основой для развития рассматриваемой области знаний в текущей работе.

Возможность возникновения природного пожара описывается мерой **пожарной опасности**, которая в текущей работе *количественно* выражается вероятностью наступления рассматриваемого события и *качественно* – пирологическими свойствами объекта потенциального возгорания и окружающими его условиями. Пожарная опасность как пространственно-временное явление складывается из совокупного влияния *факторов пожарной опасности*. Рассматривая *направленность воздействия* на объект возгорания как основу для инициирования процесса горения, получим группы факторов:

- **внутренние** – постоянные и переменные характеристики горючего материала как физического тела (например, гигроскопичность – способность накапливать воду в своем составе), выражаются в видовых свойствах *растительности* как основного проводника горения;
- **внешние 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) (Глаголев, 2015);

- *свойства поверхности* (геоморфологические, гидрологические, почвенные, отчасти геологические факторы) – определяют перемещение, расход и аккумуляцию вещества и, главным образом, воды, ограничивающей горение (Зубарева, 2016);
- *влияние человека* (антропогенные факторы), участие которого проявляется и в качестве потенциальных источников зажигания (причин), и как факторы, ослабляющие сопротивление природных геосистем из-за интенсивного воздействия по мере хозяйственного и рекреационного освоения территорий (Курбатский, 1978; Андреев, 2003).

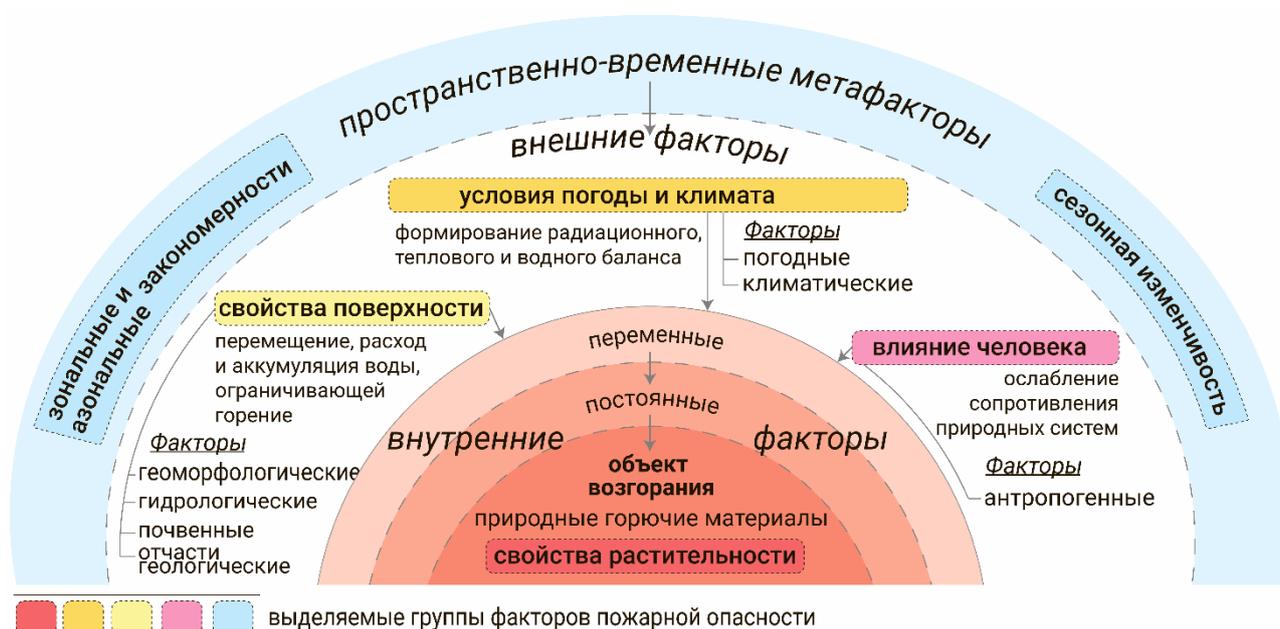


Рисунок 2. Предложенная классификация факторов пожарной опасности

Предложенная классификация факторов (Рисунок 2) отражает процессы внутри географического ландшафта (Солнцев, 1962), в рамках которого существует и развивается явление пожарной опасности, а его элементы, их свойства, связи между ними выступают в качестве факторов. В связи с этим также учитываются пространственно-временные метафакторы (факторы более высокого уровня), которые определяют географические (зональные и аazonальные, сезонные) закономерности элементов ландшафта и, как следствие, пожарной опасности.

Исследование факторов пожарной опасности является ключевой задачей методик моделирования пожарной опасности, направленных на оценку и прогнозирование явления. В рамках их аналитического обзора были выявлены характерные этапы и на основе этого сформирована целесообразная базовая методическая последовательность, которая включает: 1) выявление перечня потенциальных факторов; 2) численную оценку факторов на основе непосредственных или дистанционных измерений; 3) интеграцию измерений в показатель пожарной

опасности с учетом весового вклада каждого фактора в меру готовности к возгоранию; 4) дифференциацию территории по классам пожарной опасности; 5) целевую интерпретацию с выделением наиболее опасных участков.

Специфику методик моделирования определяют *критические составляющие* – элементы в их составе, которые формируют облик методики, обуславливают систематизацию их разнообразия и образуют основу для разработки новых подходов к решению проблемы (Гизатуллин, 2021):

- способ интерпретации явления пожарной опасности (тип возгорания, вид горючего материала, перечень определяющих факторов);
- источники данных (данные ДЗЗ, метеорологические измерения, цифровые модели рельефа, карты и др.);
- методы и технологии их обработки (математическая статистика, математический анализ, теория вероятностей, ГИС, машинное обучение);
- пространственный уровень исследования (глобальный, региональный, локальный).

Текущее методическое обеспечение моделирования пожарной опасности главным образом представлено национальными методиками России (Нестеров, 1949; Вонский, Жданко, 1976; Софронов, 1992), Канады (Lawson, Armitage, 2008), США (Deeming et al., 1977; Burgan, 1988), Австралии (McArthur, 1960). Они являются наиболее сложившимися и успешными с точки зрения широкого и официального использования для прогнозирования природных пожаров во многих странах мира. В их основе лежит оценка пожарной опасности по условиям погоды как одного из главных факторов пожарной опасности. При этом они не лишены недостатков: их параметры строго привязаны к особенностям эталонных растительных сообществ, которые не передают изменчивость и разнообразие природных горючих материалов по территории. Кроме того, доминирующий вклад факторов погоды и наземных метеорологических измерений как источников данных является преуменьшает значимость других, не менее важных элементов (растительность, рельеф, антропогенное влияние). Также итоговые показатели пожарной опасности являются достаточно абстрактными (например, °C<sup>2</sup>) по отношению к реальной ситуации.

Недостатки национальных методик могут быть компенсированы путем расширения перечня факторов, источников данных, методов и технологий их обработки, что и демонстрируется на примере различных частных методик, применяющихся для региональных и локальных участков различных страны (Sterling, 1971; Chuvieco, Salas, 1996; Dasgupta et al., 2006; Фильков, 2014; Yu et al., 2017; Palacio, MacFarlane, 2021; и др.). В основе развития таких методик лежит, с одной стороны, сохранение ключевых особенностей оценки пожарной опасности через оценку влияния факторов, а с другой – исследование применимости различных типов данных (аэро- и космических снимков, цифровых моделей рельефа, карт, лазерной съемки, их комбинации) и методов их обработки (растровая алгебра, математическая статистика, машинное обучение и др.).

Методики моделирования пожарной опасности практически реализуются в рамках *информационных систем оценочного и прогнозного мониторинга*, которые упрощают их применение путем автоматизации методической последовательности и позволяют визуализировать и распространить результаты для поддержки принятия решений о превентивных и профилактических мерах. В России наиболее показательным примером такой реализации является Информационная система дистанционного мониторинга Федерального агентства Лесного хозяйства РФ. Однако она прежде всего ориентирована на выявление и оценку последствий от произошедших возгораний, тогда как прогнозная часть ограничена применением национальной методики Нестерова с характерными недостатками, упомянутыми ранее.

Исследуемая область знаний также зависит от государственного нормативно-правового регулирования (*Лесной кодекс РФ, Земельный кодекс РФ, Федеральные законы, локальные приказы Рослесхоза, МЧС и Минприроды РФ*). **Деятельность по пожарной охране природных территорий в России** на сегодняшний день подвергается *непрерывной оптимизации*, которая при прочих чертах включает в себя сокращение уполномоченных структур, недостаток финансирования, как следствие, ослабление контроля и ежегодный рост числа возгораний. При этом, *прогнозирование пожарной опасности недостаточно детально отражается в документах*, а актуальность методического обеспечения достаточно низкая и относится к середине прошлого века, наблюдается несовременность закреплённых источников данных и технологий их обработки, что подтверждает актуальность текущей работы.

## **Глава 2. Исходные пространственные данные модели пожарной опасности**

Для исследования пожарной опасности природных территорий России к исходным данным были определены следующие общие требования:

- *пространственно-территориальные* – отображение суши как области действия возгораний в качестве информационного содержания данных, охват территории России, пространственная ориентированность;
- *временные* – регулярное ежесуточное обновление, высокая оперативность и перспектива долгосрочного функционирования, альтернативность;
- *технические* – высокая надёжность и достоверность, обеспечиваемые объективностью инструментальных измерений, открытые форматы и свободный доступ к источникам.

Им соответствуют следующие геоинформационные продукты: *данные ДЗЗ, метеорологические модели, цифровые модели рельефа (ЦМР), картографические материалы*. Последующая конкретизация данных была выполнена путем внедрения специфических критериев.

Данные дистанционного зондирования должны включать каналы видимого и инфракрасного спектра, излучение в которых наиболее информативно отражает изменения пожарной опасности. Кроме того, учитывается уровень обработки данных: они должны быть скорректированы с устранением геометрических, радиометрических

и атмосферных искажений космической съемки. В соответствии с этим были выбраны **космические снимки MODIS**, которые среди аналогичных действующих съемочных систем (AVHRR, VIIRS, OLCI/SLSTR) обладают наиболее длительным рядом наблюдений (с 2000 г.) и возможностью последующего продолжения этого ряда данными с перспективных спутников (VIIRS). В исследовании были использованы тематические изображения Land 6.1 (отражательная способность, температура земной поверхности, классификация растительного покрова) с глобальным охватом, пространственным разрешением 250-1000 м, временной частотой 1 раз в сутки.

При выборе метеорологической модели были использованы критерии разнообразия источников метеорологических наблюдений и наличия реанализа – процедуры согласования данных и пространственно-временного сглаживания неравномерно распределенных значений с метеостанций с учетом особенностей атмосферных явлений, что особенно важно при их низкой плотности в России. Как следствие, среди прочих (GFS, CMC, ICON, UKMO, ARPEGE, COSMO, ПЛАВ) была выбрана **метеорологическая модель ECMWF** с пространственным разрешением 9 км, временной частотой 24 раза в сутки, временным рядом с 1950 г. Она наиболее достоверно (89,93%) отображает погодную ситуацию на территории России по сравнению с другими моделями (например, российская ПЛАВ ограничивается 79,33% достоверности, *WMO-LCDNV, 2022*).

Выбор ЦМР сопровождался сравнением актуальности данных на территорию России и сопоставимостью с ранее выбранными данными (среднее пространственное разрешение). Среди проанализированных моделей (STRM, ASTER GDEM, GTOPO30, GMTED2010) наиболее пригодной для исследования приуроченности различных участков рельефа к возникновению пожаров является **ЦМР GMTED2010** с глобальным охватом, пространственным разрешением 15'' (500 м), вертикальной точностью SE90 менее 10 м, актуальностью данных на 2009 г.

Картографические материалы на сегодняшний день в наиболее актуальном представлении объектов земной поверхности размещены в рамках веб-картографических сервисов (Яндекс.Карты, Google Maps, Bing Maps, WikiMapia, OpenStreetMap и др.). С учетом свободы лицензий, полноты и достоверности данных оптимальным источником информации об антропогенных объектах (местах присутствия человека как главной причины природных возгораний) является **веб-карта OpenStreetMap (OSM)**.

Таким образом, выбранные данные – **космические снимки MODIS**, **метеорологическая модель ECMWF**, **ЦМР GMTED2010**, **картографические слои OSM**, составляют информационное обеспечение разрабатываемой методики и в совокупности воссоздают внутренние, внешние погодные (косвенно климатические), геоморфологические (косвенно также гидрологические и почвенные) и антропогенные факторы пожарной опасности. Характеристики этих продуктов, их состав и структура являются основой для интерпретации факторов возгораний, 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 является единая количественная мера пожарной опасности, уровни которой качественно дифференцируют территорию по вероятности потенциального возникновения природного пожара.

На начальном этапе разработки методики на базе исходных геоинформационных продуктов были определены **678** разнообразных **потенциальных показателей пожарной опасности**, соответствующих выделенным ранее факторам (Рисунок 2):

- на основе ежесуточных снимков MODIS: спектральные характеристики растительности и других объектов местности в видимой, ближней, средней и тепловой инфракрасной областях электромагнитного диапазона, спектральные индексы, статистические показатели их временных рядов (всего 338 показателей);
- по ежесуточным данным метеорологической модели ECMWF: переменные погоды – вариации температур воздуха, точки росы, почвы, количества осадков, интенсивности солнечного излучения, параметров ветра, влажности воздуха и облачности, статистические показатели (321);
- по ЦМР GMTED2010: морфометрические показатели рельефа – абсолютная высота, уклон, экспозиция, плановая, вертикальная и общая кривизна, расчлененность поверхности, индексы влажности рельефа, баланса массы, параметров склона (10);
- на основе картографических слоев OSM: показатели антропогенной нагрузки – взвешенные расстояния до населенных пунктов и дорог, областей промышленного и сельскохозяйственного освоения (4);
- на основе пространственно-временного ориентирования данных: географические широта и долгота, порядковые номера суток, декады и месяца в году (5).

Для последующего исследования пожарной опасности на основе этих показателей были определены **базовые компоненты моделирования**, которые обеспечивают интеграцию разнородных показателей в единый шаблон модели пожарной опасности:

- **содержательный** – эталонный набор тепловых аномалий по данным MODIS, выявленных за 2001-2020 гг., после аналитической фильтрации и обработки интерпретируемых как природные возгорания и формирующих в дальнейшем обучающий набор;
- **пространственный** – регулярная сетка значений для территории России в нормальной равновеликой конической проекции Альберса с пространственным разрешением 500 м, обеспечивающая минимальные и допустимые искажения исходных данных;
- **временной** – последовательность 30 ежесуточных значений (наименьший полный ряд для выявления трендов изменения показателей) с прогнозом на 14 суток

вперед (ряд с наиболее приемлемыми значениями точности и достоверной передачей действительной ситуации).

Интегрируемые пространственные данные в силу их объема и разнообразия являются частью «*больших*» данных. Поэтому для дальнейшего исследования были использованы методы **нейронных сетей**, которые квалифицируются как наиболее точные методы среди прочих и имеют способность выявления неочевидных закономерностей.

Показатели пожарной опасности образуют временные ряды, которые необходимо преобразовать также во временной ряд обобщающей меры пожарной опасности. Оптимальным методом для реализации этого преобразования является *рекуррентная нейронная сеть с долгой краткосрочной памятью (LSTM – Long Short-Term Memory; Hochreiter, Schmidhuber, 1997)*, предназначенная для обработки последовательностей информации. Принцип работы этой сети показан на *Рисунке 3*.

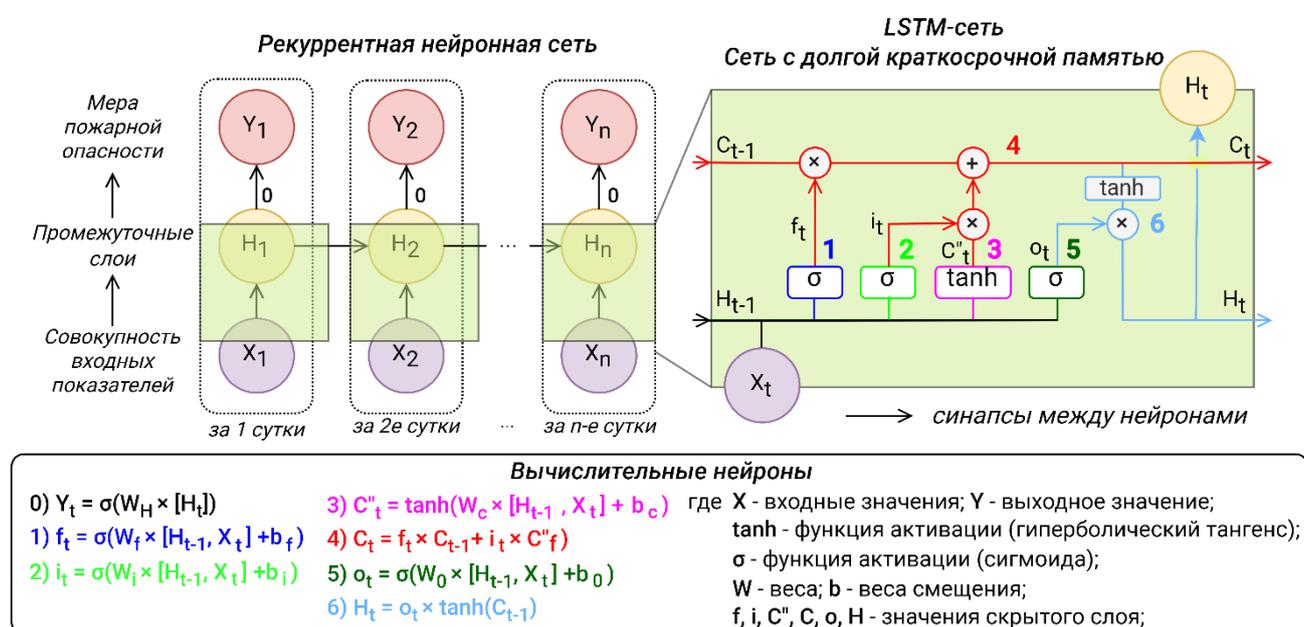


Рисунок 3. Архитектура используемой нейронной сети – рекуррентная LSTM сеть

На вход нейронной сети поступает совокупность нормализованных в диапазон [0; 1] показателей пожарной опасности для каждого узла пространственной регулярной сетки за 30 предыдущих суток до текущего момента. Дальнейшие вычисления происходят в двух направлениях:

- *в пределах одного временного среза* – от множества показателей к обобщающей мере пожарной опасности; в данном случае, на выходе формируются значения монотонной функции сигмоиды, значения которой отражают близость к эталонному природному пожару в этом узле и могут быть интерпретированы как **вероятность потенциального возгорания**;
- *в пределах временной последовательности*: от известных прошлых значений показателей к прогнозируемым будущим состояниям; сеть способна выявлять и запоминать локальные закономерности достаточно длинных серий данных

(отсюда и название сети – долгая краткосрочная память).

Благодаря этим двум направлениям на основе множества исходных показателей возможно прогнозирование вероятности потенциального возгорания. Для последующего применения нейронная сеть была обучена на сформированном эталонном наборе, который включал 19 205 примеров (наборов пикселей) текущего действия природных пожаров (вероятность потенциального возгорания – 100%) и окружающего их отсутствия (0%, причем последние представлены в большей степени, что соответствует истинному «точечному» распределению возгораний). Процесс обучения был произведен в несколько этапов.

*Отбор признаков и анализ взаимосвязей.* Совокупность из ранее отобранных 678 показателей является исходным потенциальным набором для определения пожарной опасности, однако в таком объеме значительно возрастает вычислительная нагрузка, а сами показатели могут коррелировать между собой и не иметь связи с моделируемым показателем. Анализ этих взаимосвязей с помощью коэффициента корреляции Пирсона показал, что для достоверного моделирования достаточно 52 показателя из них (*Рисунок 7*). Наиболее значимыми предикторами возгорания являются *спектральные характеристики*, которые непосредственно отражают состояние растительных горючих материалов и ее динамику, и *погодные переменные (температура воздуха и ее производные – временные аномалии, сумма за период без осадков)*, которые в первую очередь определяют накопление энергии, необходимой для испарения воды и воспламенения. Однако именно учет их географической изменчивости, обеспечивающийся за счет *пространственно-временных показателей*, повышает локальную точность моделирования для всей территории России: 1) широтно-долготные переменные позволяют зафиксировать зональные и азональные закономерности явления (например, более 60% возгораний приходится на сибирские леса в пределах 50...70° с. ш., 105...140° в. д.); 2) временные показатели (сутки, декада и месяц в году) определяют выявление сезонной изменчивости (пик возникновения природных пожаров наступает в апреле с резким увеличением температур воздуха и в июле вследствие высокого теплового и радиационного баланса и высыхания природных горючих материалов).

Остальные показатели (*морфометрические переменные, антропогенная нагрузка*) менее значимы, однако также вносят свой вклад в формирование вероятности потенциального возгорания природных территорий: случаи возникновения природных пожаров в России за XXI век связаны в большей степени с определенными классами этих показателей. Большинство возгораний (от 65 до 98%) происходят в пределах высот до 500 м, участках уклона до 3°, на склонах южной и юго-западной экспозиции, в зонах дивергенции/ускорения стока, участках минимальной расчлененности (индекс TRI < 15) и влажности рельефа (TWI < 0), в непосредственной близости от населенных пунктов и дорожной сети (антропогенная нагрузка более 0,8).

*Определение весов нейронной сети* было осуществлено методом обратного распространения ошибок. Для этого эталонный набор был разделен на две части: 80% данных за 2001-2018 гг. использовалось для предсказания вероятности возгорания, а

оставшиеся 20% и данные за 2019-2020 гг. – для вычисления ошибки в виде бинарной перекрестной энтропии. Обучение продлилось 37 эпох обновления весов модели в течение 4,5 часов работы восьмиядерного центрального процессора Intel Core I7-7700K и кластера из двух видеокарт NVIDIA GeForce GTX 1060 6GB. Реализация и обучение сети были выполнены с помощью библиотеки Keras на языке Python.

В результате обучения точность прогнозирования по бинарной перекрестной энтропии составила более 90%. Однако для **верификации модели** по независимым данным за 2019-2020 гг. были использованы метрики в виде *достоверности TPR (True Positive Rate)* и *надежности PPV (Positive Predictive Value)*. Они ориентированы на оценку точности с точки зрения прогноза именно случаев возгораний, а не их отсутствия, что более ценно для последующей поддержки принятия решений. Достоверность модели TPR при прогнозировании на 1-5 суток вперед составила 70,1%, тогда как ее надежность PPV на этот период – 59,0%. При экспериментальном увеличении заблаговременности прогноза до 6-14 дней значения падают до 61,9 и 52,8% соответственно.

**Валидация модели на национальном уровне** была произведена путем сравнения с официальной методикой Нестерова по оценке и прогнозированию пожарной опасности. Их сравнение было произведено на основе распределения выявленных за 2021 г. природных пожаров (по данным MODIS) по классам пожарной опасности (Рисунок 4, пример на Рисунке 5).

Средняя доля возгораний, оказавшихся в V наиболее пожароопасном классе, значительно выше в разработанной модели по сравнению с методикой Нестерова: 70,1% против 31,4% (прогноз на 1-5 суток), что указывает на ее большую прогностическую способность. Распределение по другим классам также отличается: как по доле пожаров в первых трех опасных классах (~90% и ~70%), так и по общей тенденции «чем выше класс, тем больше возгораний», которая сильнее искажается в модели по методике Нестерова.

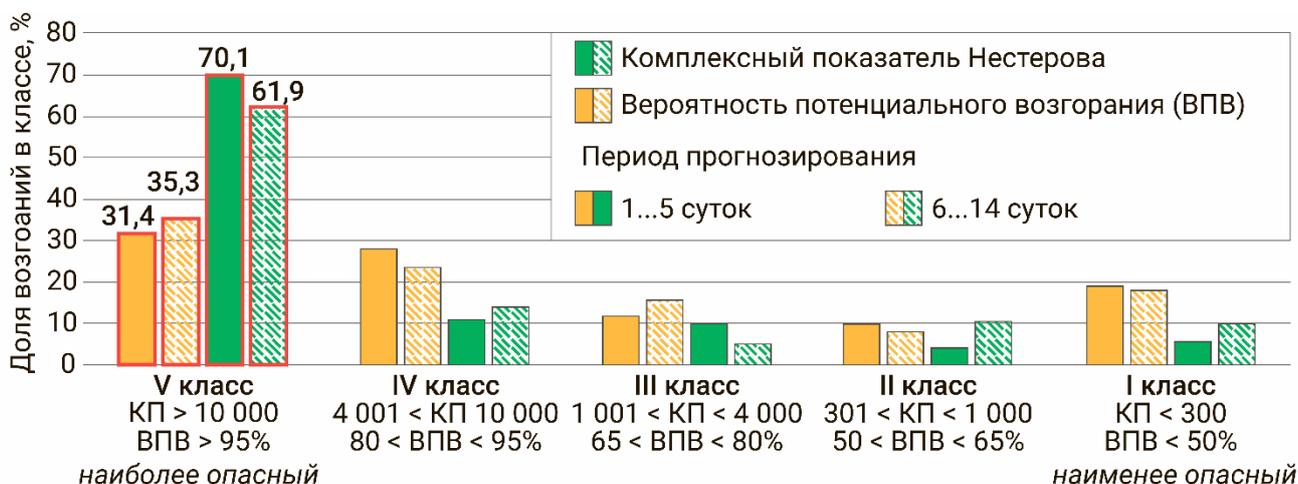


Рисунок 4. Результаты валидации моделирования на национальном уровне – распределение точек возникновения природных пожаров по классам пожарной опасности

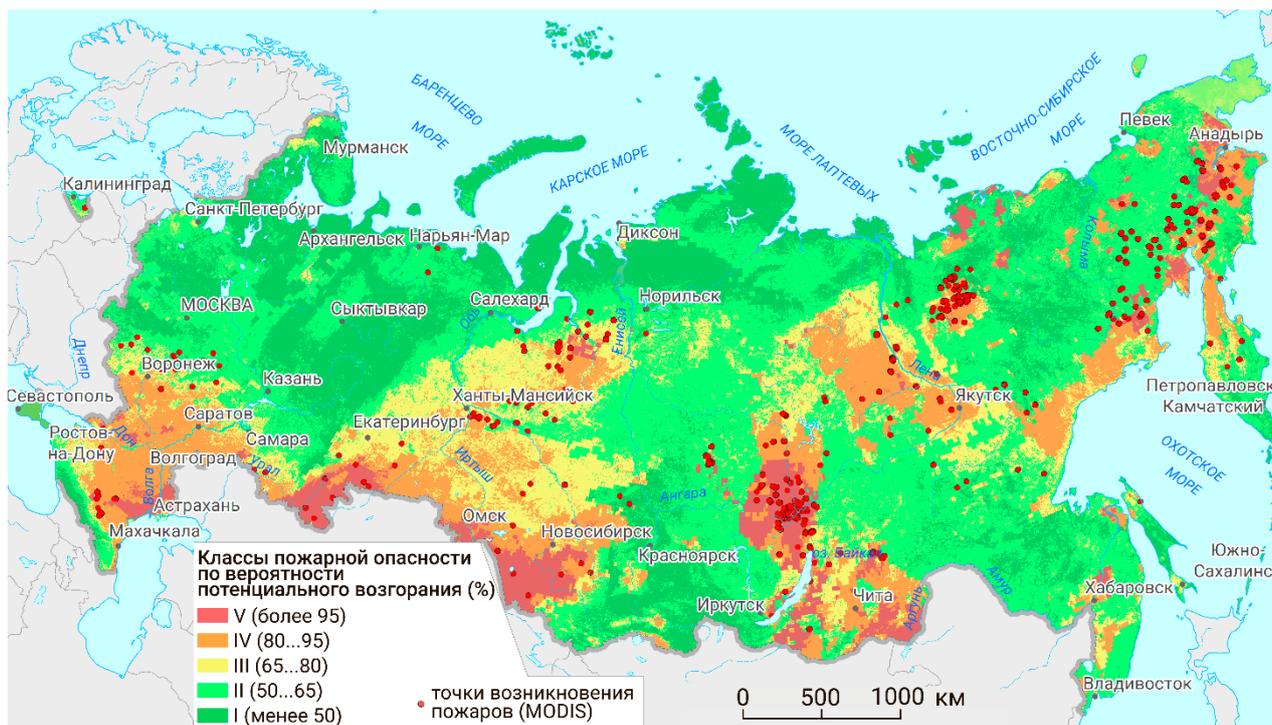


Рисунок 5. Распределение классов пожарной опасности по вероятности потенциального возгорания (15.07.2021, прогноз на 1 сутки вперед)

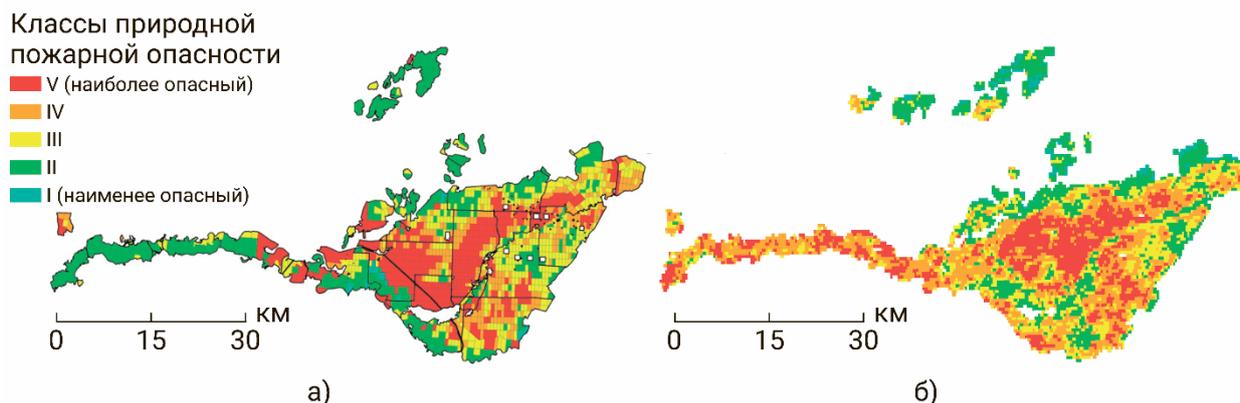


Рисунок 6. Распределение классов природной пожарной опасности в пределах национального парка «Бузулукский бор» за 2014 год:  
а) лесоустроительные материалы; б) по разработанной модели

Для валидации модели на региональном уровне были выбраны национальные парки «Мещера» и «Бузулукский бор» как примеры особо охраняемых природных территорий с разнообразными и ценными ландшафтами. В этом случае сравнивается природная пожарная опасность, которая отражается в лесоустроительных материалах лесничеств по квартальной сети. Ее детализация (сотни м) сопоставима с пространственным разрешением модели (500 м). Показатель для сравнения был рассчитан путем годового усреднения разработанной ежесуточной модели (компенсация внешних факторов и сохранение внутренних, соответствующих природной составляющей). Высокая корреляция результатов ( $R \sim 0,71$ ; пример на Рисунке 6) обуславливают возможность применения методики для приближенной актуализации лесоустроительных материалов природной пожарной опасности.

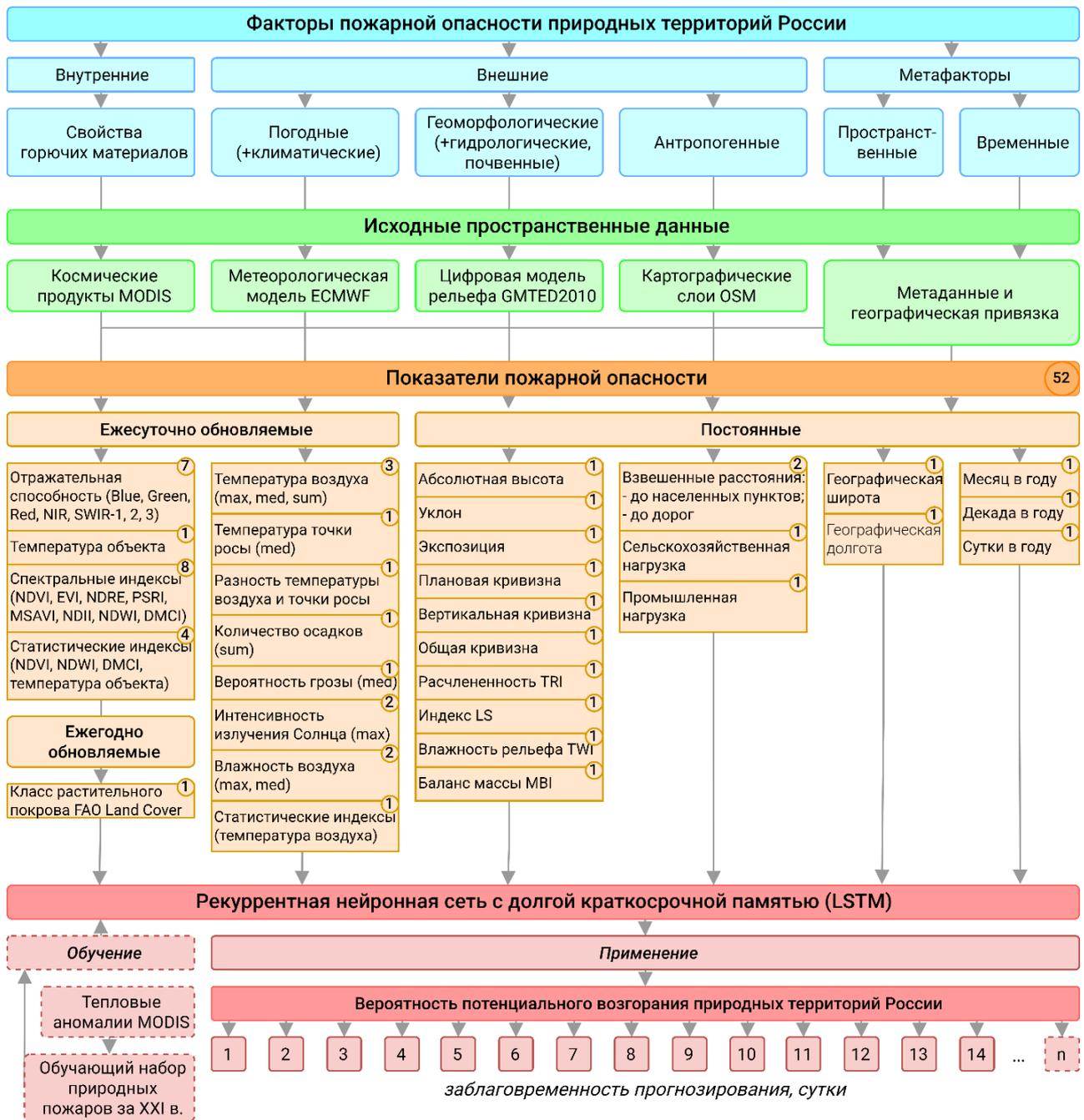


Рисунок 7. Последовательность методики геоинформационного моделирования пожарной опасности природных территорий России

Таким образом, обучение и тестирование рекуррентной нейронной сети с долгой краткосрочной памятью на основе однородного ряда случаев природных пожаров за 2001-2020 гг. позволяет создать прогнозную модель, воспроизводящую вероятность потенциального возгорания. Верификация и валидация модели на национальном и региональном уровнях продемонстрировали ее успешную целевую применимость: методика обладает большей ориентированностью на выделение наиболее пожароопасных участков природных территорий по сравнению с традиционными достижениями. Итоговая последовательность методики приведена на *Рисунке 7*.

## Глава 4. Информационная система прогнозного мониторинга пожарной опасности

Предлагаемая *информационная система прогнозного мониторинга пожарной опасности природных территорий России* в своей основе содержит методику геоинформационного моделирования явления. Она расширяет практическую ценность исследования, выполняя две сопутствующие задачи – мониторинга как ежесуточного моделирования пожарной опасности и распространения результатов.

Проектирование архитектуры 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.

С точки зрения реализации прототипа система представляет собой *монолитное модульное клиент-серверное веб-приложение на языке Python*. Такое архитектурное сочетание обладает большим потенциалом оперирования информацией (в том числе пространственно ориентированной) для решения различных тематических задач.

Для загрузки исходных данных используются *программные интерфейсы (API)* источников LP DAAC, ECMWF, USGS Earth Explorer и Geofabrik, позволяющие непрерывно получать геоинформационные продукты для последующего моделирования. Их подготовка для применения в нейронной сети осуществляется на основе тематических библиотек Python – *gdal* и *numpy*, оптимизирующих математические операции с растровыми данными. Нейросетевая обработка реализована с помощью библиотеки *keras*.

В качестве технологии реализации веб-приложения был использован инструмент веб-разработки *Django* – полнофункциональное решение на языке Python для внедрения информационных программ и их безопасного управления. Ее серверная часть управляет загрузкой и обработкой данных, а клиентская – доступом пользователей к результатам моделирования пожарной опасности. Размещение и визуализация пространственных данных обеспечиваются с помощью картографического сервера *GeoServer* и библиотеки *Leaflet* на языке JavaScript.

Для оперативного манипулирования данными организовано их структурированное хранение. На физическом уровне все файлы данных распределяются в строгой иерархической системе директорий, разработанной исходя из степени обработки и содержания продуктов. Объем памяти, необходимой для обеспечения непрерывного моделирования, составляет 1,2 ТБ. На логическом уровне через систему управления базами данных PostgreSQL реализованы классы данных, позволяющие оперировать файлами как слоями для отображения на карте.

В результате, *обширный набор технологий*, использованных для создания прототипа системы:

- соответствует современным тенденциям информационного обеспечения в отрасли геоинформатики, картографии и дистанционного зондирования;
- позволяет полностью автоматизировать последовательность методики для

непрерывного моделирования пожарной опасности;

- обеспечивает непрерывную связь с внешними элементами системы для сбора исходных пространственных данных и распространения результатов для последующего использования в смежных задачах;
- обладает перспективным потенциалом содержательного совершенствования без усложнения самой системы, что достигается за счет широких возможностей технологий, а также их собственного регулярного развития.

*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.

Таким образом, предложенная информационная система мониторинга потенциально пригодна для интегрирования с существующие системы *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 получении информации о пожарной опасности природных территорий России.

## 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 был 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 GMTEД2010 (*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 7*);
- 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 ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

**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 торфоразработок по данным дистанционного зондирования // Ломоносов-2016: Материалы межд. молодеж. науч. форума. — М.: МАКС Пресс, 2016.
6. *Гизатуллин А.Т.* Методика обнаружения потенциально пожароопасных

- торфоразработок на базе мониторинга по данным дистанционного зондирования // География: развитие науки и образования: Материалы ежегод. межд. науч.-практ. конф. LXXIX Герценовские чтения — Т. 1. — Изд-во РПГУ имени Герцена Санкт-Петербург, 2016. — С. 126-130.
7. **Гизатуллин А.Т.** Мониторинг горимости торфоразработок 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 торфоразработках 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 торфоразработок 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.