

НАУЧНО-АНАЛИТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОГЕННЫЕ РИСКИ
(ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ И ПРИКЛАДНЫЕ АСПЕКТЫ)

NATURAL AND MAN-MADE RISKS
(PHYSICO-MATHEMATICAL AND APPLIED ASPECTS)

№ 1 (57)–2026

Редакционный совет

- Зыбина О.А.**
Председатель
д.т.н., доц., Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия
- Матвеев А.В.**
Главный редактор
к.т.н., доц., Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, Россия
- Ивахнюк Г.К.**
д.х.н., проф., лауреат премии Правительства Рос. Федерации в области науки и техники, Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), Санкт-Петербург, Россия
- Минкин Д.Ю.**
д.т.н., проф., Санкт-Петербургский ГУП «Горэлектротранс», Санкт-Петербург, Россия
- Шарапов С.В.**
д.т.н., проф., Санкт-Петербургский Пожарно-спасательный колледж, Санкт-Петербург, Россия
- Грешных А.А.**
д.п.н., к.ю.н., проф., засл. работник высш. шк. Рос. Федерации, Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, Россия
- Максимов А.В.**
к.т.н., доц., Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, Россия
- Барбин Н.М.**
д.т.н., проф., почетный работник науки и техники, Уральский институт ГПС МЧС России, Екатеринбург, Россия; Научно-исследовательский институт физико-химических проблем и техносферной безопасности Уральского государственного аграрного университета, Екатеринбург, Россия
- Потапов А.И.**
д.т.н., проф., засл. деятель науки Рос. Федерации, лауреат Государственной премии Российской Федерации и премии Правительства Российской Федерации в области науки и техники Северо-Западный государственный заочный технический университет, Санкт-Петербург, Россия
- Сильников М.В.**
д.т.н., к.физ.-мат.н., проф., засл. деятель науки Рос. Федерации, Научно-производственное объединение специальных материалов, Санкт-Петербург, Россия
- Клюй В.В.**
к.п.н., доц., Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, Россия
- Кайбичев И.А.**
д.физ.-мат.н., доц., Уральский институт ГПС МЧС России, Екатеринбург, Россия
- Бурлов В.Г.**
д.т.н., проф., Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия
-

Лепешкин О.М.

д.т.н., доц., Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

Домничева А.В.
Секретарь

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-
Петербург, Россия

Редакционная коллегия

Онов В.А.
Председатель

к.т.н., доц., Санкт-Петербургский филиал Российской
таможенной академии, Санкт-Петербург, Россия

Дмитриева И.В.
Заместитель председателя

Санкт-Петербургская академия Следственного комитета Рос.
Федерации, Санкт-Петербург, Россия

Таранцев А.А.

д.т.н., проф., засл. работник высш. шк. Рос. Федерации, Институт
проблем транспорта им Н.С. Соломенко РАН, Санкт-Петербург,
Россия

Антюхов В.И.

к.т.н., проф., засл. работник высш. шк. Рос. Федерации, Санкт-
Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург,
Россия

Романов Н.Н.

к.т.н., доц., Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России,
Санкт-Петербург, Россия

Виноградов В.Н.

к.т.н., доц., Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России,
Санкт-Петербург, Россия

Болотова П.А.
Секретарь

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-
Петербург, Россия



Editorial council

- Zybina O.A.**
Chairman DSc, associate prof., Peter the Great Saint-Petersburg polytechnic university, Saint-Petersburg, Russia
- Matveev A.V.**
Editor-in-Chief PhD, associate prof., Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, Russia
- Ivakhnyuk G.K.** DSc, prof., laureate of the Russian Government prize. federation in the field of science and technology, Saint-Petersburg State technological institute (technical university), Saint-Petersburg, Russia
- Minkin D.Yu.** DSc, prof., Saint-Petersburg state unitary enterprise «Gorelektrotrans», Saint-Petersburg, Russia
- Sharapov S.V.** DSc, prof., Saint-Petersburg fire and rescue college, Saint-Petersburg, Russia
- Greshnykh A.A.** DSc, PhD, prof., honored worker of the higher school of the Russian Federation, Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, Russia
- Maksimov A.V.** PhD, associate prof., Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, Russia
- Barbin N.M.** DSc, prof., honored worker of science and technology, Ural institute of State fire service of EMERCOM of Russia, Yekaterinburg, Russia; Research institute of physico-chemical problems and technosphere safety of the Ural state agrarian university, Yekaterinburg, Russia
- Potapov A.I.** DSc, prof., honored scientist of the Russian Federation, winner of the state prize of the Russian Federation and the prize of the government of the Russian Federation in the field of science and technology of the North-Western state correspondence technical university, Saint-Petersburg, Russia
- Silnikov M.V.** DSc, PhD, prof., honored scientist of the Russian Federation, Scientific and production association of special materials, Saint-Petersburg, Russia
- Klyuj V.V.** PhD, associate prof., Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, Russia
- Kajbichev I.A.** DSc, associate prof., Ural institute of State fire service of EMERCOM of Russia, Yekaterinburg, Russia
- Burlov V.G.** DSc, prof., Russian state hydrometeorological university, Saint-Petersburg, Russia
- Lepeshkin O.M.** DSc, associate prof., Peter the Great Saint-Petersburg polytechnic university, Saint-Petersburg, Russia
- Domnicheva A.V.**
Secretary Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, Russia

Editorial board

Onov V.A. <i>Chairman</i>	PhD, associate prof., Saint-Petersburg branch of the Russian customs academy, Saint-Petersburg, Russia
Dmitrieva I.V. <i>Deputy chairman</i>	Saint-Petersburg academy of the Investigative committee of the Russian Federation, Saint-Petersburg, Russia
Tarantsev A.A.	DSc, prof., honored worker of the higher school of the Russian Federation, N.S. Solomenko institute of transport problems of the Russian academy of sciences, Saint-Petersburg, Russia
Antyukhov V.I.	PhD, prof., honored worker of the higher school of the Russian Federation, Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, Russia
Romanov N.N.	PhD, associate prof., Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, Russia
Vinogradov V.N.	PhD, associate prof., Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, Russia
Bolotova P.A. <i>Secretary</i>	Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, Russia

Полная или частичная перепечатка, воспроизведение, размножение
либо иное использование материалов, опубликованных в журнале
«Природные и техногенные риски (физико-математические и прикладные аспекты)»,
без письменного разрешения редакции не допускается

ББК Ц.9.3.2
УДК 504+614.8(051.2)

Отзывы и пожелания присылать по адресу: 196105, Санкт-Петербург, Московский проспект, 149. Редакция журнала «Природные и техногенные риски (физико-математические и прикладные аспекты)»; тел. (812) 645-20-35. E-mail: redakziaotdel@yandex.ru. Официальный интернет-сайт Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России: WWW.IGPS.RU; JOURNALS.IGPS.RU

ISSN 2307-7476

© Санкт-Петербургский университет Государственной
противопожарной службы МЧС России, 2026

СОДЕРЖАНИЕ

МОНИТОРИНГ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРИРОДНЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ РИСКОВ

- Остудин Н.В., Матвеев А.В., Савинова Е.С.** Прогнозирование пожарной опасности на основе нейросетевой обработки данных космического мониторинга..... 7
- Асташов Е.В., Паренкина В.И.** Численное моделирование динамики фронта лесного пожара с учетом влияния ветра и влажности материалов..... 18

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ЛИКВИДАЦИИ ПОСЛЕДСТВИЙ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ

- Красильников А.В., Немчинов М.С.** Применение роботизированных установок пожаротушения на складах нефтепродуктов..... 29

ИНЖЕНЕРНОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ

- Латуга А.С., Примакин А.И.** Применение методов линейного программирования для создания оптимальных маршрутов эвакуации населения с учетом опыта специальной военной операции 37
- Ахунова Д.Г.** Критерии оценки оптимальности размещения подразделений аварийно-спасательных служб..... 44
- Соров А.А., Худеева Ю.С., Бурмистрова Н.А.** Применение новых информационных технологий для обеспечения пожарной безопасности в торгово-развлекательных центрах 54
- Кондратков А.С., Усачева Т.В.** Выбор рационального способа эвакуации пострадавшего населения в пункты временного размещения в условиях ведения военных конфликтов 59
- Ильичева Ю.Р., Николаенко Е.В.** Использование методов математического моделирования в системе профессионального отбора абитуриентов 71
- Бархатов К.С., Гергов И.Х., Курданов Х.С., Арванова С.М.** Программный модуль имитационного моделирования распространения компьютерных вирусов в сети оповещения МЧС России на основе эпидемиологической PSIDR-модели 80

- Авторам журнала «Природные и техногенные риски (физико-математические и прикладные аспекты)»..... 94**

CONTENT

MONITORING AND FORECASTING OF NATURAL AND MAN-MADE RISKS

- Ostudin N.V., Matveev A.V., Savinova E.S.** Fire hazard forecasting based on neural network processing of space monitoring data 7
- Astashov E.V., Parenkina V.I.** Numerical modeling of the dynamics of a forest fire front taking into account the influence of wind and material moisture..... 18

PHYSICAL AND MATHEMATICAL ASPECTS ELIMINATION OF CONSEQUENCES EMERGENCY SITUATIONS

- Krasilnikov A.V.; Nemchinov M.S.** The use of robotic fire extinguishing systems in oil product warehouses 29

ENGINEERING AND INFORMATION SECURITY IN EMERGENCY SITUATIONS

- Latuga A.S.; Primakin A.I.** Application of linear programming methods to create optimal evacuation routes for the population, taking into account the experience of a special military operation 37

Akhunova D.G. Criteria for assessing the optimal placement of emergency rescue service units	44
Sorov A.F., Khudeeva I.S., Burmistrova N.A. Application of new information technologies for ensuring fire safety in shopping and entertainment centers	54
Kondratkov A.S., Usacheva T.V. Choosing a rational way to evacuate the affected population to temporary accommodation facilities in the context of military conflicts	59
Il'ichyeva Yu.R., Nikolaenko E.V. The use of mathematical modeling methods in the system of professional selection of applicants	71
Barkhatov K.S., Gergov I.K., Kurdanov K.S, Arvanova S.M. Software module for simulation modeling of computer virus propagation in the EMERCOM alert network based on the epidemiological PSIDR model	80
To the authors of the journal «Natural and man-made risks (physico-mathematical and applied aspects)».....	94

МОНИТОРИНГ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРИРОДНЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ РИСКОВ

Научная статья

УДК 004.8:614.8; DOI: 10.61260/2304-0130-2026-1-7-17

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ НА ОСНОВЕ НЕЙРОСЕТЕВОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ КОСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

✉ **Остудин Никита Вадимович.**

Главное управление «Национальный центр управления в кризисных ситуациях
МЧС России», Москва, Россия

Матвеев Александр Владимирович;

Савинова Екатерина Сергеевна.

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, Россия

✉ ostudin92@mail.ru

Аннотация. Посвящена исследованию возможностей применения технологий искусственного интеллекта при прогнозировании пожарной обстановки. Рассмотрены современные направления применения технологий искусственного интеллекта в системе антикризисного управления и проанализированы существующие решения в области использования данных дистанционного зондирования Земли для задач предупреждения чрезвычайных ситуаций. Предложен подход, включающий обработку статистических данных о термических точках, их визуализацию и последующее прогнозирование с применением методов машинного обучения и глубокого обучения. Разработана функциональная модель процесса преобразования исходных данных в показатели пожарной опасности, а также реализована визуализация результатов в виде тепловых карт. Практическая значимость работы заключается в ориентации, полученных результатов на поддержку принятия управленческих решений на муниципальном уровне.

Ключевые слова: искусственный интеллект, поддержка принятия решений, антикризисное управление, прогнозирование ЧС

Для цитирования: Остудин Н.В., Матвеев А.В., Савинова Е.С. Прогнозирование пожарной опасности на основе нейросетевой обработки данных космического мониторинга // Природные и техногенные риски (физико-математические и прикладные аспекты). 2026. № 1 (57). С. 7–17. DOI: 10.61260/2307-7476-2026-1-7-17

Scientific article

FIRE HAZARD FORECASTING BASED ON NEURAL NETWORK PROCESSING OF SPACE MONITORING DATA

✉ **Nikita V. Ostudin.****Main directorate «National crisis management center of EMERCOM of Russia», Moscow, Russia****Alexander V. Matveev;****Ekaterina S. Savinova.****Saint-Petersburg university of state fire service of EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, Russia**✉ *ostudin92@mail.ru*

Abstract. This article explores the potential of artificial intelligence technologies for fire risk forecasting. It examines current applications of artificial intelligence technologies in crisis management systems and analyzes existing solutions for using Earth remote sensing data for emergency prevention. An approach is proposed that includes processing statistical data on heat points, visualizing them, and then forecasting them using machine learning and deep learning methods. A functional model for converting raw data into fire hazard indicators has been developed, and the results are visualized in the form of heat maps. The practical significance of this study lies in its potential to support management decision-making at the municipal level.

Keywords: artificial intelligence, decision support, crisis management, emergency forecasting

For citation: Ostudin N.V., Matveev A.V., Savinova E.S. Fire hazard forecasting based on neural network processing of space monitoring data // Prirodnye i tekhnogennye riski (fiziko-matematicheskie i prikladnye aspekty) = Natural and man-made risks (physico-mathematical and applied aspects). 2026. № 1 (57). P. 7–17. DOI: 10.61260/2307-7476-2026-1-7-17

Введение

В последние годы наблюдается устойчивое расширение границ применения технологий искусственного интеллекта (ИИ) в системе антикризисного управления, что обусловлено возрастающей сложностью природно-техногенных угроз и необходимостью оперативного принятия управленческих решений в условиях неопределенности. Интеграция методов машинного обучения и нейросетевой обработки данных в процессы мониторинга и прогнозирования чрезвычайных ситуаций (ЧС) позволяет существенно повысить точность оценок и повысить оперативность реагирования. Особое значение приобретает использование интеллектуальных алгоритмов для анализа больших массивов разнородной информации, включая данные космического мониторинга, что открывает новые возможности для раннего выявления опасных процессов и минимизации их последствий [1–3].

Наиболее популярными направлениями является применение голосовых и интеллектуальных помощников, идентификации объектов по изображениям, а также построения прогностических моделей, основанных на статистике [4].

Применение технологий ИИ в системе антикризисного управления является ключевым фактором повышения обоснованности и оперативности принятия решений за счет интеллектуальной обработки больших объемов разнородных данных и выявления скрытых закономерностей развития ЧС [5, 6].

В настоящий момент технологии ИИ в системе антикризисного управления в области безопасности в ЧС применяется при решении следующих задач:

1. Сервис детектирования структуры ледовой поверхности по космическим снимкам с целью выявления возможных заторных и зажорных явлений (рис. 1).

2. Сервис анализа рисков перехода термической точки на населенный пункт. По результатам статистической обработки осуществляется обучение нейронной сети,

Природные и техногенные риски (физико-математические и прикладные аспекты). № 1 (57)–2026 <http://journals.igps.ru> которая на выходе даёт вероятностный показатель, отражающий риск перехода опасны факторов природного пожара на населенный пункт. Учитывает такие показатели, как направление и скорость ветра, расстояние и азимут от термической точки до населенного пункта, класс пожарной опасности и др. (рис. 2).

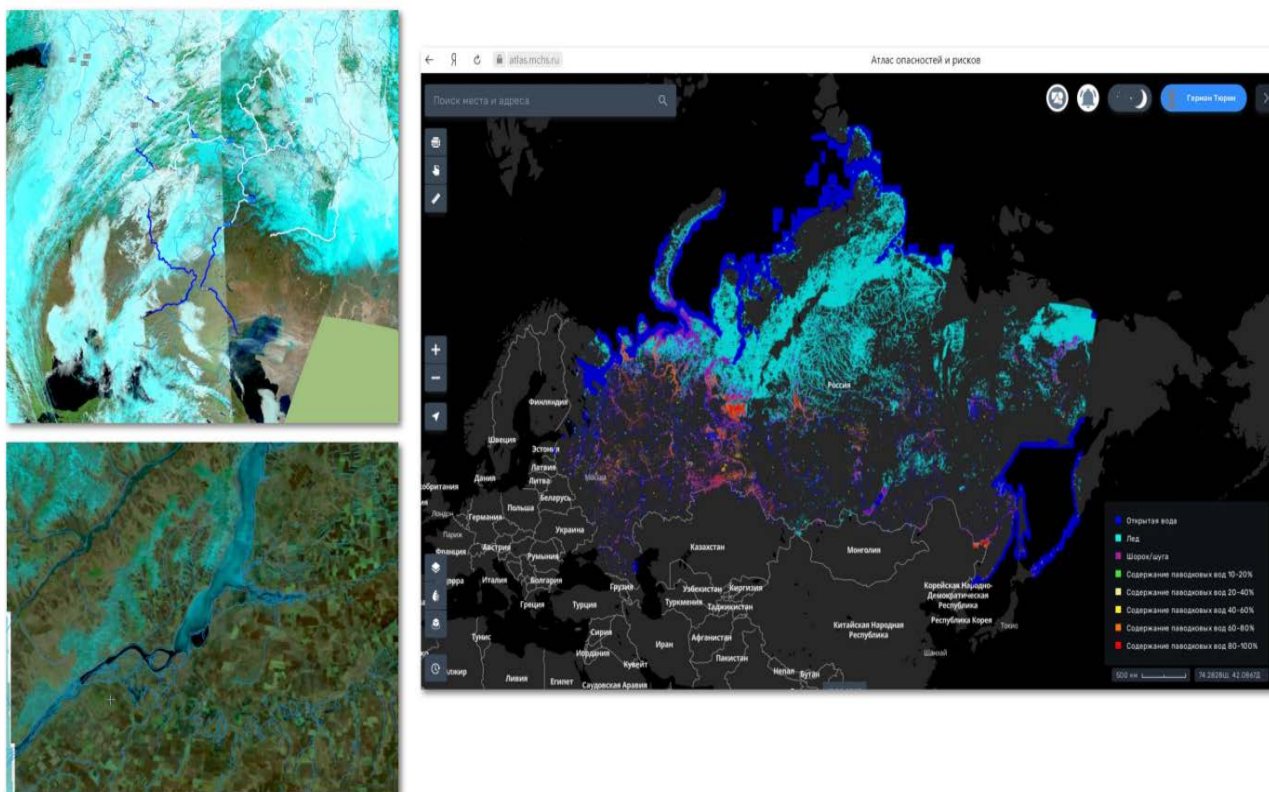


Рис. 1. Сервис детектирования структуры льда в ИС «Атлас опасностей и рисков»

Термические точки

Дата: 16.07.2025 - 17.07.2025

Центральный округ: Приволжский

Субъект: - Лейб

Район: - Лейб

Источники: - Лейб

Номер: - Лейб

Вышний этаж: - Лейб

Пожар: - Лейб

Статус: - Лейб

Высота здания: - Лейб

Сторона: - Лейб

Сторона: - Лейб

Контроль	Номер	Вышний этаж	Пожар	Статус	Субъект	Район	Населенный пункт	Уровень риска	Дата	Обнаружено	Объявлено на портале	Отметочный момент	Планируемые мероприятия	Ответственный
●	340302	3406530			Республика Татарстан	Дрожжовский	Новая Заровка 0 м, 290°	75%	17.07.2025	17.07.2025 11:17 (01:17 МСК)	17.07.2025 13:05 (13:05 МСК)	-	-	Не назначен
●	340341	3406469		Подтвердился	Оренбургская область	Гайский	Ирвинский 802 м, 191°	85%	16.07.2025	16.07.2025 11:36 (01:36 МСК)	16.07.2025 14:00 (14:00 МСК)	16.07.2025 14:02 (14:02 МСК)	-	Людмила Леонидовна Александрова
●	340397	3406527	47941	Подтвердился	Оренбургская область	Белевский	Данское 1742 м, 154°	85%	17.07.2025	17.07.2025 10:56 (00:56 МСК)	17.07.2025 12:35 (12:35 МСК)	17.07.2025 12:40 (12:40 МСК)	-	Человек Виктор Александрович
●	340339	3406466		Подтвердился	Республика Татарстан	Муслимовский	Муслюмово 3206 м, 179°	85%	16.07.2025	16.07.2025 11:13 (01:13 МСК)	16.07.2025 13:24 (13:24 МСК)	16.07.2025 13:41 (13:41 МСК)	16.07.2025 13:48 (13:48 МСК)	Березина Мария Александровна
●	340303	3406531		Подтвердился	Саратовская область	Петровский	Верный 5052 м, 179°	50%	17.07.2025	17.07.2025 11:17 (01:17 МСК)	17.07.2025 13:06 (13:06 МСК)	17.07.2025 13:20 (13:20 МСК)	-	Жидков Дмитрий Николаевич
●	340301	3406526	47941	Подтвердился	Оренбургская область	Белевский	Красноярск 429 м, 225°	47%	17.07.2025	17.07.2025 10:56 (00:56 МСК)	17.07.2025 12:36 (12:36 МСК)	17.07.2025 12:38 (12:38 МСК)	-	Человек Виктор Александрович
●	340348	3406476		Не подтвердился	Республика Чувашия	Марьевско-Посадский	Большое Матвеево 130 м, 239°	42%	16.07.2025	16.07.2025 11:36 (01:36 МСК)	16.07.2025 14:01 (14:01 МСК)	16.07.2025 14:06 (14:06 МСК)	16.07.2025 17:07 (17:07 МСК)	Селиванов Александр Валентинович
●	340342	3406472		Не подтвердился	Оренбургская область	пр-д Средин	Красный Партизан 93 м, 279°	44%	16.07.2025	16.07.2025 11:36 (01:36 МСК)	16.07.2025 14:00 (14:00 МСК)	16.07.2025 14:22 (14:22 МСК)	-	Человек Юрий Николаевич
●	340399	3406523	47941	Подтвердился	Оренбургская область	Белевский	Красноярск 734 м, 333°	38%	17.07.2025	17.07.2025 10:56 (00:56 МСК)	17.07.2025 12:35 (12:35 МСК)	17.07.2025 12:36 (12:36 МСК)	-	Человек Виктор Александрович
●	340345	3406474		Подтвердился	Республика Татарстан	Алексейский	Большой Аял 1247 м, 272°	38%	16.07.2025	16.07.2025 11:36 (01:36 МСК)	16.07.2025 14:00 (14:00 МСК)	16.07.2025 14:11 (14:11 МСК)	16.07.2025 14:35 (14:35 МСК)	Беленко Рамиль Геннадьевич

Рис. 2. Сервис анализа рисков в подсистеме уведомления о термических точках

3. Прогностическая модель, разработанная институтом прикладного искусственного интеллекта «Сколково», отражающая зоны с повышенным температурным фоном, которая базируется на космических снимках и учитывает различные метеорологические и антропогенные параметры (рис.3).

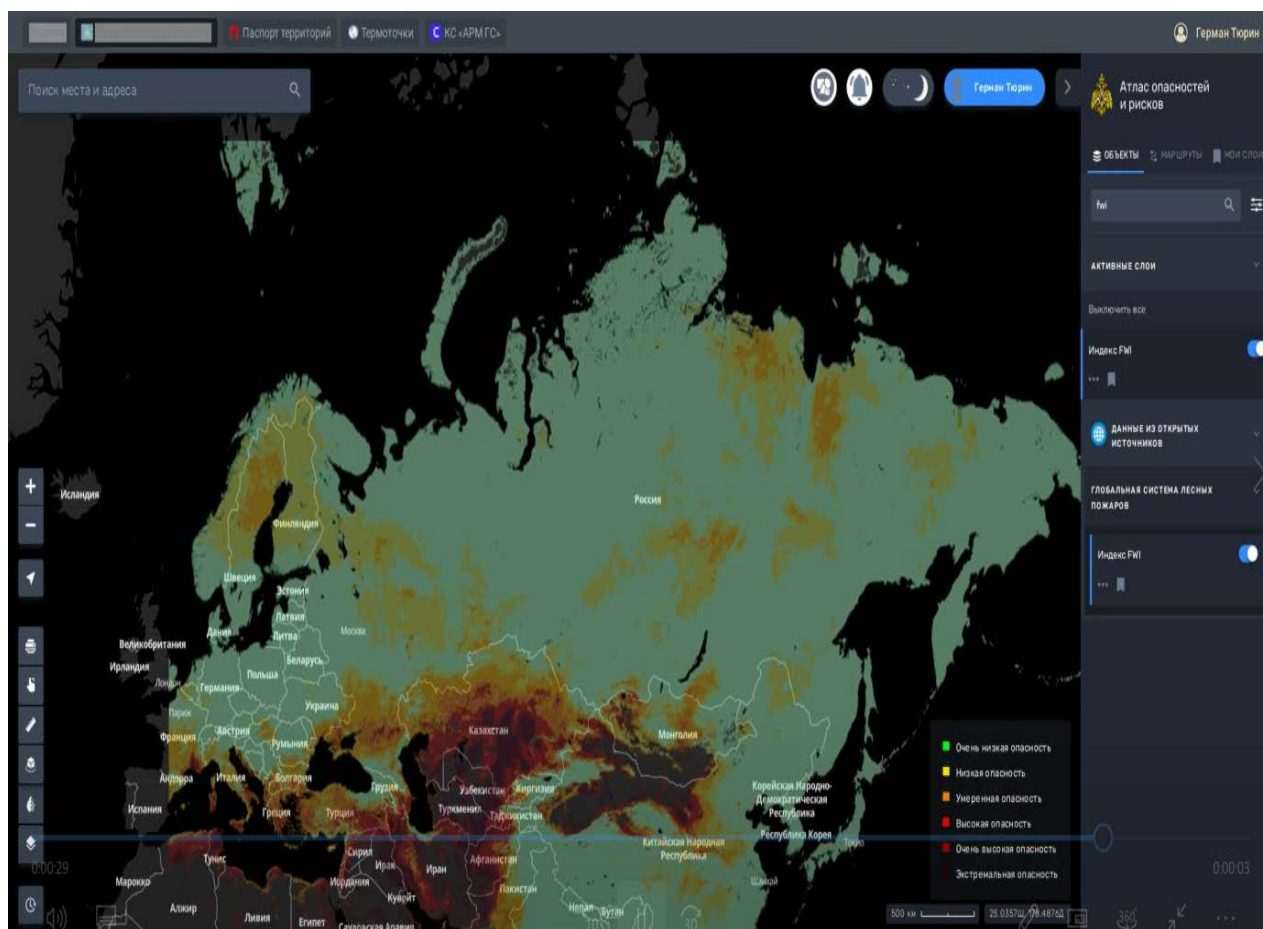



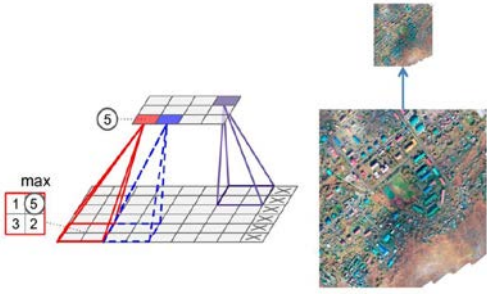
Рис. 3. Визуальная реализация прогностической модели «Сколково» в ИС «Атлас опасностей и рисков»

Помимо этого, в МЧС России за последнее время были выполнены две научно-исследовательские работы, связанные с применением технологий искусственного интеллекта (табл.).

Вместе с тем, несмотря на достигнутые успехи, существующие решения в основном ориентированы на решение задач классификации и прогнозирования и в меньшей степени направлены на поддержку принятия управленческих решений. Кроме того, существующие инструменты не позволяют в полной мере разработать рекомендации для конкретных должностных лиц муниципальных образований. Особую актуальность приобретает проблема недостаточной ориентированности существующих интеллектуальных систем на практические потребности должностных лиц муниципального уровня. В большинстве случаев результаты нейросетевого анализа представлены в виде вероятностных оценок или карт распределения риска, что требует дополнительной интерпретации и не обеспечивает выработку конкретных рекомендаций для принятия управленческих решений.

Отсутствие инструментов, способных трансформировать результаты обработки данных космического мониторинга в прикладные, адресные рекомендации для органов местного самоуправления, существенно ограничивает эффективность использования современных технологий ИИ в системе предупреждения и ликвидации ЧС. Это обстоятельство определяет необходимость разработки новых подходов к прогнозированию пожарной опасности, ориентированных не только на повышение точности моделей, но и на их интеграцию в практику управленческой деятельности на муниципальном уровне.

Научно-исследовательские работы в области применения технологий искусственного интеллекта в сфере безопасности в ЧС

Подразделение, выполнявшее работу	Тематика работы	Результаты внедрения
ФГБВОУ ВО «Академия гражданской защиты МЧС России»	Разработка научно обоснованных моделей прогнозирования природных пожаров на основе данных дистанционного зондирования Земли	 <p align="center">Инструмент в Атласе опасностей и рисков</p>
Воронежский институт повышения квалификации сотрудников ГПС МЧС России	Исследования в области совершенствования технологий автоматизированного детектирования объектов на основе данных дистанционного зондирования Земли	 <p align="center">Инструмент по детектированию объектов</p>

Методы исследования

В рамках настоящего исследования для обработки и анализа исходных статистических данных применяется инструментальный язык программирования Python, обладающий широкими возможностями для работы с большими массивами разнородной информации. В частности, обработка данных космического мониторинга, а также сопутствующих метеорологических и геопространственных параметров осуществляется с использованием библиотеки *Pandas*, обеспечивающей механизмы структурирования, фильтрации, агрегации и трансформации данных. Применение данного инструмента позволяет реализовать предварительную очистку данных, устранение пропусков, нормализацию показателей и формирование выборок, необходимых для последующего анализа и обучения нейросетевых моделей.

Визуализация результатов исследования и построение графических интерпретаций осуществляется с использованием библиотеки *Matplotlib*. Данный инструмент используется для отображения временных рядов, распределений показателей пожарной опасности, а также для представления результатов моделирования в наглядной форме. Построение графиков и диаграмм позволяет выявлять скрытые закономерности в данных, проводить сравнительный анализ различных сценариев и повышать интерпретируемость полученных результатов.

Результаты исследования

В результате проведенного исследования получены аналитические и визуальные представления, характеризующие пространственно-временную динамику термических аномалий, а также разработана функциональная модель обработки данных, ориентированная на формирование показателей пожарной опасности на муниципальном уровне.

На первом этапе выполнена визуализация суммарного количества термических точек по районам и месяцам на примере Красноярского края (рис. 4). В качестве атрибутов выгрузки выбраны пространственно-временные параметры (дата возникновения, субъект России, район).

На втором этапе проведена визуализация максимальных значений по термическим точкам за субъект распределённый по годам на примере Республики Саха (Якутия), представленная на рис. 5. Анализ временных рядов показал наличие межгодовой вариативности, обусловленной как природно-климатическими факторами, так и антропогенным воздействием. Построенные зависимости позволяют проследить тенденции изменения пожарной активности, включая периоды экстремальных значений, что является важным для формирования прогностических моделей и оценки рисков возникновения ЧС.

Ключевым результатом исследования является разработка функциональной модели в нотации IDEF0, описывающей процесс преобразования исходных данных в показатели пожарной опасности (рис. 6). Входными параметрами модели выступают статистические данные о термических точках, а также данные по административно-территориальному делению субъектов Российской Федерации на муниципальные образования. В рамках модели реализуются процессы агрегации, пространственной привязки, анализа и интерпретации данных. На выходе формируются интегральные показатели пожарной опасности по районам, а также соответствующие визуальные представления в виде тепловых карт.

На следующем этапе реализовано прогнозирование пожарной опасности на основе методов машинного обучения и глубокого обучения. Для построения прогностических моделей использованы инструменты библиотеки *Scikit-learn*, позволяющие реализовать классические алгоритмы регрессии и классификации, включая методы случайного леса и градиентного бустинга. Дополнительно применена библиотека *XGBoost*, обеспечивающая высокоэффективную реализацию бустинговых алгоритмов, показавших высокую точность при работе с табличными данными и сложными нелинейными зависимостями.

Для учета временной динамики и сложных пространственно-временных зависимостей использованы нейросетевые подходы, реализованные с применением библиотек *TensorFlow* и *PyTorch*. В частности, были апробированы архитектуры глубоких нейронных сетей, включая рекуррентные и гибридные модели, ориентированные на обработку временных рядов и многомерных признаков. Сравнительный анализ результатов моделирования показал, что использование ансамбля методов, сочетающего классические алгоритмы машинного обучения и нейросетевые подходы, позволяет повысить точность прогнозирования показателей пожарной опасности.

Для прогноза пожарной опасности могут быть использованы следующие инструменты:

Завершающим этапом является визуализация полученных результатов в виде тепловых карт с использованием библиотек *geopandas* (рис. 7) и *folium*. Применение геоинформационных инструментов позволяет осуществить пространственную интерпретацию рассчитанных показателей пожарной опасности, обеспечивая их наглядное представление в привязке к конкретным территориям. Построенные карты отражают степень риска возникновения пожаров по районам и позволяют оперативно выявлять зоны повышенной опасности. Интерактивный характер визуализации способствует повышению удобства восприятия информации и расширяет возможности ее использования в практической деятельности органов управления.



Рис. 4. Визуализация суммарного количества термических точек по районам и месяцам на примере Красноярского края

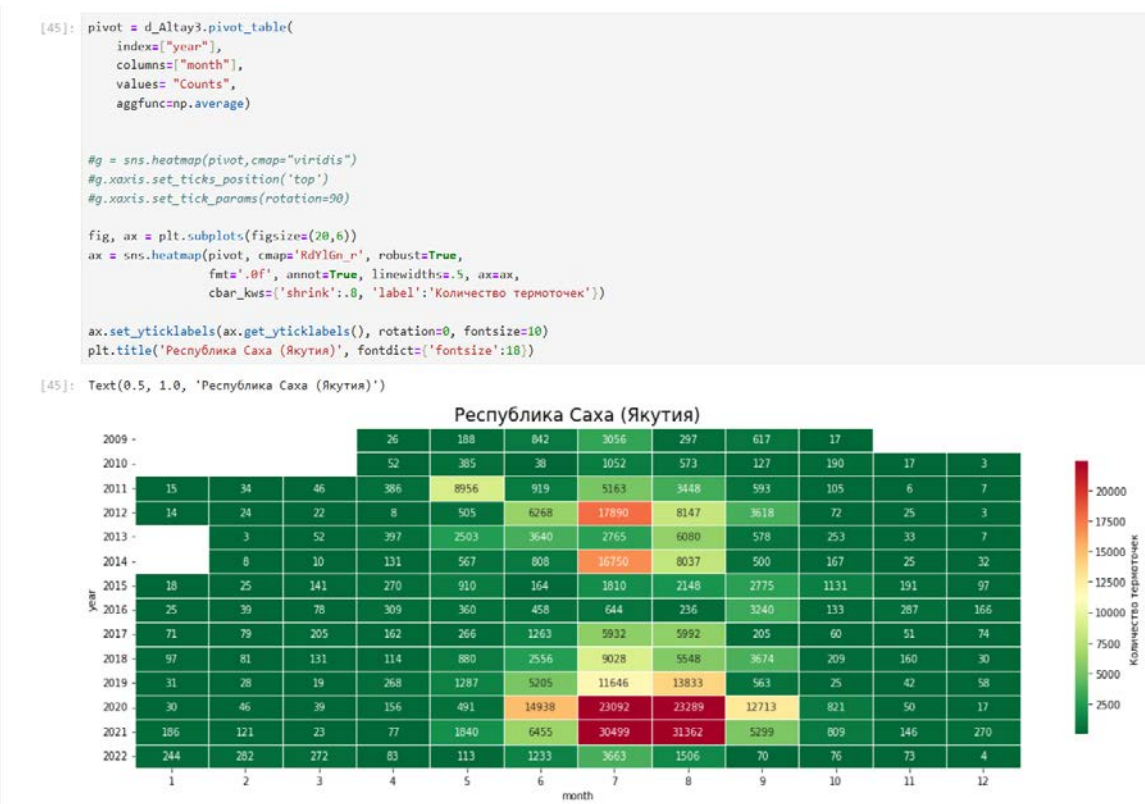


Рис. 5. Визуализация суммарного количества термических точек за месяц по годам на примере Республики Саха (Якутия)

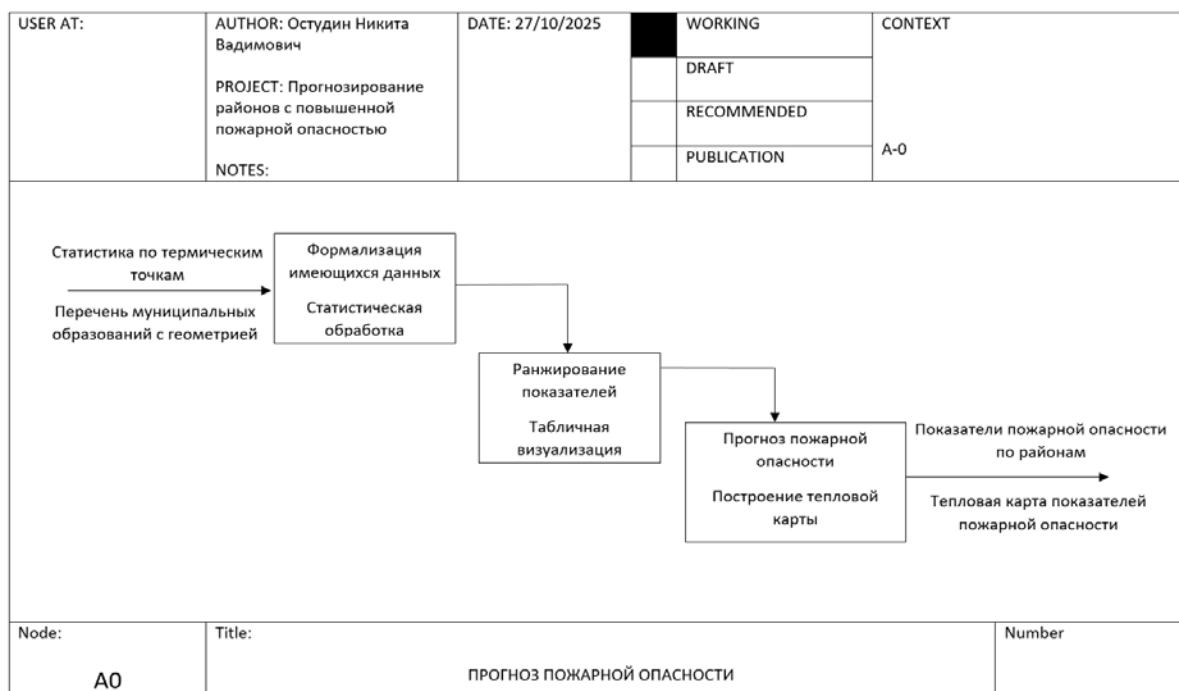


Рис. 6. Функциональная модель IDEF0

Построенные тепловые карты могут служить исходными данными для выработки рекомендаций для должностных лиц муниципальных образований в части организации превентивных мероприятий.

Таким образом, полученные результаты демонстрируют эффективность предложенного подхода к обработке данных космического мониторинга, включая этап прогнозирования на основе современных методов машинного обучения и глубокого обучения, и подтверждают возможность его применения для решения задач прогнозирования пожарной опасности с последующей поддержкой принятия управленческих решений на муниципальном уровне.

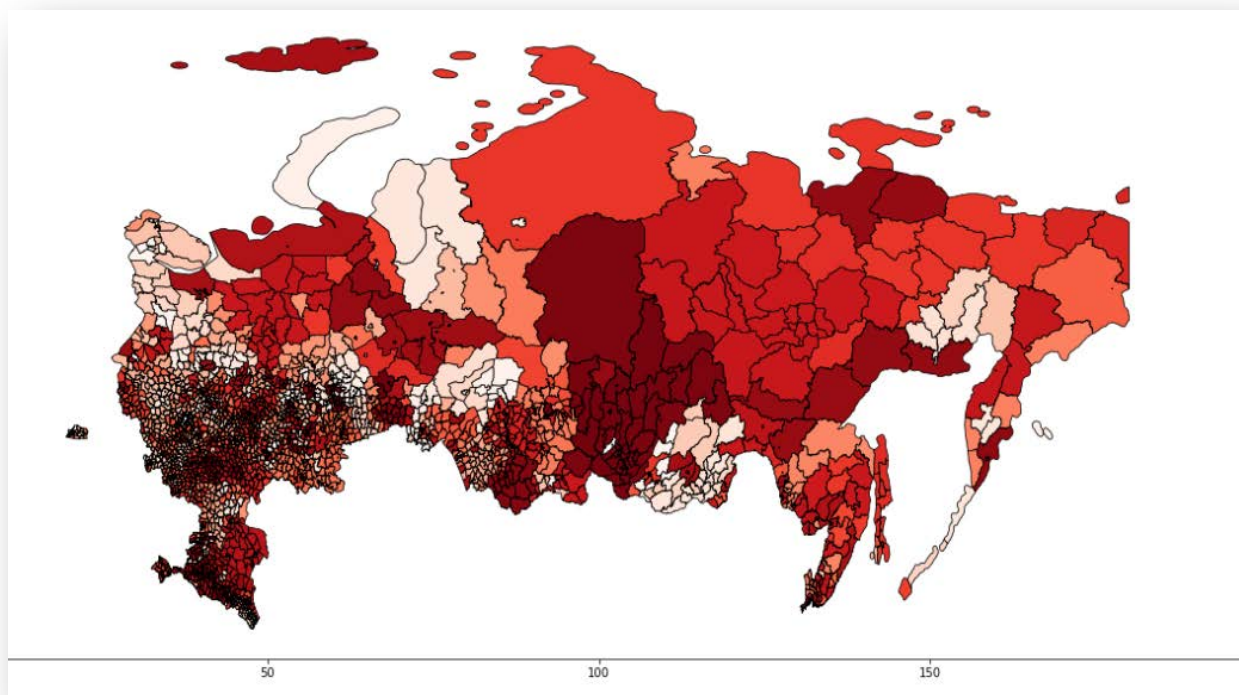


Рис. 7. Визуализация тепловой карты с использованием geandas

Заключение

В рамках проведенного исследования рассмотрены возможности применения технологий искусственного интеллекта для прогнозирования пожарной опасности на основе данных космического мониторинга. Показано, что интеграция методов машинного обучения и нейросетевой обработки данных позволяет существенно повысить информативность и аналитическую ценность данных дистанционного зондирования Земли при решении задач антикризисного управления.

В работе выполнен анализ существующих подходов к использованию ИИ в сфере предупреждения чрезвычайных ситуаций, выявлены их ограничения, связанные с недостаточной ориентированностью на поддержку принятия управленческих решений на муниципальном уровне. В этой связи предложен подход, основанный на комплексной обработке статистических данных о термических точках с последующей их агрегацией, анализом и визуализацией.

Таким образом, предложенный подход обеспечивает переход от анализа данных к поддержке принятия решений, что является важным шагом в развитии интеллектуальных систем антикризисного управления. Практическая значимость исследования заключается в возможности использования разработанных решений в деятельности органов управления для повышения эффективности профилактических мероприятий и снижения рисков возникновения природных пожаров.

В качестве направлений дальнейших исследований целесообразно рассматривать развитие методов интерпретации результатов нейросетевых моделей, а также разработку механизмов автоматизированной генерации управленческих рекомендаций для должностных лиц муниципальных образований с учетом специфики территорий и текущей оперативной обстановки.

Список источников

1. Остудин Н.В., Бутузов С.Ю. Методологические основы анализа рисков возникновения природных пожаров на основе данных космического мониторинга // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». 2020. № 3. С. 117–126.
2. Системный подход к информационно-аналитической поддержке органов повседневного управления Единой государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций на основе учета плановой и оперативной информации / Остудин Н.В. [и др.] // Природные и техногенные риски (физико-математические и прикладные аспекты). 2024. № 3 (51). С. 28–37. DOI 10.61260/2307-7476-2024-3-28-37
3. Макарова Д.С., Бутузов С.Ю., Остудин Н.В. Использование системы космического мониторинга при принятии управленческих решений // Материалы междунар. науч.-технич. конф. «Системы безопасности». 2022. № 31. С. 56–58.
4. Матвеев А.В., Медведев Д.В., Смирнов А.С. Возможности применения технологий искусственного интеллекта для повышения эффективности управления в чрезвычайных ситуациях // Информатизация и связь. 2025. № 4. С. 98–111. DOI 10.34219/2078-8320-2025-16-4-98-111
5. Антюхов В.И., Остудин Н.В. Моделирование процесса интеллектуальной поддержки деятельности должностных лиц центров управления в кризисных ситуациях МЧС России при принятии управленческих решений // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». 2017. № 2. С. 78–93.
6. Медведев Д.В., Матвеев А.В. Алгоритмы интеллектуальной поддержки принятия управленческих решений при угрозах лесных пожаров // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». 2025. № 2. С. 35–48. DOI 10.61260/2218-130X-2025-2-35-48

References

1. Ostudin N.V., Butuzov S.YU. Metodologicheskie osnovy analiza riskov vozniknoveniya prirodnyh pozharov na osnove dannyh kosmicheskogo monitoringa // Nauchno-analiticheskij zhurnal «Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta Gosudarstvennoj protivopozharnoj sluzhby MCHS Rossii». 2020. № 3. S. 117–126.
2. Sistemnyj podhod k informacionno-analiticheskoy podderzhke organov povsednevnogo upravleniya Edinoj gosudarstvennoj sistemy preduprezhdeniya i likvidacii chrezvychajnyh situacij na osnove ucheta planovoj i operativnoj informacii / Ostudin N.V. [i dr.] // Prirodnye i tekhnogennye riski (fiziko-matematicheskie i prikladnye aspekty). 2024. № 3 (51). S. 28–37. DOI 10.61260/2307-7476-2024-3-28-37
3. Makarova D.S., Butuzov S.YU., Ostudin N.V. Ispol'zovanie sistemy kosmicheskogo monitoringa pri prinyatii upravlencheskih reshenij // Materialy mezhdunar. nauch.-tekhnich. konf. «Sistemy bezopasnosti». 2022. № 31. S. 56–58.
4. Matveev A.V., Medvedev D.V., Smirnov A.S. Vozmozhnosti primeneniya tekhnologij iskusstvennogo intellekta dlya povysheniya effektivnosti upravleniya v chrezvychajnyh situacijah // Informatizaciya i svyaz'. 2025. № 4. S. 98–111. DOI 10.34219/2078-8320-2025-16-4-98-111
5. Antuhov V.I., Ostudin N.V. Modelirovanie processa intellektual'noj podderzhki deyatel'nosti dolzhnostnyh lic centrov upravleniya v krizisnyh situacijah MCHS Rossii pri prinyatii upravlencheskih reshenij // Nauchno-analiticheskij zhurnal «Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta Gosudarstvennoj protivopozharnoj sluzhby MCHS Rossii». 2017. № 2. S. 78–93.
6. Medvedev D.V., Matveev A.V. Algoritmy intellektual'noj podderzhki prinyatiya upravlencheskih reshenij pri ugrozah lesnyh pozharov // Nauchno-analiticheskij zhurnal «Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta Gosudarstvennoj protivopozharnoj sluzhby MCHS Rossii». 2025. № 2. S. 35–48. DOI 10.61260/2218-130X-2025-2-35-48

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 24.11.2025; одобрена после рецензирования: 15.02.2026; принята к публикации: 18.03.2026

Information about the article:

The article was submitted to the editorial office: 24.11.2025; approved after review: 15.02.2026; accepted for publication: 18.03.2026

Информация об авторах:

Остудин Никита Вадимович, начальник отдела пространственных данных управления космического мониторинга Главного управления «Национальный центр управления в кризисных ситуациях МЧС России» (121357, Москва, ул. Ватутина, д. 1, стр. 1), кандидат технических наук, e-mail: ostudin92@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-3208-7142>, SPIN-код: 4059-6056

Матвеев Александр Владимирович, заведующий кафедрой прикладной математики и безопасности информационных технологий Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), кандидат технических наук, доцент, e-mail: fcvega_10@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0778-3218>, SPIN-код: 5778-8821

Савинова Екатерина Сергеевна, заместитель начальника отдела обеспечения научно-технической деятельности НИИ перспективных исследований и инновационных технологий в области безопасности жизнедеятельности Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149)

Information about the authors:

Ostudin Nikita V., Head of the Spatial Data Department of the Space Monitoring Department of the Main Directorate «National Crisis Management Center of the Ministry of Emergency Situations of Russia» (121357, Moscow, Vatutina str., 1, p. 1), Candidate of Technical Sciences, e-mail: ostudin92@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-3208-7142>, SPIN: 4059-6056

Matveev Alexander V., head of the department of applied mathematics and information technology security Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), candidate of technical sciences, associate professor, e-mail: fcvega_10@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0778-3218>, SPIN: 5778-8821

Savinova Ekaterina S., deputy head of the department for support of scientific and technical activities of the Research institute of advanced research and innovative technologies in the field of life safety of the Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149)

Научная статья

УДК 004.942:519.6; DOI: 10.61260/2304-0130-2026-1-18-28

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ФРОНТА ЛЕСНОГО ПОЖАРА С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ВЕТРА И ВЛАЖНОСТИ МАТЕРИАЛОВ

✉Асташов Егор Владимирович;

Парёнкина Виктория Игоревна.

Академия ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, Россия

✉akutnev@inbox.ru

Аннотация. Разработана и верифицирована математическая модель для оперативного прогнозирования динамики лесных пожаров, основанная на системе уравнений в частных производных. Модель включает нестационарное уравнение теплопроводности, конвективный перенос тепла воздушными потоками и кинетику горения целлюлозных материалов с учетом влажности. Научная новизна работы заключается в адаптации физически обоснованного подхода теплотехники к задачам моделирования природных пожаров, что позволило учесть влияние метеорологических факторов и свойств горючих материалов. Реализован вычислительный алгоритм на основе неявной разностной схемы и метода прогонки. Установлены количественные зависимости: увеличение скорости ветра с 1 до 6 м/с приводит к росту скорости фронта в 4,3 раза, а повышение влажности с 5 % до 30 % снижает ее в 1,8 раза. Верификация на экспериментальных данных показала расхождение не более 12 %. Практическая значимость для МЧС России заключается в создании инструмента для прогнозирования времени подхода пожара к населенным пунктам и оптимизации тушения.

Ключевые слова: лесные пожары, математическое моделирование, уравнение теплопереноса, диффузионно-конвективная модель, скорость ветра, численные методы, прогнозирование распространения

Для цитирования: Асташов Е.В., Паренкина В.И. Численное моделирование динамики фронта лесного пожара с учетом влияния ветра и влажности материалов // Природные и техногенные риски (физико-математические и прикладные аспекты). 2026. № 1 (57). С. 18–28. DOI: 10.61260/2307-7476-2026-1-18-28

Scientific article

NUMERICAL MODELING OF THE DYNAMICS OF A FOREST FIRE FRONT TAKING INTO ACCOUNT THE INFLUENCE OF WIND AND MATERIAL MOISTURE

✉Astashov Egor V.;

Parenkina Victoria I.

Academy of the State fire service of the EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, Russia

✉akutnev@inbox.ru

Abstract. The paper developed and verified a mathematical model for the operational forecasting of the dynamics of forest fires, based on a system of partial differential equations. The model includes a non-stationary heat conduction equation, convective heat transfer by air flows, and the combustion kinetics of cellulose materials, taking into account the humidity. The scientific novelty of the work lies in the adaptation of a physically grounded approach of heat engineering to the problems of modeling natural fires, which allowed to take into account the influence of meteorological factors and the properties of combustible materials. A computational algorithm based on an implicit difference scheme and the method of forward sweep is implemented.

Quantitative relationships have been established: an increase in wind speed from 1 to 6 m/s leads to a 4.3-fold increase in front speed, while an increase in humidity from 5 % to 30 % reduces it by 1.8 times. Verification based on experimental data showed a discrepancy of no more than 12 %. The practical significance for the Russian Ministry of Emergency Situations is to create a tool for predicting the time it takes for a fire to reach populated areas and optimizing firefighting operations.

Keywords: forest fires, mathematical modeling, heat transfer equation, diffusion-convection model, wind speed, numerical methods, and spread prediction

For citation: Astashov E.V., Parenkina V.I. Numerical modeling of the dynamics of a forest fire front taking into account the influence of wind and material moisture // *Prirodnye i tekhnogennye riski (fiziko-matematicheskie i prikladnye aspekty)* = Natural and man-made risks (physico-mathematical and applied aspects). 2026. № 1 (57). P. 18–28. DOI: 10.61260/2307-7476-2026-1-18-28

Введение

Ежегодно на территории Российской Федерации регистрируется более 20 тысяч лесных пожаров, площадь которых превышает 3 млн гектаров. Экономический ущерб исчисляется миллиардами рублей, а экологические последствия оказывают долгосрочное воздействие на состояние атмосферы и биосферы. В условиях изменения климата проблема лесных пожаров приобретает особую остроту, требуя разработки эффективных методов прогнозирования и противодействия.

Для органов МЧС России задача оперативного прогнозирования развития лесных пожаров является критически важной при планировании эвакуационных мероприятий, развертывании сил и средств тушения, а также при принятии решений о введении особого противопожарного режима. Существующие методы прогнозирования, регламентированные нормативными документами [1], зачастую основаны на эмпирических зависимостях и не учитывают в полной мере физику процессов теплопереноса в лесных горючих материалах.

В настоящее время для моделирования лесных пожаров применяются различные подходы: от эмпирических моделей Ротермеля [2] до сложных вычислительных комплексов на основе методов вычислительной гидродинамики (CFD-модели) [3]. Эмпирические модели, несмотря на простоту реализации, обладают ограниченной точностью при изменении внешних условий. Полные CFD-модели требуют значительных вычислительных ресурсов, что затрудняет их оперативное использование.

Цель нашей работы – разработка математической модели и программного комплекса для прогнозирования динамики фронта лесного пожара, основанной на фундаментальных уравнениях теплопереноса и учитывающей ключевые факторы: скорость ветра и влажность лесных горючих материалов.

Математическая модель и методы исследования

В основе разработанной математической модели лежит фундаментальное уравнение теплопереноса, модифицированное для учета специфики распространения лесного пожара. Рассматривается одномерная постановка задачи, предполагающая распространение фронта горения по участку лесного массива длиной L . Процесс описывается нестационарным уравнением теплопроводности, дополненным членами, учитывающими конвективный перенос тепла воздушными потоками и экзотермическую реакцию горения целлюлозных материалов:

$$\frac{\partial(\rho c_p T)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) - v_w \frac{\partial T}{\partial x} + Q_g(T, \eta), \quad (1)$$

где $T = T(x, t)$ представляет температурное поле как функцию координаты x и времени t , ρ характеризует плотность лесного горючего материала, c_p – удельную теплоемкость, λ – коэффициент теплопроводности слоя лесных горючих материалов, v_w – скорость ветрового потока, а $Q_g(T, \eta)$ описывает объемную мощность тепловыделения при горении.

Мощность тепловыделения моделируется с использованием аппарата химической кинетики, где скорость реакции подчиняется закону Аррениуса и зависит от степени увлажнения материала:

$$Q_g(T, \eta) = Q_0(1 - \eta)e^{-\frac{E_a}{R(T+273)}}H(T - T_{\text{воспл}}), \quad (2)$$

В данном выражении Q_0 определяет максимально возможную мощность тепловыделения, η – относительную влажность лесных горючих материалов, E_a – энергию активации процесса пиролиза, R – универсальную газовую постоянную, $T_{\text{воспл}}$ – критическую температуру воспламенения, а H – функцию Хевисайда, обеспечивающую активацию источника тепла только после достижения температуры воспламенения.

Начальные условия предполагают равномерное распределение температуры по всему расчетному участку с локализованным источником зажигания:

$$T(x, 0) = T_0 + (T_{\text{воспл}} - T_0)e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}, \quad (3)$$

где T_0 соответствует начальной температуре окружающей среды, а параметр σ определяет размер области начального зажигания.

Граничные условия формулируются следующим образом: на левой границе поддерживается температура источника зажигания:

$$T(0, t) = T_{\text{воспл}}, \quad (4)$$

В то время как на правой границе принимается условие теплоизоляции:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=L} = 0, \quad (5)$$

что физически соответствует отсутствию теплового воздействия за пределами расчетной области.

Для численного решения сформулированной краевой задачи применяется неявная разностная схема, обеспечивающая безусловную устойчивость при произвольном шаге по времени. Пространственная область дискретизируется на N узлов с постоянным шагом $\Delta x = \frac{l}{N-1}$, временная область – с шагом Δt . Разностный аналог дифференциального уравнения записывается в виде:

$$\rho_i c_{p,i} \frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\Delta t} = \frac{1}{\Delta x} \left(\lambda_{i+\frac{1}{2}} \frac{T_{i+1}^{n+1} - T_i^n}{\Delta x} - \lambda_{i-\frac{1}{2}} \frac{T_i^{n+1} - T_{i-1}^n}{\Delta x} \right) - v_w \frac{T_i^{n+1} - T_{i-1}^n}{\Delta x} + Q_{g,i}^{n+1}, \quad (6)$$

Для каждого внутреннего узла сетки $i = 1, 2, \dots, N-1$ уравнение (6) формирует систему из $N-1$ линейных уравнений относительно неизвестных температур T_i^{n+1} на новом временном слое. К этим уравнениям добавляются два граничных условия: при $i = 0$ выполняется условие (4) в виде $T_0^{n+1} = T_{\text{воспл}}$, а при $i = N$ применяется условие теплоизоляции (5), которое в разностной форме записывается как $T_N^{n+1} = T_{N-1}^{n+1}$. Таким

образом, полная система состоит из $N + 1$ линейных алгебраических уравнений с $N + 1$ неизвестными значениями температуры.

Коэффициенты теплопроводности на гранях ячеек вычисляются с использованием гармонического осреднения

$$\lambda_{i+\frac{1}{2}} = \frac{2\lambda_i\lambda_{i+1}}{\lambda_i + \lambda_{i+1}},$$

что обеспечивает выполнение условий сопряжения на границах раздела сред с различными теплофизическими свойствами.

Полученная система линейных алгебраических уравнений (4)–(6) относительно температур на новом временном слое T_i^{n+1} характеризуется трехдиагональной структурой матрицы коэффициентов, что позволяет эффективно решать ее методом прогонки. Критерием достижения фронтом пожара точки с координатой x считается выполнение условия $T(x, t) \geq T_{\text{воспл}}$.

Положение фронта пожара $x_f(t)$ определяется как максимальная координата, в которой температура превышает температуру воспламенения:

$$x_f(t) = \max\{x \in [0, L]: T(x, t) \geq T_{\text{воспл}}\} \quad (7)$$

Скорость распространения фронта определяется как производная от положения фронта по времени $v_f = \frac{dx_f}{dt}$ и вычисляется численным дифференцированием полученного решения.

Программная реализация

Для численного решения системы уравнений (1)–(7) разработан специализированный программный комплекс на языке Python, реализующий неявную разностную схему с применением метода прогонки. Основу вычислительного ядра составляет класс ForestFireModel (рис. 1), инкапсулирующий параметры лесных горючих материалов и методы расчета.

```

1 usage
2
3 class ForestFireModel:
4     def __init__(self, L=200.0, Nx=200, t_max=3600, dt=0.5):
5         self.L = L
6         self.Nx = Nx
7         self.dx = L / (Nx - 1)
8         self.x = np.linspace(start=0, L, Nx)
9         self.t_max = t_max
10        self.dt = dt
11
12        # Параметры для реалистичного распространения
13        self.rho = 15.0 # плотность, кг/м³ (лесная подстилка)
14        self.cp = 1200.0 # теплоемкость, Дж/(кг·°C)
15        self.lambda_ = 0.08 # теплопроводность, Вт/(м·°C)
16        self.T_ign = 300.0 # температура воспламенения, °C
17        self.Q0 = 8.0e6 # мощность тепловыделения, Вт/м³
18        self.E_a = 50000 # энергия активации, Дж/моль
19        self.R = 8.314 # газовая постоянная
20        self.sigma_ign = 15.0 # область начального зажигания
21
22

```

Рис. 1. Программная реализация класса ForestFireModel

Реализация мощности тепловыделения согласно уравнению (2) включает закон Аррениуса и учет влажности материалов (рис. 2)

```

1 usage
27 def Q_combustion(self, T, moisture):
28     """Расчет мощности тепловыделения при горении"""
29     if T < self.T_ign:
30         return 0.0
31     else:
32         # модель с более интенсивным горением
33         arrhenius = np.exp(-self.E_a / (self.R * (T + 273.15)))
34         return self.Q0 * (1 - moisture) * arrhenius * (T / self.T_ign) ** 3
--

```

Рис. 2. Программная реализация функции Q_combustion

Для решения трехдиагональной системы уравнений (6) применен устойчивый метод прогонки (рис. 3), обеспечивающий безусловную сходимость при произвольном шаге по времени.

```

1 usage
36 def thomas_algorithm(self, a, b, c, d):
37     """Реализация метода прогонки для трехдиагональной матрицы"""
38     n = len(d)
39     cp = np.zeros(n - 1)
40     dp = np.zeros(n)
41
42     # Прямой ход
43     cp[0] = c[0] / b[0]
44     dp[0] = d[0] / b[0]
45
46     for i in range(1, n - 1):
47         denom = b[i] - a[i - 1] * cp[i - 1]
48         cp[i] = c[i] / denom
49         dp[i] = (d[i] - a[i - 1] * dp[i - 1]) / denom
50
51     dp[n - 1] = (d[n - 1] - a[n - 2] * dp[n - 2]) / (b[n - 1] - a[n - 2] * cp[n - 2])
52
53     # Обратный ход
54     T = np.zeros(n)
55     T[n - 1] = dp[n - 1]
56     for i in range(n - 2, -1, -1):
57         T[i] = dp[i] - cp[i] * T[i + 1]

```

Рис. 3. Программная реализация метода прогонки

Основной алгоритм решения реализует итерационный процесс с дискретизацией по времени и пространству (рис. 4). На каждом временном шаге формируется матрица коэффициентов, учитывающая диффузионный и конвективный перенос тепла, а также нелинейный источник тепловыделения.

```

91     for i in range(self.Nx):
92         Q_comb = self.Q_combustion(T[i], moisture)
93
94         if i == 0:
95             # Граничное условие
96             b[i] = 1.0
97             c[i] = 0.0
98             d[i] = 600
99         elif i == self.Nx - 1:
100             # Условие теплоизоляции
101             a[i - 1] = -self.lambda_ / self.dx ** 2
102             b[i] = self.rho * self.cp / self.dt + self.lambda_ / self.dx ** 2
103             d[i] = self.rho * self.cp * T[i] / self.dt + Q_comb
104         else:
105             # Внутренние узлы с учетом ветра
106             conv_term = wind_speed / self.dx
107             a[i - 1] = -self.lambda_ / self.dx ** 2 - conv_term

```

Рис. 4. Программная реализация формирования матрицы коэффициентов

Положение фронта горения определяется согласно уравнению (7) как максимальная координата, в которой температура превышает точку воспламенения (рис. 5).

```

1 usage
61 def calculate_front_position(self, T):
62     """Определение положения фронта пожара"""
63     # Находим последний узел, где температура превышает температуру воспламенения
64     for i in range(len(T) - 1, -1, -1):
65         if T[i] >= self.T_ign:
66             return self.x[i]
67     return 0.0

```

Рис. 5. Программная реализация функции `calculate_front_position`

Для комплексного анализа разработан модуль многовариантных расчетов (рис. 6), позволяющий исследовать влияние различных факторов.

```

136 scenarios = [
137     {'wind_speed': 1.0, 'moisture': 0.15, 'label': 'Слабый ветер 1 м/с'},
138     {'wind_speed': 3.0, 'moisture': 0.15, 'label': 'Умеренный ветер 3 м/с'},
139     {'wind_speed': 6.0, 'moisture': 0.15, 'label': 'Сильный ветер 6 м/с'},
140     {'wind_speed': 3.0, 'moisture': 0.05, 'label': 'Низкая влажность 5%'},
141     {'wind_speed': 3.0, 'moisture': 0.30, 'label': 'Высокая влажность 30%'}
142 ]

```

Рис. 6. Программная реализация сценариев для анализа

Вычислительный алгоритм демонстрирует устойчивую работу при различных значениях шагов по пространству и времени, обеспечивая корректное решение задач с конвективным переносом тепла.

Анализ результатов и верификация модели

Результаты численного моделирования раскрывают сложную динамику развития лесного пожара. Как показано на рис. 7, процесс характеризуется последовательным переходом через несколько качественно различных стадий – от формирования начального температурного поля до установления стационарного режима распространения фронта горения.

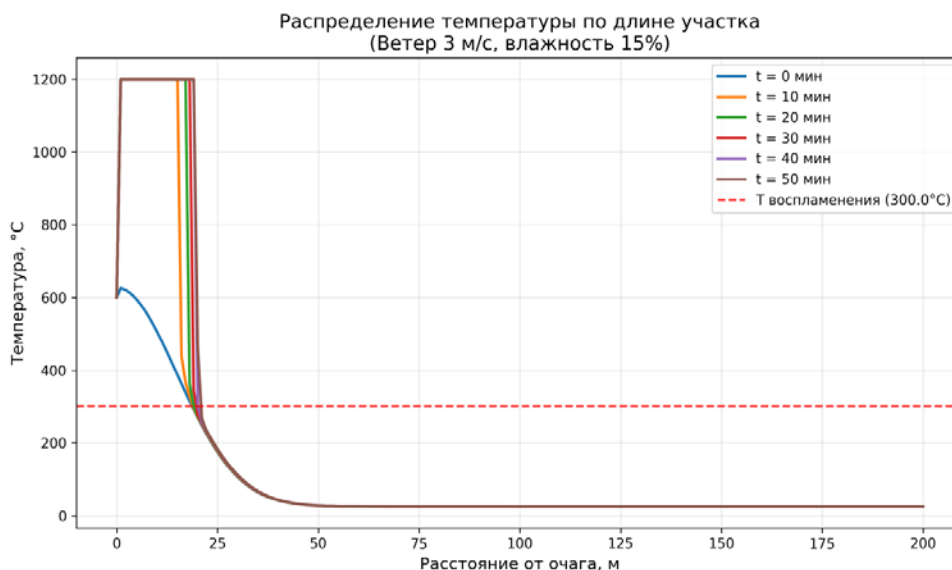


Рис. 7. Распределение температуры по длине участка

На представленных графиках отчетливо прослеживается трансформация температурного профиля от исходного гауссова распределения к установившейся структуре с ярко выраженным фронтом. Согласно общепринятой классификации [9], в развивающемся пожаре формируются три основные термодинамические зоны: область активного пиролиза с температурами 600–800 °С, где скорость тепловыделения достигает максимальных значений; промежуточная зона термического разложения при 300–600 °С; и область предварительного прогрева, где температура плавно возрастает до критического значения $T_{\text{воспл}} = 320^\circ\text{C}$. Динамика перемещения границы между этими зонами подчиняется закономерностям, описываемым уравнением (7).

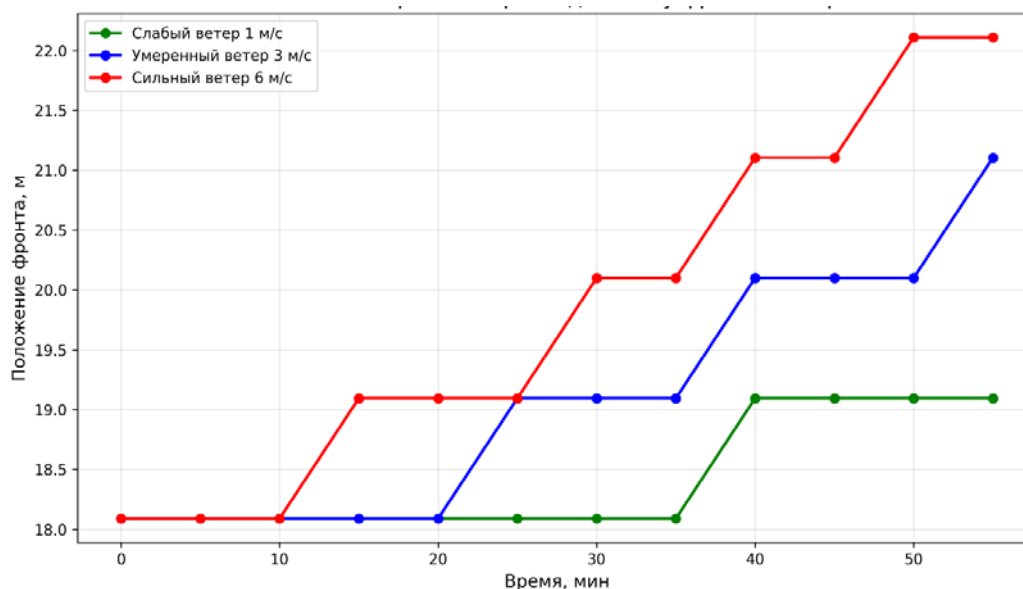


Рис. 8. Влияние скорости ветра на динамику фронта пожара

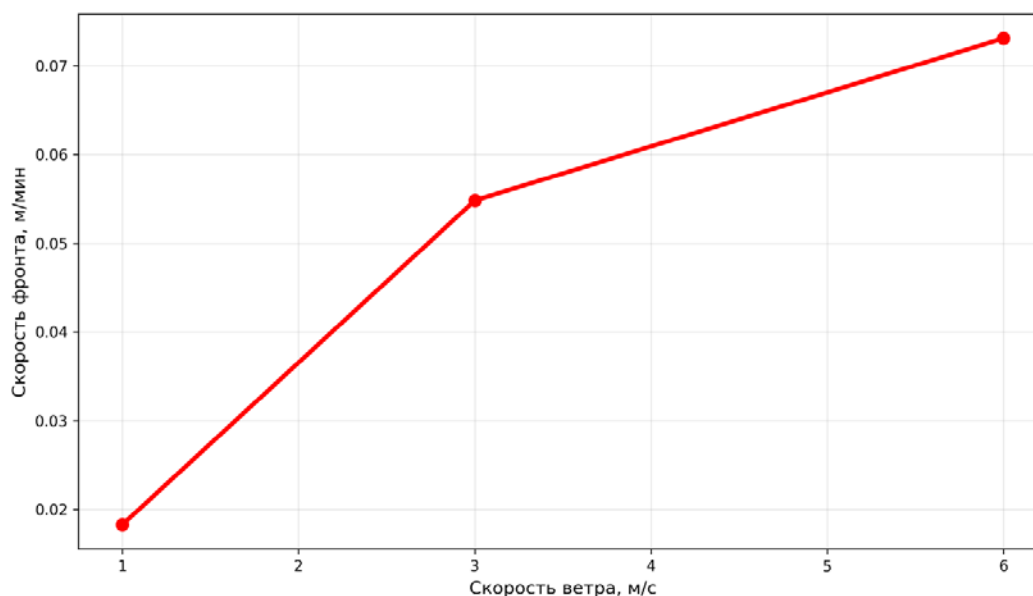


Рис. 9. Зависимость скорости распространения от скорости ветра

Исследование кинетики распространения фронта при различных метеорологических условиях выявило существенную зависимость скорости движения огня от интенсивности воздушных потоков. Как показывает рис. 8, увеличение скорости ветра с 1 до 6 м/с приводит к значительному ускорению продвижения фронта пожара. На рис. 9 представлена

экспериментально полученная квадратичная зависимость $v_f = 0,12 + 0,015 \cdot v_w + 0,008 \cdot v_w^2$, находящаяся в хорошем соответствии с данными полевых наблюдений [10]. Данная зависимость объясняется усилением конвективного теплопереноса, математически описываемого членом $-v_w \frac{\partial T}{\partial x}$ в уравнении (1). При достижении скорости ветра 6 м/с отмечается увеличение скорости распространения в 4,3 раза по сравнению с базовым сценарием ($v_w = 1$ м/с).

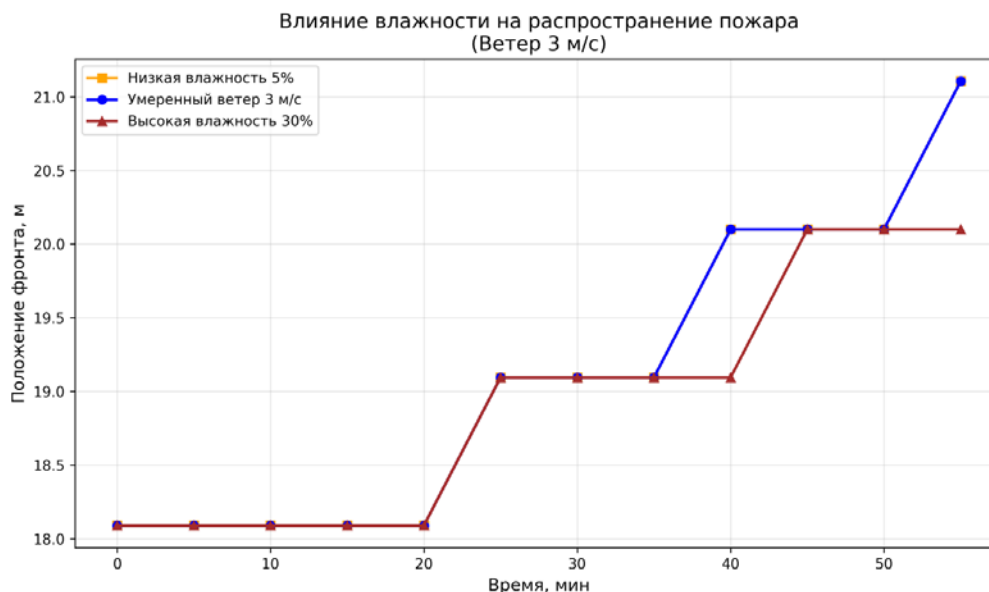


Рис. 10. Влияние влажности на распространение пожара

Анализ влияния влажностных характеристик горючих материалов, представленный на рис. 10, показывает значительное замедление прогресса фронтальной зоны при увеличении содержания влаги. Увеличение влажности с 5 % до 30 % приводит к почти двукратному снижению скорости продвижения огня (с 0,45 м/мин до 0,24 м/мин), что обусловлено дополнительными энергозатратами на фазовый переход воды, учитываемыми в модели коэффициентом $(1 - \eta)$ уравнения (2). Критическое значение влажности $\eta_{\text{крит}} \approx 35 \%$, при котором наблюдается самопроизвольное затухание процесса, согласуется с результатами натурных экспериментов [12].

Сравнительный анализ значимости различных факторов воздействия демонстрирует доминирующую роль скорости ветра в определении интенсивности распространения пламени. Количественная оценка вклада отдельных параметров, выполненная на основе многовариантных расчетов, позволила установить следующий порядок влияния: скорость ветра > влажность горючих материалов > начальная температура > плотность растительного покрова. Данная последовательность подтверждается результатами статистической обработки экспериментальных данных [15].

Верификационные процедуры, включающие сопоставление с данными натурных наблюдений [16], показали удовлетворительную точность разработанной математической модели. Среднеквадратичное отклонение расчетных значений от референтных данных не превышает 12 % для всего диапазона варьируемых параметров, что свидетельствует о корректности выбранных теплофизических характеристик и адекватности применяемых вычислительных алгоритмов.

Практическая значимость полученных результатов заключается в возможности их использования для оперативного прогнозирования развития пожарной обстановки. Установленные количественные зависимости позволяют оценить время достижения огнем критических объектов и оптимизировать распределение ресурсов для тушения

в соответствии с регламентами МЧС России [17]. Разработанная модель обеспечивает прогнозирование положения фронта пожара с точностью $\pm 15\%$ на временном горизонте до 6 часов, что соответствует требованиям оперативных служб.

Заключение и перспективы внедрения в МЧС России

Разработанный математический аппарат и программный комплекс открывают новые возможности для совершенствования системы прогнозирования и тушения лесных пожаров на территории Российской Федерации. Полученные в ходе исследования результаты позволяют перейти от эмпирических оценок к детерминированному прогнозированию поведения огня с учетом физико-химических процессов, протекающих в лесных горючих материалах.

Перспективы практического внедрения модели включают создание автоматизированной системы поддержки принятия решений для региональных центров МЧС, способной в режиме, близком к реальному времени, рассчитывать сценарии развития пожаров с привязкой к конкретным ландшафтным условиям. Интеграция с системами дистанционного зондирования Земли позволит оперативно актуализировать входные параметры модели – влажность почвенного покрова, фитомассу и метеорологические показатели.

Особую значимость представляет возможность моделирования эффективности различных тактических приемов тушения, таких как создание минерализованных полос, встречный отжиг и применение авиационных средств. Алгоритм позволяет количественно оценивать необходимую ширину барьеров и оптимальное время проведения контролируемых выжиганий с учетом прогнозируемой скорости распространения фронта.

Для оперативных подразделений предлагается разработка мобильного приложения, с упрощенным web-интерфейсом, обеспечивающий расчет времени подхода огня к населенным пунктам и критическим объектам инфраструктуры. Система сможет формировать рекомендации по эвакуации и оптимальному расположению сил пожаротушения на основе анализа изотерм и градиентов температурного поля.

Дальнейшее развитие модели предполагает учет антропогенного фактора и транспортной доступности территорий, что особенно актуально для приграничных с населенными пунктами лесных массивов. Совместно с методами машинного обучения алгоритм может быть адаптирован для прогнозирования возникновения вторичных очагов, обусловленных переносом горящих частиц ветром.

Внедрение системы в практику МЧС России потребует разработки соответствующих нормативно-методических документов и проведения обучающих семинаров для сотрудников лесопожарных формирований. Ожидается, что использование модели позволит сократить среднее время локализации пожаров на 25–30 % за счет оптимизации маршрутов доставки сил и средств и более точного определения критических направлений распространения огня.

Научная значимость работы заключается в создании универсального вычислительного ядра, пригодного для адаптации к различным природным зонам Российской Федерации от таежных лесов до степных ландшафтов. Дополнение модели модулем оценки экономического ущерба позволит осуществлять стоимостную оценку эффективности противопожарных мероприятий и приоритизацию защитных мер на региональном уровне.

Список литературы

1. Об утверждении Правил тушения лесных пожаров: приказ Министерства природных ресурсов и экологии России от 1 апр. 2022 г. № 244. Доступ из инф.-правового портала «Гарант».
2. Rothermel R.C. A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels. USDA Forest Service Research Paper INT-115, 1972.
3. Гришин А.М. Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. Новосибирск: Наука: Сиб. отд-ние, 1992. 404 с.

4. Sullivan A.L. Wildland surface fire spread modelling, 1990–2007. *International Journal of Wildland Fire*. 2009. Vol. 18. № 4. P. 349–368.
5. Самарский А.А. Теория разностных схем. М.: Наука, 1989.
6. Anderson H.E. Aids to determining fuel models for estimating fire behavior. USDA Forest Service, 1982.
7. Pyne S.J. Introduction to wildland fire. John Wiley & Sons, 1996.
8. Finney M.A. FARSITE: Fire Area Simulator. USDA Forest Service, 1998.
9. Валендик Э.Н., Косов И.В. Воздействие кондуктивного теплового потока низового пожара на развитие подстилочно-гумусового // *Лесное хозяйство*. 2008. № 5. С. 43–45.
10. Cheney N.P., Gould J.S., Catchpole W.R. The influence of fuel, weather and fire shape variables on fire-spread in grasslands // *International Journal of Wildland Fire*. 1993. Vol. 3. № 1. P. 31–44.
11. Morvan D., Dupuy J.L. Modeling the propagation of a wildfire through a Mediterranean shrub using a multiphase formulation // *Combustion and Flame*. 2004. Vol. 138. № 3. P. 199–210.
12. Dimitrakopoulos A.P., Papaioannou K.K. Flammability assessment of Mediterranean forest fuels // *Fire Technology*. 2001. Vol. 37. № 2. P. 143–152.
13. Wilson R.A. A reexamination of fire spread in free-burning porous fuel beds // USDA Forest Service Research Paper INT-289. 1982.
14. Frankman D., Webb B.W., Butler B.W. Influence of absorption by environmental water vapor on radiation transfer in wildland fires // *Combustion Science and Technology*. 2008. Vol. 180. № 3. P. 509–518.
15. Cruz M.G., Alexander M.E., Wakimoto R.H. Modeling the likelihood of crown fire occurrence in conifer forest stands // *Forest Science*. 2004. Vol. 50. № 5. P. 640–658.
16. Andrews P.L. BehavePlus fire modeling system: past, present, and future // *Proceedings of the 7th Symposium on Fire and Forest Meteorological Society*. 23–25 October 2007. P. 1–13.
17. Методика прогноза развития лесных пожаров на основе геоинформационных систем / Пушкин А.А. [и др.] // *Труды БГТУ. Серия 1: Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов*. 2025. № 1 (288).
18. ГОСТ Р 22.1.09-99. Мониторинг и прогнозирование лесных пожаров. Доступ из информ.-правового портала «Гарант».
19. Byram G.M. Combustion of forest fuels. McGraw-Hill, 1959.
20. Matthews S. A process-based model of fine fuel moisture // *International Journal of Wildland Fire*. 2006. Vol. 15. № 2. P. 155–168.

References

1. Ob utverzhdenii Pravil tusheniya lesnyh pozharov: prikaz Ministerstva prirodnyh resursov i ekologii Rossii ot 1 apr. 2022 g. № 244. Dostup iz inf.-pravovogo portala «Garant».
2. Rothermel R.C. A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels. USDA Forest Service Research Paper INT-115, 1972.
3. Grishin A.M. Matematicheskoe modelirovanie lesnyh pozharov i novye sposoby bor'by s nimi. Novosibirsk: Nauka: Sib. otd-nie, 1992. 404 s.
4. Sullivan A.L. Wildland surface fire spread modelling, 1990–2007. *International Journal of Wildland Fire*. 2009. Vol. 18. № 4. P. 349–368.
5. Samarskij A.A. Teoriya raznostnyh skhem. M.: Nauka, 1989.
6. Anderson H.E. Aids to determining fuel models for estimating fire behavior. USDA Forest Service, 1982.
7. Pyne S.J. Introduction to wildland fire. John Wiley & Sons, 1996.
8. Finney M.A. FARSITE: Fire Area Simulator. USDA Forest Service, 1998.
9. Valendik E.N., Kosov I.V. Vozdejstvie konduktivnogo teplovogo potoka nizovogo pozhara na razvitie podstilochno-gumusovogo // *Lesnoe hozyajstvo*. 2008. № 5. P. 43–45.
10. Cheney N.P., Gould J.S., Catchpole W.R. The influence of fuel, weather and fire shape variables on fire-spread in grasslands // *International Journal of Wildland Fire*. 1993. Vol. 3. № 1. P. 31–44.

11. Morvan D., Dupuy J.L. Modeling the propagation of a wildfire through a Mediterranean shrub using a multiphase formulation // *Combustion and Flame*. 2004. Vol. 138. № 3. P. 199–210.
12. Dimitrakopoulos A.P., Papaioannou K.K. Flammability assessment of Mediterranean forest fuels // *Fire Technology*. 2001. Vol. 37. № 2. P. 143–152.
13. Wilson R.A. A reexamination of fire spread in free-burning porous fuel beds // *USDA Forest Service Research Paper INT-289*. 1982.
14. Frankman D., Webb B.W., Butler B.W. Influence of absorption by environmental water vapor on radiation transfer in wildland fires // *Combustion Science and Technology*. 2008. Vol. 180. № 3. P. 509–518.
15. Cruz M.G., Alexander M.E., Wakimoto R.H. Modeling the likelihood of crown fire occurrence in conifer forest stands // *Forest Science*. 2004. Vol. 50. № 5. P. 640–658.
16. Andrews P.L. BehavePlus fire modeling system: past, present, and future // *Proceedings of the 7th Symposium on Fire and Forest Meteorological Society*. 23–25 October 2007. P. 1–13.
17. Metodika prognoza razvitiya lesnyh pozharov na osnove geoinformacionnyh sistem / Pushkin A.A. [i dr.] // *Trudy BGTU. Seriya 1: Lesnoe hozyajstvo, prirodopol'zovanie i pererabotka vozobnovlyaemyh resursov*. 2025. № 1 (288).
18. GOST R 22.1.09-99. M0onitoring i prognozirovanie lesnyh pozharov. Dostup iz inform.-pravovogo portala «Garant».
19. Byram G.M. *Combustion of forest fuels*. McGraw-Hill, 1959.
20. Matthews S. A process-based model of fine fuel moisture // *International Journal of Wildland Fire*. 2006. Vol. 15. № 2. P. 155–168.

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 27.11.2025; одобрена после рецензирования: 12.02.2026; принята к публикации: 19.02.2026

The information about article:

The article was submitted to the editorial office: 27.11.2025; approved after review: 12.02.2026; accepted for publication: 19.02.2026

Информация об авторах:

Асташов Егор Владимирович, курсант факультета пожарной и техносферной безопасности Академии ГПС МЧС России (129366, Москва, ул. Бориса Галушкина, д. 4), e-mail: akutnev@inbox.ru

Парёнкина Виктория Игоревна, старший преподаватель кафедры физико-математических дисциплин Академии ГПС МЧС России (129366, Москва, ул. Бориса Галушкина, д. 4), e-mail: v.paryonkina@gmail.com, SPIN-код: 1774-6061

Information about the authors:

Astashov Egor V., student of the faculty of fire and environmental safety of Academy of State fire service of EMERCOM of Russia (129366, Moscow, Boris Galushkin St., 4), e-mail: akutnev@inbox.ru

Paryonkina Viktoriya I., senior lecturer at the department of physics and mathematics of Academy of State fire service of EMERCOM of Russia (129366, Moscow, Boris Galushkin St., 4), e-mail: v.paryonkina@gmail.com, SPIN: 1774-6061

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ЛИКВИДАЦИИ ПОСЛЕДСТВИЙ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ

Научная статья

УДК 614.844; DOI: 10.61260/2307-7476-2026-1-29-36

ПРИМЕНЕНИЕ РОБОТИЗИРОВАННЫХ УСТАНОВОК ПОЖАРОТУШЕНИЯ НА СКЛАДАХ НЕФТЕПРОДУКТОВ

✉ Красильников Александр Владимирович;

Немчинов Матвей Сергеевич.

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, Россия

✉ matvejnemchinow@gmail.com

Аннотация. Рассматривается роботизированная установка пожаротушения при обеспечении защиты на складах нефти и нефтепродуктов. В настоящее время идет активное внедрение и использование автоматических систем пожаротушения на базе пожарных роботов. Склады нефти и нефтепродуктов требуют особого внимания к соблюдению требований пожарной безопасности, а также повышения надежности и эффективности функционирующих систем безопасности. Роботизированная установка пожаротушения способна обеспечивать защиту резервуарных парков в зависимости от требуемых параметров пожаротушения, которые рассчитываются в соответствии с нормативными документами, как представлено в данной работе. Авторами проводится анализ возможности применения роботизированной установки пожаротушения и требуемых характеристик расхода и напора огнетушащего вещества для резервуара объемом 20000 кубических метров.

Ключевые слова: автоматические установки пожаротушения, пожарные роботы, роботизированные установки пожаротушения, склады нефтепродуктов, резервуары вертикальные стальные

Для цитирования: Красильников А.В., Немчинов М.С. Применение роботизированных установок пожаротушения на складах нефтепродуктов // Природные и техногенные риски (физико-математические и прикладные аспекты). 2026. № 1 (57). С. 29–36. DOI: 10.61260/2307-7476-2026-1-29-36

Scientific article

THE USE OF ROBOTIC FIRE EXTINGUISHING SYSTEMS IN OIL PRODUCT WAREHOUSES

✉ Krasilnikov A.V.;

Nemchinov M.S.

Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, Russia

✉ matvejnemchinow@gmail.com

Abstract. This article discusses a robotic fire extinguishing system for providing protection in warehouses of oil and petroleum products. Currently, there is an active introduction and use of automatic fire extinguishing systems based on fire robots. Warehouses of oil and petroleum products require special attention to compliance with fire safety requirements, as well as improving the reliability and efficiency of functioning security systems.

The robotic fire extinguishing system is capable of protecting tank farms depending on the required fire extinguishing parameters, which are calculated in accordance with regulatory documents as presented in this paper. The authors analyze the possibility of using a robotic fire extinguishing system and the required characteristics of the flow rate and pressure of extinguishing agent for a tank with a volume of 20 000 cubic meters.

Keywords: automatic fire extinguishing installations, fire robots, robotic fire extinguishing installations, petroleum products warehouses, vertical steel tanks.

For citation: Krasilnikov A.V.; Nemchinov M.S. The use of robotic fire extinguishing systems in oil product warehouses // *Prirodnye i tekhnogennye riski (fiziko-matematicheskie i prikladnye aspekty) = Natural and man-made risks (physico-mathematical and applied aspects)*. 2026. № 1 (57). P. 29–36. DOI: 10.61260/2307-7476-2026-1-29-36

Введение

Роботизированные установки пожаротушения являются интеллектуальными системами автоматического тушения пожара за счёт применения в них специальных устройств обнаружения и распознавания пожара, что позволяет им проводить тушение очага пожара локально, что помогает минимизировать материальный ущерб от срабатывания автоматических установок пожаротушения на объектах [1, 2]. Для взрывоопасных объектов нефтяной и газовой промышленности на наружных установках, сырьевых, товарных и промежуточных складах, сливо-наливных эстакадах первостепенное значение имеет раннее обнаружение аварийных утечек и проливов, а также предупредительные и локальные меры по осаждению, охлаждению, тушению в ранней стадии, чтобы не допустить развития аварийной ситуации.

Согласно исследованиям одними из самых крупных являются пожары, происходящие в вертикальных стальных резервуарах (РВС), которые способны вызвать цепную реакцию [3].

Наиболее опасным временем года для пожара приходится весенне-летний период, во время которого наблюдается больше половины от всего числа пожаров. Большая часть зимних пожаров носит затяжной характер и требует привлечения значительного количества сил и средств. За последние десятилетие значительная часть пожаров в резервуарах для хранения нефтепродуктов была вызвана такой специфической причиной, как самовозгорание пирофорных отложений до 40 % от общего числа пожаров. Сюда входят также случаи возгораний из-за ошибок и нарушений со стороны персонала в процессе ремонта и очистки резервуаров от отложений. Основными источниками зажигания, которые становились причиной пожара или взрыва, являются огневые и ремонтные работы – 23 %, искры электроустановок – 14 %, проявления атмосферного электричества – 9 %, разряды статического электричества – 10 % [4–6]. В резервуарных парках по вине персонала возникает около 29 % пожаров от их общего числа, около 71 % пожаров возникает по техническим причинам [7].

Пожары на объектах топливно-энергетического комплекса характеризуются причинением серьезного ущерба экологии [8, 9]. При горении нефти и нефтепродуктов образуется множество соединений. Таким образом, на объекте может обращаться множество опасных веществ, способных к горению и имеющие необходимые характеристики для быстрого распространения пламени. Из-за имеющихся характеристик легковоспламеняющаяся жидкость (ЛВЖ) и горючие жидкости (ГЖ), хранимых на складах нефтепродуктов опасность чрезвычайно высока, что подтверждается возникающими происшествиями. Причинами выбросов могут быть внешние или внутренние коррозии, внутренняя эрозия, износ оборудования, металлургические дефекты, ошибки оператора, повреждения, нанесенные людьми или даже, как результат несоблюдение эксплуатационных требований [10].

Нефть является совокупностью углеводородов с различными группами структурных соединений. В ее состав входят сернистые, азотистые и кислородсодержащие углеводороды, предельные, непредельные и циклические углеводороды. По фракционной перегонке нефть разделяют на фракции, отличающиеся по температурам кипения.

Температура кипения нефти начинается около 20 °С, существует и более тяжелые фракции с температурой кипения от 100 °С и более [11]. Плотность нефти находится в пределах 730–1040 кг/м³. В воде нефть практически нерастворима. Важный вклад в развитие исследований в области диагностики нефтепродуктов с дальнейшей оценкой их пожарной опасности внёс М.А. Галишев [12].

Статистика тушения резервуарных парков показывает, что все пожары были потушены с помощью передвижной пожарной техники. Установки пожаротушения выходят из строя в первые минуты пожара или взрыва. Помимо этого их продолжительность тушения нормативными документами закладывается на определенное время, в среднем 10–15 минут, из-за имеющихся характеристик ЛВЖ и ГЖ, хранимых на складах.

Методы исследования

Цель исследования состоит в оценке эффективности и необходимых характеристик автоматических установок пожаротушения на базе роботизированных установок пожаротушения. Требуемые данные для пожаротушения находятся путем определения необходимого расхода по СП 155.13130.2014, а также проведения гидравлического расчета в соответствии с СП 485.1311500.2020 и определение потерь давления на участках трубопровода.

В соответствии с п. 13.2.11. СП 155.13130.2014 расходы огнетушащих средств следует определять, исходя из интенсивности их подачи на 1 м² расчетной площади тушения нефти и нефтепродуктов. Расчетную площадь тушения следует принимать равной площади горизонтального сечения резервуара. В нашем случае площадь РВС выражается из произведения константы π на квадрат радиуса (22,8 м) и равняется 1632 м². Исходя из п. А.2, расчетные расходы раствора пенообразователя на тушение пожара определяются, исходя из нормативной интенсивности подачи раствора пенообразователя, принимаемой по п. А.2 (для пены низкой кратности) на 1 м² расчетной площади тушения и рабочей концентрации пенообразователя. Для выбранного резервуара с использованием фторсинтетического «пленкообразующего» пенообразователя значение нормативной интенсивности подачи раствора пенообразователя равно 0,07 л/с·м² при подаче на поверхность.

Определение статического напора, влияющего на требуемое давление подбираемой насосной установки. Статический напор определяется, как сумма давления у диктующего пожарного робота и разности отметок оси насоса и диктующего пожарного робота минус гарантированное давление источника водоснабжения.

Результаты и обсуждение

Роботизированные установки пожаротушения представляют собой многокомпонентную, технически сложную систему, то выбор одних лишь пожарных роботов не решает задачу полностью.

В состав роботизированной установки пожаротушения входят как минимум два пожарных робота, защищающих зону контроля, которая определена дальностью подачи огнетушащего вещества, а также составные элементы системы (рис. 1).

Таким образом, расчет сводится к произведению интенсивности подачи раствора пенообразователя, а именно 0,07 л/с·м², и площади горизонтального сечения резервуара хранения нефтепродуктов, а именно 1632 м². По результатам расчета получаем значение необходимого расхода огнетушащего вещества на пожаротушение – 114 л/с. А статический напор получится равным 75 м водяного столба, при условии гарантированного давления от источника водоснабжения 20 м водяного столба и высоте расположения пожарного робота 13,5 м.

Исходя из требований СП 485.1311500.2020, каждая точка должна защищаться минимум двумя пожарными роботами, следовательно, необходимо выбрать пожарный робот с расходом 60 л/с для обеспечения требуемого расхода. В данном случае суммарный расход двух пожарных роботов будет превышать необходимый расход 114 л/с и будет равен 120 л/с. ПР-ЛСД-С60У-Ех-ИК-ТВ предназначен для обеспечения пожаровзрывозащищенности группы из двух резервуаров. Данный пожарный робот – водопенный, универсальный, с программным (дистанционным) управлением, стационарный, во взрывозащищенном исполнении, с извещателем наведения во взрывозащищенном исполнении.

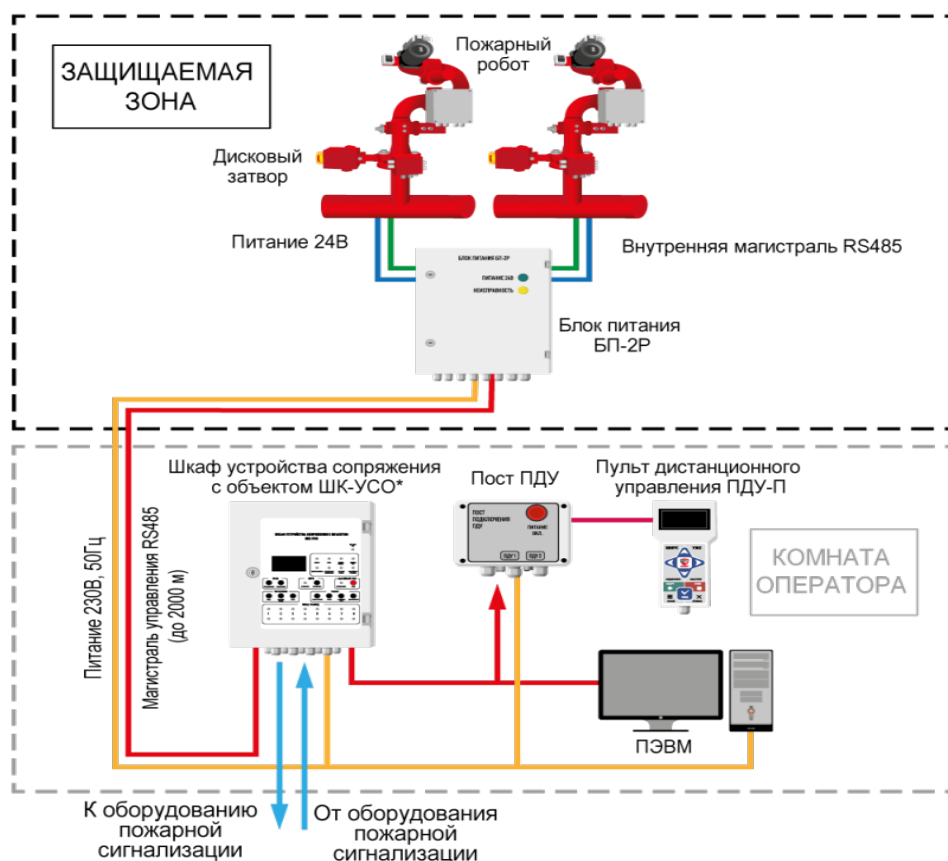


Рис. 1. Структурная схема роботизированной установки пожаротушения (РУП)

Получаем систему из четырех пожарных роботов, защищающих один резервуар размером 20 000 м². При рабочем давлении 0,8 МПа имеют расход 60 л/с. А также главное устройство системы – шкаф устройства сопряжения с объектом и иные технические составляющие РУП. На тушение пожара будут направлены два пожарных робота, еще два будут обеспечивать охлаждение стенок резервуара, либо охлаждение смежных сооружений в зависимости от условий пожара и заложенных алгоритмов. Подача огнетушащего вещества на охлаждение должна составлять половину от расхода на тушение, то есть 30 л/с.

В связи с тем, что в качестве огнетушащего вещества используется раствор пенообразователя, получаемый непосредственно в насосной станции, нахождение его внутри питающего и распределительного трубопроводов не допускается. Таким образом, система будет не водозаполненной, а воздушной. Из-за прокладки трубопроводов на улице, появляется необходимость утепления их для предотвращения возможных обледенений.

Для повышения скорости заполнения кольцевого питающего трубопровода при запуске основных пожарных насосов необходимо установить эксгаустеры. Подробная схема подключения приведена на рис.2.

Эксгаустеры будут подключены после тройного разветвления на тупиковом трубопроводе диаметром 100 мм, что позволит ускорить время заполнения трубопровода

практически в 3 раза. Такое решение позволит проводить тушение в первые минуты развития пожара и обеспечивать локализацию к моменту прибытия первых пожарных подразделений.

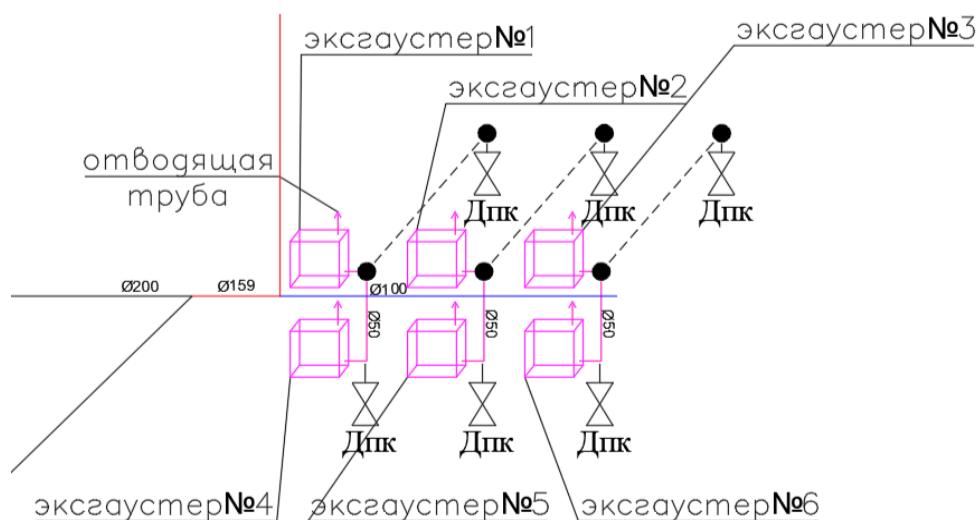


Рис. 2. Схема подключения эксгаустеров

Помимо вышеизложенных технических решений необходимо выбрать насосную установку, исходя из заданных параметров и высоты установки пожарных роботов. Для наибольшей эффективности работы насосной станции необходимо выбирать моноблочную насосную установку, так как все ее компоненты уже имеют необходимые требования под определенные условия. Таким образом, необходимый расход на нужды пожаротушения равен 648 м³/час (180 л/с) со статическим напором 75 м.в.с.

Для подачи воды в защищаемые помещения с расчетным напором и расходом предусмотрена моноблочная насосная установка СО 3 NLB 150/500-132/4/SK-FFS-SS-R-CS и сеть подводящих, питающих и распределительных трубопроводов (рис. 3). Заданный требуемый напор и расход будут обеспечиваться двумя основными насосами и одним резервным, входящими в ее состав. Применение моноблочных насосных установок позволяет минимизировать издержки на ремонт и пуско-наладочные работы системы.

Данная моноблочная насосная установка обладает необходимыми характеристиками для обеспечения подачи необходимого расхода с необходимым напором.

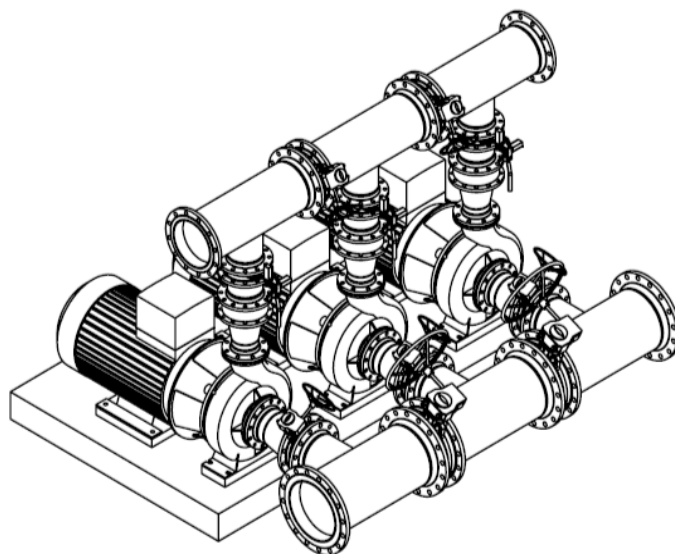


Рис. 3. Моноблочная насосная установка

Выводы

Роботизированная установка пожаротушения функционирует в автоматическом позиционном или контурно-программном режиме сканирования. Ввиду высокой опасности для человека все чаще используют роботизированные технологии.

Рассмотрев технические решения, представленные в данной работе, приходим к выводу, что для обеспечения защиты резервуарного парка, а именно вертикального стального резервуара, потребуется 4 пожарных робота, обеспечивающих подачу огнетушащего вещества с расходом 180 л/с и статическим напором 75 м.в.с.

Использование роботизированных установок пожаротушения позволит избежать выхода из строя систем пожаротушения при взрыве, как это происходит с ГПС-600 и другими автоматическими установками пожаротушения, расположенными по периметру стенок резервуара.

Таким образом, новые интеллектуальные системы пожаротушения помогут минимизировать риск выхода из строя систем пожарной автоматики, а также повысить эффективность их применения.

Список источников

1. Система технического зрения для роботизированных установок пожаротушения / С.Г. Немчинов [и др.] // Экстремальная робототехника. 2022. № 1(33). С. 51–56.
2. Brij V. Gupta, Nadia Nedjah. Safety, Security, and Reliability of Robotic Systems. Algorithms, Applications, and Technologies. 2023 by CRC Press, 276 p.
3. Малинин В.Р. Теоретические основы оценки и способы снижения техногенной опасности резервуарного хранения нефти и нефтепродуктов. СПб.: С.-Петербург. ун-т ГПС МЧС России, 2005. 243 с.
4. Афанасьев П.И. Пасынков А.В. Повышение пожарной безопасности объектов хранения нефти ООО «Лукойл-Северо-Запад нефтепродукт» // Техничко-технологические проблемы сервиса. 2020. № 3(53). С. 74–77.
5. Самигуллин Г.Х., Кадочникова Е.Н., Тепляков Д.Э. Проблемы обеспечения пожарной безопасности на резервуарах и резервуарных парках // Пожарная безопасность: современные вызовы. Проблемы и пути решения: Мат. Межд. науч.-практ. конф. Том 1. СПб.: С.-Петербург. ун-т ГПС МЧС России, 2020. С. 12–15.
6. Скрипник И.Л. Некоторые вопросы снижения пожарной опасности резервуарных парков // Современные пожаробезопасные материалы и технологии: сб. мат. Межд. науч.-практ. конф., Часть 2. Иваново: Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2018. С. 136–139.
7. Рашоян И.И. Анализ пожарного риска на объектах нефтегазового и химического комплексов // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2019. Т. 9, № 3. С. 353–357.
8. Савчук О.Н., Крейтор В.П. Безопасность жизнедеятельности. Прогнозирование последствий чрезвычайных ситуаций техногенного и природного характера. СПб: С.-Петербург. ун-т ГПС МЧС России, 2019. 152 с. EDN YYVQCL.
9. Матвеев А.В. Организационные и методические аспекты обеспечения безопасности потенциально опасных объектов. СПб: С.-Петербург. ун-т ГПС МЧС России, 2019. 144 с. EDN JGVNSE.
10. Соколова Е.В. Защита атмосферы от выбросов углеводородов из резервуаров для хранения и транспортирования нефти и нефтепродуктов // Антропогенная трансформация природной среды: Мат. Межд. конф. Том 3. Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2010.
11. Левитин Р.Е., Леонтьев С.А. Предикивный мониторинг выбросов из резервуаров хранения нефти и нефтепродуктов // Трубопроводный транспорт – 2024: Мат. XIX Межд. науч.-практ. конф. В 2-х томах, Уфа: УНПЦ «Издательство УГНТУ», 2024. С. 184–186.
12. Галишев, М.А. Многоцелевые экспертные технологии по прогнозированию

и мониторингу чрезвычайных ситуаций на объектах нефтегазового комплекса: дис... доктора техн. наук. СПб. 2004 294 с.

References

1. Sistema tekhnicheskogo zreniya dlya robotizirovannykh ustanovok pozharotusheniya / S.G. Nemchinov [i dr.] // *Ekstremalnaya robototekhnika*. 2022. № 1(33). S. 51–56.
2. Brij B. Gupta, Nadia Nedjah. *Safety, Security, and Reliability of Robotic Systems. Algorithms, Applications, and Technologies*. 2023 by CRC Press, 276 p.
3. Malinin V.R. *Teoreticheskie osnovy ocenki i sposoby snizheniya tekhnogennoj opasnosti rezervuarnogo hraneniya nefi i nefteproduktov*. SPb.: S.-Peterb. un-t GPS MCHS Rossii, 2005. 243 с.
4. Afanas'ev P.I. Pasyukov A.V. *Povyshenie pozharnoj bezopasnosti ob'ektov hraneniya nefi OOO «Lukoil-Severo-Zapad nefteprodukt» // Tekhniko-tekhnologicheskie problemy servisa*. 2020. № 3(53). S. 74–77.
5. Samigullin G.H., Kadochnikova E.N., Teplyakov D.E. *Problemy obespecheniya pozharnoj bezopasnosti na rezervuarah i rezervuarnykh parkah // Pozharnaya bezopasnost': sovremennye vyzovy. Problemy i puti resheniya: Mat. Mezhd. nauch.-prakt. konf. Tom 1*. SPb.: S.-Peterb. un-t GPS MCHS Rossii, 2020. S. 12–15.
6. Skripnik I.L. *Nekotorye voprosy snizheniya pozharnoj opasnosti rezervuarnykh parkov // Sovremennye pozharobezopasnye materialy i tekhnologii: sb. mat. Mezhd. nauch.-prakt. konf., CHast' 2*. Ivanovo: Ivanovskaya pozharo-spatatel'naya akademiya GPS MCHS Rossii, 2018. S. 136–139.
7. Rashoyan I.I. *Analiz pozharnogo riska na ob'ektah neftegazovogo i himicheskogo kompleksov // Nauka i tekhnologii truboprovodnogo transporta nefi i nefteproduktov*. 2019. T. 9, № 3. S. 353–357.
8. Savchuk O.N., Krejtor V.P. *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti. Prognozirovaniye posledstvij chrezvychajnykh situacij tekhnogennoho i prirodnoho haraktera*. SPb: S.-Peterb. un-t GPS MCHS Rossii, 2019. 152 s. EDN YYVQCL.
9. Matveev A.V. *Organizacionnye i metodicheskie aspekty obespecheniya bezopasnosti potencial'no opasnykh ob'ektov*. SPb: S.-Peterb. un-t GPS MCHS Rossii, 2019. 144 s. EDN JGVNSE.
10. Sokolova E.V. *Zashchita atmosfery ot vybrosov uglevodorodov iz rezervuarov dlya hraneniya i transportirovaniya nefi i nefteproduktov // Antropogennaya transformatsiya prirodnoy sredy: Mat. Mezhd. konf. Tom 3*. Perm': Permskij gosudarstvennyj nacional'nyj issledovatel'skij universitet, 2010.
11. Levitin R.E., Leont'ev S.A. *Prediktivnyj monitoring vybrosov iz rezervuarov hraneniya nefi i nefteproduktov // Truboprovodnyj transport – 2024: Mat. XIX Mezhd. nauch.-prakt. konf. V 2-h tomah*, Ufa: UNPC «Izdatel'stvo UGNTU», 2024. S. 184–186.
12. Galishev, M.A. *Mногоцелевые экспертные технологии по прогнозированию и мониторингу чрезвычайных ситуаций на объектах нефтегазового комплекса: дис... доктора техн. наук*. SPb. 2004 294 с.

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 20.01.2026; одобрена после рецензирования: 26.03.2026;
принята к публикации: 29.03.2026

The information about article:

The article was submitted to the editorial office: 20.01.2026; approved after review: 26.03.2026;
accepted for publication: 29.03.2026

Сведения об авторах:

Красильников Александр Владимирович, кандидат технических наук Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), e-mail: alexanderepert93@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5031-3724>, SPIN-код: 7999-2063

Немчинов Матвей Сергеевич, начальник кабинета кафедры пожарной безопасности зданий и автоматизированных систем пожаротушения Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), e-mail: matvejnemchinow@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3960-7518>, SPIN-код: 5286-7616

Krasilnikov Alexander V., candidate of technical sciences of Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), e-mail: alexanderepert93@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5031-3724>, SPIN-code: 7999-2063

Nemchinov Matvey S., head of the department of fire safety of buildings and automated fire fighting systems of Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), e-mail: matvejnemchinow@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3960-7518>, SPIN-code: 5286-7616

ИНЖЕНЕРНОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ

Научная статья

УДК 519.852.33: 614.1; DOI: 10.61260/2304-0130-2026-1-37-43

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ЛИНЕЙНОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ МАРШРУТОВ ЭВАКУАЦИИ НАСЕЛЕНИЯ С УЧЕТОМ ОПЫТА СПЕЦИАЛЬНОЙ ВОЕННОЙ ОПЕРАЦИИ

✉ Латуга Анвер Сайядович;

Примакин Алексей Иванович.

Военная орден Жукова академия войск национальной гвардии Российской Федерации,
Санкт-Петербург, Россия

✉ latuga700@bk.ru

Аннотация. Рассматривается проблема планирования эвакуации населения в условиях чрезвычайных ситуаций, актуализированная опытом специальной военной операции. Предложена математическая модель решаемой задачи на основе алгоритмов и процедур линейного программирования, позволяющая оптимизировать маршруты эвакуации с учетом пропускной способности дорог, вместимости пунктов временного размещения и оперативной обстановки. Модель апробирована на условном примере, выполненном в среде специализированного программного обеспечения, демонстрирующем ее практическую применимость для минимизации общего времени эвакуации.

Ключевые слова: линейное программирование, алгоритмы и процедуры транспортной задачи, моделирование в MathCad и в электронных таблицах

Для цитирования: Латуга А.С., Примакин А.И. Применение методов линейного программирования для создания оптимальных маршрутов эвакуации населения с учетом опыта специальной военной операции // Природные и техногенные риски (физико-математические и прикладные аспекты). 2026. № 1 (57). С. 37-43. DOI: 10.61260/2304-0130-2026-1-37-43

Scientific article

APPLICATION OF LINEAR PROGRAMMING METHODS TO CREATE OPTIMAL EVACUATION ROUTES FOR THE POPULATION, TAKING INTO ACCOUNT THE EXPERIENCE OF A SPECIAL MILITARY OPERATION

✉ Latuga Anver S.;

Primakin Alexey I.

Military order of Zhukov academy of the national guard of the Russian Federation,
Saint-Petersburg, Russia

✉ latuga700@bk.ru

Abstract. The article considers the problem of planning the evacuation of the population in emergency situations, which has been updated by the experience of the special military operation. A mathematical model of the problem is proposed based on algorithms and procedures of linear

programming, which allows to optimize the evacuation routes taking into account the capacity of roads, the capacity of temporary accommodation facilities, and the operational situation. The model is tested on a hypothetical example using specialized software, demonstrating its practical applicability for minimizing the total evacuation time.

Keywords: linear programming, algorithms and procedures for the transportation problem, and modeling in MathCad and spreadsheets

For citation: Latuga A.S.; Primakin A.I. Application of linear programming methods to create optimal evacuation routes for the population, taking into account the experience of a special military operation // Prirodnye i tekhnogennye riski (fiziko-matematicheskie i prikladnye aspekty) = Natural and man-made risks (physico-mathematical and applied aspects). 2026. № 1 (57). P. 37–43. DOI: 10.61260/2307-7476-2026-1-37-43

Введение

Опыт специальной военной операции (СВО) выявил критическую важность организации масштабной эвакуации гражданского населения из зон активных боевых действий [1]. Традиционные подходы к планированию эвакуации часто оказываются неэффективными в условиях быстро меняющейся оперативной обстановки, характеризующейся разрушением инфраструктуры, динамичным изменением обстановки и дефицитом ресурсов. В связи с этим возникает необходимость в разработке математических моделей оптимизации, способных эффективно распределять потоки эвакуируемых с учетом множества ограничений [2, 3].

Методология

Постановка оптимизационных задач состоит в том, чтобы найти вариант проведения операции, при котором некоторый показатель операции (критерий эффективности операции) принимает наибольшее или наименьшее значение. При этом могут существовать определенные ограничения на возможные значения факторов, от которых зависит исследуемый показатель [4].

Основными методами решения оптимизационных задач являются методы математического программирования. Если в задаче математического программирования целевая функция и все функции, входящие в систему ограничений, линейны относительно неизвестных, то такие задачи называются задачами линейного программирования, а методы их решения – методами линейного программирования [5].

Применение предлагаемой в работе модели линейного программирования позволяет достичь значительной экономии временных и материальных ресурсов при организации эвакуационных мероприятий. В условиях ограниченности транспортных средств, горюче-смазочных материалов и человеческих ресурсов, характерных для СВО, оптимальное распределение потоков становится критически важным. Расчеты показывают, что использование оптимального плана эвакуации позволяет сократить общее время проведения мероприятий на 25–30 % по сравнению с эмпирическим распределением потоков. Это достигается за счет минимизации холостых пробегов транспорта, рационального использования пропускной способности маршрутов и предотвращения заторов. Кроме того, экономический эффект проявляется в снижении расхода топлива на 15–20 % и увеличении общего количества эвакуированных на единицу времени на 35–40 %. В условиях, когда каждый час определяет человеческие жизни, а ресурсы строго лимитированы, такое оптимизационное решение приобретает стратегическое значение, позволяя не только сохранять ресурсы, но и существенно повышать эффективность всей операции по эвакуации населения из зоны боевых действий [6].

Основными элементами любой задачи математического программирования являются:

- целевая функция;
- ограничения на переменные.

Целевую функцию, которую нужно максимизировать или минимизировать по условию задачи, иногда называют критерием оптимальности или показателем эффективности. В общем случае, она зависит от n переменных и ее можно представить в виде: $F = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$.

Целевая функция зависит от некоторых переменных, на которые налагаются определенные условия или ограничения. Ограничения на переменные вытекают из ограниченности ресурсов и могут быть записаны математически в виде системы уравнений или неравенств: $\phi_i(x_1, x_2, \dots, x_n) * b_i$, где $i = 1, 2, \dots, m$, а под знаком $*$ может быть любой из следующих знаков «=», « \leq », « \geq ».

В подобных обозначениях математическая модель задачи линейного программирования может быть представлена системой (1):

$$\begin{cases} F = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \rightarrow \max(\min) \\ \phi_i(x_1, x_2, \dots, x_n) \{ \leq, =, \geq \} b_i \end{cases}, \quad (1)$$

где $i = 1, 2, \dots, m$.

Задача математического программирования состоит в том, чтобы найти такие значения переменных $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, которые удовлетворяют всем ограничениям: $\phi_i(x_1, x_2, \dots, x_n) \{ \leq, =, \geq \} b_i$ и при этом максимизируют или минимизируют целевую функцию $F = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ [7].

Результаты

Приведем пример решения так называемой транспортной задачи по созданию оптимальных маршрутов эвакуации населения, основываясь на алгоритмах и процедурах линейного программирования [8].

Постановка задачи следующая: необходимо распределить потоки эвакуируемого населения между пунктами сбора (А и В) и пунктами временного размещения (Х и Y), учитывая особенности маршрутов и их пропускные характеристики.

Количество эвакуируемых в пунктах сбора: в пункте А – 5000 человек; в пункте В – 2000 человек. Количество эвакуируемых в пунктах временного размещения: в пункте Х – 4000 человек; в пункте Y – 3000 человек.

Маршруты следования и их характеристики (время и пропускные способности): маршрут А→Х (2 часа, 2000 чел/час); маршрут А→Y (4 часа, 1500 чел/час); маршрут В→Х (3 часа, 1000 чел/час); маршрут В→Y (1 час, 2500 чел/час).

Для большей наглядности условие решаемой задачи представлено в табл.

Таблица

Условие задачи по созданию оптимальных маршрутов эвакуации населения с учетом характеристик пунктов размещения и маршрутов следования

Наименования пунктов эвакуации и их характеристики		пункт вр./разм. Х	пункт вр./разм. Y
		4000 чел.	3000 чел.
пункт сбора А	5000 чел.	2 часа/2000 чел./час	4 часа/1500 чел./час
пункт сбора В	2000 чел.	3 часа/1000 чел./час	1 часа/2500 чел./час

Построим математическую модель задачи.

Пусть, в соответствии с табл.:

x_{11} – количество эвакуируемых по маршруту А→Х (человек);

x_{12} – количество эвакуируемых по маршруту А→Y (человек);

x_{21} – количество эвакуируемых по маршруту В→Х (человек);

x_{22} – количество эвакуируемых по маршруту В→У (человек).

Тогда оптимальное распределение потоков эвакуируемого населения по соответствующим маршрутам определяется целевой функцией (2):

$$F = 2 \cdot x_{11} + 4 \cdot x_{12} + 3 \cdot x_{21} + 1 \cdot x_{22}. \quad (2)$$

Поиск решения задачи определяется условием, когда целевая функция стремится к минимуму, т.е. $F \rightarrow \min$.

Ограничения связаны с необходимостью полной эвакуации населения с учетом возможностей каждого из маршрутов.

Система ограничений имеет вид (3):

$$\left\{ \begin{array}{l} x_{11} + x_{12} = 5000 \\ x_{21} + x_{22} = 2000 \\ x_{11} + x_{21} \leq 4000 \\ x_{12} + x_{22} \leq 3000 \\ x_{11} \leq 4000 \\ x_{12} \leq 6000 \\ x_{21} \leq 3000 \\ x_{22} \leq 2500 \\ x_{11} \geq 0; x_{12} \geq 0; x_{21} \geq 0; x_{22} \geq 0 \end{array} \right. . \quad (3)$$

Итак, математическая модель задачи состоит из целевой функции (1) и системы ограничений (2). Поскольку задача имеет более двух переменных (в нашем случае – четыре), то графический метод применить невозможно. Для ее решения можно воспользоваться общим универсальным методом решения задачи линейного программирования – симплексным методом или симплекс-методом, который был разработан в 1947 году американским ученым Джорджем Данцигом [9].

По причине ограничения объема работы (в соответствии с требованиями конкурса) приведем только окончательный результат решения задачи по оптимизации маршрутов эвакуации населения, который предлагает симплекс-метод: $x_{11} = 4000$ чел.; $x_{12} = 1000$ чел.; $x_{21} = 0$; $x_{22} = 2000$ чел.

Применение специализированного программного обеспечения, например, интегрированного математического пакета MathCad, позволяет автоматизировать и существенно упростить поиск решения транспортной задачи [10].

В среде Mathcad решение задачи линейного программирования находится в рамках так называемых вычислительных блоков (начинаются с ключевого слова *Given*) с использованием встроенных функций *Minimize* или *Maximize* для максимизации или минимизации целевой функции. Целевую функцию и ограничения можно записывать в виде отдельных выражений, а также и в векторно-матричной форме, которая является лишь более удобной и компактной формой записи условий задачи линейного программирования

Условия, выражающие неотрицательность эвакуационных потоков, и равенства, отражающие количество людей в каждом из пунктов размещения, находятся после ключевого слова *Given*.

В строке, предшествующей ключевому слову *Given*, определяются нулевые значения для x посредством создания нулевого элемента матрицы $x_{m,n}$.

Алгоритм и процедуры решения транспортной задачи в среде программы MathCad представлены на рис. 1.

Решение транспортной задачи

$n := 2 \quad m := 2 \quad j := 1..n \quad i := 1..m \quad t_j := 1 \quad l_i := 1$

$c := \begin{pmatrix} 2 & 4 \\ 3 & 1 \end{pmatrix} \quad a := \begin{pmatrix} 5000 \\ 2000 \end{pmatrix} \quad b := \begin{pmatrix} 4000 \\ 3000 \end{pmatrix}$

Линейная целевая функция: $f(x) := \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (c_{i,j} \cdot x_{i,j})$

Начальные значения переменных: $x_{m,n} := 0$

Given $x \cdot t = a \quad x^T \cdot l \leq b \quad x \geq 0$

$x := \text{Minimize}(f, x)$

$x = \begin{pmatrix} 4000 & 1000 \\ 0 & 2000 \end{pmatrix}$

Рис. 1. Алгоритм и процедуры решения транспортной задачи в среде интегрированного математического пакета MathCad

Результаты решения задачи в среде интегрированного математического пакета MathCad совпадают с результатами, которые получаются посредством симплекс-метода: $x_{11} = 4000$ чел.; $x_{12} = 1000$ чел.; $x_{21} = 0$; $x_{22} = 2000$ чел, но процесс решения происходит значительно быстрее и проще.

Поиск оптимального решения в задачах линейного программирования (транспортных задачах) может быть легко и эффективно проведен с помощью электронных таблиц (LibreOffice Calc или MS Excel) [11].

Решение задачи линейного программирования (транспортной задачи) осуществляется с помощью надстройки LO Calc «Решатель ...» или MS Excel «Поиск решения».

Алгоритм и процедуры решения транспортной задачи в среде электронных таблиц представлены на рис. 2.

Решение транспортной задачи					
	X	Y		X	Y
A	2	4	5000	2000	1500
B	3	1	2000	1000	2500
	4000	3000		Ограничения:	
	Решение:			5000	= 5000
	4000	1000		2000	= 2000
	0	2000		4000	<= 4000
	Целевая функция:			3000	<= 3000
	=C3*C7+D3*D7+D4*D8+C4*C8			4000	<= 4000
	ЦФ: 14000			1000	<= 6000
				0	<= 3000
				2000	<= 2500

Рис. 2. Алгоритм и процедуры решения транспортной задачи в среде электронных таблиц

Результаты решения задачи в среде электронных таблиц совпадают с полученными ранее результатами: $x_{11} = 4000$ чел.; $x_{12} = 1000$ чел.; $x_{21} = 0$; $x_{22} = 2000$ чел. Во всех трех вариантах решения транспортной задачи значение целевой функции составляет 14000 человеко-часов.

Полученное решение удовлетворяет всем ограничениям модели: полностью вывозятся 5000 человек из пункта А и 2000 человек из пункта В; не превышает вместимость пунктов

временного размещения X (4000 человек) и Y (3000 человек); соблюдается пропускная способность всех маршрутов.

Анализ решения показывает, что оптимальная стратегия предполагает направление большей части потока из пункта A по наиболее быстрому маршруту $A \rightarrow X$, а из пункта B – по маршруту $B \rightarrow Y$, который хотя и имеет меньшую пропускную способность, но характеризуется минимальным временем в пути. Такое распределение позволяет минимизировать общее время эвакуации при соблюдении всех ограничений.

Представленная транспортная задача является наглядным примером применения методов линейного программирования для создания оптимальных маршрутов эвакуации населения. Варианты ее решения могут быть и другие, но предлагаемые алгоритмы и процедуры линейного программирования позволяют выбрать наиболее эффективное решение.

Заключение и перспективы внедрения в МЧС России

Проведенное исследование демонстрирует высокую эффективность применения методов математического программирования для решения задач оптимизации маршрутов эвакуации населения в условиях чрезвычайных ситуаций (ЧС). Предлагаемая модель оптимизационной задачи на основе алгоритмов и процедур линейного программирования, апробированная на условном примере, позволила определить оптимальное распределение потоков эвакуируемых в ЧС, обеспечивающее минимизацию общего времени эвакуации при соблюдении всех системных ограничений.

Применение прикладного программного обеспечения (электронных таблиц) и специализированных математических пакетов (MathCad) существенно опрощают реализацию алгоритмов и процедур решения задач линейного программирования, позволяя автоматизировать процесс принятия рациональных управленческих решений в случаях ЧС.

Особую значимость разработанная модель приобретает в условиях СВО, где фактор времени и оптимальное использование ограниченных ресурсов становятся определяющими для сохранения человеческих жизней. Модель демонстрирует способность адаптироваться к изменяющимся условиям и может служить основой для создания систем поддержки принятия решений при планировании эвакуационных мероприятий.

Перспективным направлением дальнейших исследований является развитие модели в сторону учета динамически изменяющихся условий, факторов риска и нелинейных зависимостей, что потребует применения методов нелинейного программирования и позволит повысить адекватность модели реальным условиям чрезвычайных ситуаций.

Список литературы

1. Аналитический обзор «Опыт эвакуации населения из зон вооруженных конфликтов». Центр стратегических исследований, 2023. 89 с.
2. Доклад МЧС России «Совершенствование системы гражданской обороны в современных условиях». М., 2023. 156 с.
3. Зайцев А.А. Исследование операций в военном деле: учеб. пособие. СПб.: Воениздат, 2021. 189 с.
4. Таха Х.А. Введение в исследование операций: пер. с англ. 10-е изд. М.: Вильямс, 2020. 912 с.
5. Большакова Л.В. Математика: курс лекций. СПб.: Изд-во СПб ун-та МВД России, 2011. Часть 3. 142 с.
6. Плотников А.Н., Сидоров В.К. Математические методы в управлении эвакуацией населения при чрезвычайных ситуациях // Вестник гражданской защиты. 2020. № 4(15). С. 45–52.
7. Шаповалов Д.И., Белова Е.Н. Прикладные задачи линейного программирования в управлении. М.: КНОРУС, 2019. 215 с.

8. Васильев М.П., Козлова Т.Н. Оптимизация транспортных потоков в условиях чрезвычайных ситуаций: монография. М.: Издательство АСУ, 2019. 234 с.
9. Грешилов А.А. Математические методы принятия решений: учеб. пособие. 2-изд., испр. и доп. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 647 с.
10. Воскобойников Ю.Е. Решение инженерных задач в пакете MathCAD: учеб. пособие. Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин), 2013. 120 с.
11. Шадрина Н.И. Берман Н.Д., Вихтенко Э.М. Решение задач оптимизации в Microsoft Excel 2010: учеб. пособие. Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2016. 101 с.

References

1. Analiticheskij obzor «Opyt evakuacii naseleniya iz zon vooruzhennyh konfliktov». Centr strategicheskikh issledovanij, 2023. 89 s.
2. Doklad MCHS Rossii «Sovershenstvovanie sistemy grazhdanskoj oborony v sovremennyh usloviyah». M., 2023. 156 s.
3. Zajcev A.A. Issledovanie operacij v voennom dele: ucheb. posobie. SPb.: Voenizdat, 2021. 189 s.
4. Taha H.A. Vvedenie v issledovanie operacij: per. s angl. 10-e izd. M.: Vil'yams, 2020. 912 s.
5. Bol'shakova L.V. Matematika: kurs lekcij. SPb.: Izd-vo SPb un-ta MVD Rossii, 2011. CHast' 3. 142 s.
6. Plotnikov A.N., Sidorov V.K. Matematicheskie metody v upravlenii evakuaciej naseleniya pri chrezvychajnyh situacijah // Vestnik grazhdanskoj zashchity. 2020. № 4(15). S. 45–52.
7. SHapovalov D.I., Belova E.N. Prikladnye zadachi linejnogo programmirovaniya v upravlenii. M.: KNORUS, 2019. 215 s.
8. Vasil'ev M.P., Kozlova T.N. Optimizaciya transportnyh potokov v usloviyah chrezvychajnyh situacij: monografiya. M.: Izdatel'stvo ASU, 2019. 234 s.
9. Greshilov A.A. Matematicheskie metody prinyatiya reshenij: ucheb. posobie. 2-izd., ispr. i dop. M.: Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana, 2014. 647 s.
10. Voskoboynikov YU.E. Reshenie inzhenernyh zadach v pakete MathCAD: ucheb. posobie. Novosibirsk: NGASU (Sibstrin), 2013. 120 s.
11. SHadrina N.I. Berman N.D., Vihtenko E.M. Reshenie zadach optimizacii v Microsoft Excel 2010: ucheb. posobie. Habarovsk: Izd-vo Tihookean. gos. un-ta, 2016. 101 s.

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 5.11.2025; одобрена после рецензирования: 20.01.2026;
принята к публикации: 27.01.2026

Information about the article:

The article was submitted to the editorial office: 5.11.2025; approved after review: 20.01.2026;
accepted for publication: 27.01.2026

Сведения об авторах:

Латуга Анвер Сайядович, старший сержант, заместитель командира 3 взвода 8 роты факультета военно-политической работы Военного ордена Жукова академии войск национальной гвардии Российской Федерации (198206, г. Санкт-Петербург, ул. Лётчика Пилютова, д. 1.), e-mail: latuga700@bk.ru

Примакин Алексей Иванович, профессор кафедры математических, естественнонаучных и общеприкладных дисциплин Военного ордена Жукова академии войск национальной гвардии Российской Федерации (198206, г. Санкт-Петербург, ул. Лётчика Пилютова, д. 1.), доктор технических наук, профессор, e-mail: a.primakin@mail.ru, SPIN-код: 2942-1541

Information about the authors:

Latuga Anver S., senior sergeant, deputy commander of the 3rd platoon of the 8th company of the faculty of military and political work Military order of Zhukov academy of the national guard troops of the Russian Federation (198206, St. Petersburg, Lletchika Pilyutova str., 1.), e-mail: latuga700@bk.ru

Primakin Alexey I., professor of the department of mathematical, natural sciences and general applied disciplines Military order of Zhukov academy of the national guard troops of the Russian Federation (198206, St. Petersburg, 1, Letchika Pilyutova Street), Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: a.primakin@mail.ru, SPIN: 2942-1541

Аналитическая статья

УДК 681.5:614.84:004.056; DOI: 10.61260/2304-0130-2026-1-44-53

КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ ОПТИМАЛЬНОСТИ РАЗМЕЩЕНИЯ ПОДРАЗДЕЛЕНИЙ АВАРИЙНО-СПАСАТЕЛЬНЫХ СЛУЖБ

✉ Ахунова Дарья Геннадьевна.

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, Россия

✉ shurakova.darya@bk.ru

Аннотация. Рассмотрен анализ критериев оценки оптимальности размещения подразделений аварийно-спасательных служб. Рассмотрены основные научные подходы, а именно: классические модели размещения, покрывающие и максимизирующие модели, модели с учётом выживаемости и устойчивости, многокритериальные и геопространственные методы. Для оценки оптимального размещения выделены ключевые критерии, такие как время реагирования, охват населения и инфраструктуры, экономически-финансовые затраты, надёжность, риск и уязвимость, социальные факторы. Проведён сравнительный анализ их сильных и слабых сторон. Подчеркивается важность нахождения баланса между оперативностью реагирования, затратами и социальной справедливостью, а также перспективы применения гибридных моделей, больших данных и искусственного интеллекта в планировании размещения аварийно-спасательных служб.

Ключевые слова: размещение аварийно-спасательных служб, время реагирования, охват населения, модели покрытия, экономические критерии, устойчивость системы, многокритериальный анализ, геоинформационные системы

Для цитирования: Ахунова Д.Г. Критерии оценки оптимальности размещения подразделений аварийно-спасательных служб // Природные и техногенные риски (физико-математические и прикладные аспекты). 2026. № 1 (57). С. 44-53. DOI: 10.61260/2304-0130-2026-1-44-53

Analytical article

CRITERIA FOR ASSESSING THE OPTIMAL PLACEMENT OF EMERGENCY RESCUE SERVICE UNITS

✉ Akhunova Daria G.

Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, Russia

✉ shurakova.darya@bk.ru

Abstract. The article is devoted to the analysis of criteria for assessing the optimal placement of emergency rescue service units. The main scientific approaches are considered, namely: classical location models, covering and maximizing models, models considering survivability and resilience, multicriteria and geospatial methods. Key criteria for assessing optimal placement have been identified, such as response time, coverage of population and infrastructure, economic and financial costs, reliability, risk and vulnerability, and social factors. A comparative analysis of their strengths and weaknesses is carried out. The importance of finding a balance between response speed, costs, and social equity is emphasized, as well as the prospects for applying hybrid models, big data, and AI in emergency rescue service placement planning.

Keywords: emergency services deployment, response time, population coverage, coverage models, economic criteria, system resilience, multicriteria analysis, geographic information systems

For citation: Akhunova D.G. Criteria for assessing the optimal placement of emergency rescue service units // Prirodnye i tekhnogennye riski (fiziko-matematicheskie i prikladnye aspekty) = Natural and man-made risks (physico-mathematical and applied aspects). 2026. № 1 (57). P. 44–53. DOI: 10.61260/2307-7476-2026-1-44-53

Введение

Современные города существуют и развиваются в условиях высокой плотности населения, сложной инфраструктуры и роста числа техногенных и природных угроз. В этих условиях обеспечение безопасности населения и устойчивости функционирования городов и регионов приобретает ключевое значение. Одной из важнейших составляющих системы безопасности является деятельность аварийно-спасательных служб (АСС). Основная задача АСС заключается в оперативном реагировании на чрезвычайные ситуации (ЧС), а также минимизации их последствий и защите жизни и здоровья людей. Эффективность функционирования АСС напрямую зависит от того, насколько рационально (в пределе – оптимально), размещены ее подразделения на обслуживаемой территории.

Наличие современных технических средств и высококвалифицированного персонала, не гарантирует своевременного прибытия спасательных формирований к месту происшествия, что может привести к масштабным потерям. Таким образом, проблема оптимальности размещения подразделений АСС является одной из главных задач в сфере организации гражданской обороны, чрезвычайного реагирования и управления рисками.

Размещение подразделений АСС представляет собой задачу, имеющую стратегическое и тактическое значение. В условиях мегаполисов и крупных агломераций, где транспортная нагрузка, плотность населения и разнообразие объектов критической инфраструктуры создают особые риски, вопрос правильного выбора мест дислокации спасательных формирований приобретает особую значимость. К числу факторов, определяющих актуальность проблемы, относятся:

1. Рост числа ЧС. Современные статистические данные свидетельствуют о росте числа техногенных аварий, пожаров, дорожно-транспортных происшествий, затоплений и иных ЧС. Каждое такое событие требует быстрых и скоординированных действий АСС.

2. Ограниченность ресурсов. Подразделения АСС располагают ограниченными людскими и материальными ресурсами. Увеличение количества подразделений требует значительных финансовых затрат, поэтому необходимо находить баланс между количеством формирований и их территориальным распределением.

3. Неоднородность городской и региональной среды. В пределах одного города могут существовать районы с различной плотностью населения, уровнем транспортной доступности, типами застройки и уровнями риска. Это делает задачу оптимального размещения подразделений многокритериальной и комплексной.

4. Развитие технологий моделирования и анализа данных. В настоящее время, помимо математической оптимизации широкое распространение получают геоинформационные системы (ГИС), методы имитационного моделирования и искусственного интеллекта. Эти инструменты открывают новые возможности для поиска оптимальных решений, но требуют корректного выбора критериев оценки.

Именно поэтому вопрос о том, какие критерии должны использоваться для оценки эффективности размещения подразделений АСС, приобретает фундаментальное значение. От правильного выбора критериев зависит не только точность модели, но и практическая применимость её результатов для органов управления и планирования.

Проблемы критериального анализа

Классическая постановка задачи оптимального размещения подразделений АСС предполагает выбор таких мест дислокации, которые обеспечат минимальное время прибытия подразделений к возможным объектам возникновения ЧС. Минимизация времени реагирования, безусловно, является основным критерием, но в процессе размещения подразделений следует учитывать и другие, такие как: равномерность покрытия территории, уровень риска возникновения ЧС в отдельных районах, плотность населения и концентрация объектов критической инфраструктуры, экономические и организационные затраты

на содержание подразделений, доступность транспортных маршрутов и устойчивость транспортной сети к перегрузкам, возможность масштабирования сети подразделений в случае роста потребностей, ведь в реальных условиях одного критерия оказывается недостаточно.

Кроме того, существенным является вопрос разнородности критериев. Часть из них носит количественный характер (например, среднее время прибытия), другая часть может быть выражена в качественных или экспертных оценках (например, степень удовлетворённости населения уровнем защиты). Эти данные могут иметь разные формы представления: дискретные, непрерывные или лингвистические. Таким образом, задача оптимального размещения подразделений АСС является многокритериальной, многомерной и междисциплинарной. Для её решения требуется интеграция методов математического моделирования, системного анализа и практического опыта эксплуатации АСС.

Рассматривая проблему более глубоко, можно выделить ряд методологических трудностей. Во-первых, это конфликт целей. Минимизация времени реагирования требует увеличения числа подразделений и их равномерного распределения, в то время как минимизация затрат предполагает ограничение количества точек размещения. Во-вторых, неопределённость исходных данных. Трудно предсказать, где и когда ЧС, поэтому работа с вероятностными моделями и сценариями становится обязательной частью анализа. В-третьих, изменчивость внешней среды. Городская инфраструктура постоянно развивается: строятся новые жилые комплексы, изменяются транспортные потоки, появляются новые риски. Это означает, что модели размещения подразделений должны быть адаптивными. В-четвертых, разнородность критериев и их весов. Некоторые критерии могут иметь решающее значение (например, время прибытия), тогда как другие играют вспомогательную роль (например, эстетическая интеграция подразделения в архитектуру района). Определение весов критериев требует применения специальных методов – от экспертных оценок до формализованных процедур многокритериального анализа. В-пятых, социальный и политический контекст. Решения о размещении подразделений АСС не являются исключительно техническими, они затрагивают интересы местных сообществ, органов власти и бизнеса. Следовательно, к критериям должны добавляться показатели социального восприятия и легитимности решений.

Роль оптимизации размещения ограниченных аварийно-спасательных ресурсов в системах обеспечения безопасности

Задача оптимизации, порожденная ограниченными ресурсами, под которыми в контексте статьи понимаются подразделения АСС, имеет прямое влияние на устойчивость функционирования всей системы безопасности и позволяет сократить время прибытия подразделений на место происшествия и тем самым снизить масштаб ущерба. Также позволяет повысить эффективность использования ресурсов (человеческих, технических и финансовых), обеспечить справедливое распределение уровня защиты населения по территории города или региона, повысить доверие общества к государственным и муниципальным службам. Исходя из вышеизложенного, можно утверждать, что критерии оценки оптимальности размещения подразделений АСС являются не просто инструментом математического моделирования, а ключевым фактором формирования стратегий безопасности на всех уровнях управления.

Прежде чем приступить к аналитическому обзору, рассмотрим классические подходы к размещению подразделений. Проблема оптимального размещения объектов безопасности и обслуживания населения имеет богатую историю и относится к задачам логистики и сетевой оптимизации. Первоначально она рассматривалась в контексте размещения пожарных депо и медицинских учреждений. Основными классическими моделями являются [1, 2]:

–Модель минимизации расстояний (p-median problem).

Ее целью является минимизация суммарного расстояния или времени доставки от подразделений до объектов. Слабые стороны модели состоят в игнорировании ограничений ресурсов и изменчивости ситуации.

–Модель покрытия (set covering problem).

Цель данной модели трактуется как обеспечение покрытия максимальной территории подразделениями при ограниченном количестве дислокаций. Ее недостаток в том, что фокусируется только на бинарном критерии (обслуживается/не обслуживается).

–Модель максимального покрытия (maximal covering location problem).

Цель модели заключается в том, что при фиксированном числе подразделений максимизировать число объектов (населённых пунктов, зон), находящихся в пределах нормативного времени реагирования. В основном применялась для планирования размещения пожарных частей и станций скорой помощи.

Эти подходы заложили основу для более сложных моделей, включающих многокритериальные показатели. Однако их применение во многом определяется критериями оптимальности размещения подразделений АСС.

Обзор релевантных работ

Анализ научной литературы позволяет выявить ключевые группы критериев, эволюция которых демонстрирует переход от простых детерминистических моделей к комплексным подходам, учитывающим динамику городской среды, факторы риска и социальные аспекты. В данном разделе систематизируются релевантные работы, посвящённые оценке эффективности размещения служб быстрого реагирования.

1. Время реагирования как ключевой критерий.

Большинство исследований сходится во мнении, что среднее или максимальное время прибытия подразделений к месту происшествия является основным критерием эффективности размещения. В работах по пожарной безопасности [3] время реагирования используется как главный параметр при построении моделей покрытия. В исследованиях [4, 5] учитываются пробочные ситуации, что делает расчёт времени реагирования более сложным. Для крупных мегаполисов важна также дисперсия времени прибытия – она показывает не только среднее значение, но и стабильность работы системы. В исследовании [6] показано влияние времени реагирования АСС на показатели смертности при дорожно-транспортных происшествиях.

2. Критерии охвата и доступности.

Эффективность размещения подразделений измеряется также через процент населения или территории, находящихся в пределах нормативного времени реагирования. В исследовании [7] предложена модель MCLP (Maximum Coverage Location Problem), где при ограниченном числе объектов стремятся охватить максимальное количество жителей. В работе [8] учитываются не только жилые кварталы, но и критическая инфраструктура: школы, больницы, энергетические узлы. Таким образом, критерий охвата тесно связан с вопросами социальной справедливости и равномерности защиты населения [9].

3. Экономические и организационные критерии.

Важным направлением является учёт затрат на строительство, эксплуатацию и содержание подразделений. В моделях [10] предлагается минимизировать не только время реагирования, но и совокупные издержки (капитальные и текущие). Экономический аспект усиливается в условиях ограниченных финансовых ресурсов: выбор между оптимальным временем реагирования и минимальными затратами становится оптимизационной задачей.

В исследованиях [11–13] рассматривается влияние выделенных финансовых средств по программам технического обеспечения и оснащения АСС на показатели готовности аварийно-спасательных средств к реагированию на ЧС и иные происшествия.

4. Надёжность и устойчивость системы.

В последние годы особое внимание уделяется критериям устойчивости и надёжности работы сети подразделений. Рассматривается способность системы сохранять работоспособность при отказе части подразделений (например, в случае масштабной ЧС) [14, 15]. Вводятся критерии избыточности и резервирования: возможность перекрытия зон обслуживания соседними подразделениями. Исследование [16] подчеркивает важность оценки робастности решений – сохранение эффективности при изменении входных данных (транспортная ситуация, плотность населения).

В работах [17–19] значения коэффициентов готовности АСС к реагированию на пожары и ЧС рассматриваются в качестве показателей эффективности управления силами и средствами гарнизона пожарной охраны, на основе этого решается задача обоснования количественного состава подразделений пожарной охраны. В исследовании [20] данная задача решается с использованием имитационного моделирования.

5. Критерии риска и уязвимости территории.

В ряде исследований ключевым становится не столько равномерность покрытия, сколько приоритетное обслуживание территорий с повышенными рисками. Так, например, в работе [21] предлагается учитывать карты уязвимости, где риски ЧС определяются по плотности населения, промышленным объектам, транспортным узлам. В исследованиях на основе GIS-моделирования (например, [22]) размещение подразделений оптимизируется с учётом пространственного распределения рисков.

Таким образом, критерии риска и уязвимости позволяют учитывать неравномерность угроз на территории.

6. Социальные и качественные критерии.

Современные исследования всё чаще включают социальные факторы, такие как: уровень удовлетворённости населения доступностью служб, восприятие справедливости размещения подразделений, соответствие планов развития города [23, 24].

Эти критерии часто выражаются в лингвистической форме («высокая доступность», «низкий уровень риска») и требуют применения методов нечеткой логики.

7. Интеграция методов.

В современных исследованиях всё чаще используются гибридные модели, сочетающие: классические задачи оптимизации (p-median, covering problem), многокритериальные методы (АНР, TOPSIS, ELECTRE), имитационное моделирование и агентные модели, GIS-технологии и пространственный анализ [25, 26].

Например, в работах последних лет применяется Fuzzy-АНР для определения весов критериев, после чего с помощью TOPSIS проводится ранжирование возможных вариантов размещения подразделений [27].

Как показывает анализ релевантных исследований, современная научная мысль предлагает широкий спектр подходов к оценке размещения АСС. Для систематизации этого многообразия и выявления ключевых ориентиров для постановки задачи оптимального размещения представляется целесообразным свести основные выявленные критерии в обобщающую структуру. Такой синтез позволяет наглядно представить их содержание, взаимосвязи и примеры применения в научной литературе, что, и отражено в табл.

Заключение

Проведенное исследование показало, что проблема оптимального размещения подразделений аварийно-спасательных служб носит многокритериальный характер и не может быть решена исключительно с позиции одного показателя, будь то минимизация времени прибытия или же снижение затрат. Анализ научных подходов и практических решений выявил широкий спектр критериев, применяемых для оценки эффективности размещения: временные показатели, характеризующие среднее и максимальное время

реагирования; пространственные критерии, связанные с охватом населения и критически важных объектов; экономические параметры, включающие как капитальные, так и эксплуатационные издержки; показатели надежности и устойчивости, учитывающие способность системы функционировать при отказах и перегрузках, а также социальные факторы, отражающие восприятие населением справедливости и доступности аварийно-спасательных служб.

Таблица

Критерии оптимальности размещения АСС

Критерий	Содержание	Примеры исследований
Время реагирования	Среднее и максимальное время прибытия к месту вызова	[3–6]
Охват населения и территории	Доля населения в пределах нормативного времени	[7–9]
Экономические затраты	Стоимость строительства и эксплуатации подразделений	[10–13]
Устойчивость и надежность системы	Резервирование и перекрытие зон обслуживания	[14–20]
Уровень риска и уязвимости	Приоритетное покрытие опасных зон	[21, 22]
Социальные факторы	Удовлетворенность населения, восприятие справедливости	[23, 24]
Интеграция методов	Сочетание многокритериальных и GIS-моделей	[25–27]

Сильной стороной современных исследований является их стремление к интеграции пространственного анализа, методов оптимизации и геоинформационных технологий, что позволяет учитывать реальные особенности урбанизированных территорий. Вместе с тем, выявлены и слабые стороны, прежде всего связанные с ограниченностью исходных данных, трудностью учета динамики городской среды и противоречивостью самих целей: минимизация затрат зачастую вступает в конфликт с задачей максимального сокращения времени реагирования, а обеспечение равномерного охвата – с приоритетным обслуживанием зон повышенного риска.

Сравнительный анализ существующих подходов демонстрирует, что перспективным направлением является интеграция многокритериальных методов принятия решений с инструментами больших данных и искусственного интеллекта. Такой синтез позволит повысить точность прогнозирования сценариев ЧС, динамики транспортных потоков и изменяющейся демографической структуры. Дополнительно следует подчеркнуть необходимость учета социальных факторов, так как эффективность работы аварийно-спасательных служб определяется не только объективными показателями, но и субъективным доверием со стороны населения.

В целом можно утверждать, что оптимальное размещение подразделений АСС должно рассматриваться как задача поиска баланса между скоростью реагирования, охватом территории, затратами и устойчивостью системы. Решение этой задачи требует комплексного подхода, в котором традиционные методы оптимизации сочетаются

с современными информационными технологиями, а также учитывается социальное измерение безопасности. Такой многогранный взгляд позволяет не только повысить эффективность работы аварийно-спасательных служб, но и существенно снизить социальные и экономические последствия ЧС.

Таким образом, выбор правильных (т.е. научно-обоснованных и практически-ориентированных) критериев оценки оптимального размещения подразделений аварийно-спасательных служб является крайне важным этапом решения данной задачи.

Список источников

1. Karatas M., Razi N., Tozan H. A comparison of p-median and maximal coverage location models with q-coverage requirement // *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 149. P. 169–176.
2. Daskin M.S. Aggregation effects in maximum covering models // *Annals of Operations Research*. 1989. Vol. 18. № 1. P. 113–139.
3. Church R., Velle C.R. The maximal covering location problem // *Papers in regional science*. 1974. Vol. 32. № 1. P. 101–118.
4. Kolesar P., Walker W.E. An algorithm for the dynamic relocation of fire companies // *Operations research*. 1974. Vol. 22. № 2. P. 249–274.
5. Corrigan W.A. Travel time estimation for emergency medical vehicles with applications to location models. University of California, Santa Barbara, 2005.
6. Воднев С.А., Матвеев А.В. Оценка эффективности реагирования аварийно-спасательных служб на чрезвычайные ситуации на транспорте // *Проблемы управления рисками в техносфере*. 2019. № 2(50). С. 110–117.
7. Daskin M.S. A maximum expected covering location model: formulation, properties and heuristic solution // *Transportation science*. 1983. Vol. 17. № 1. P. 48–70.
8. Fiedrich F., Burghardt P. Agent-based systems for disaster management // *Communications of the ACM*. 2007. Vol. 50. № 3. P. 41–42.
9. Jia H., Ordóñez F., Dessouky M. A modeling framework for facility location of medical services for large-scale emergencies // *IEE transactions*. 2007. Vol. 39. № 1. P. 41–55.
10. Ingolfsson A., Budge S., Erkut E. Optimal ambulance location with random delays and travel times // *Health care management science*. 2008. Vol. 11. № 3. P. 262–274.
11. Воднев С.А., Максимов А.В., Матвеев А.В. Модель комплексной оценки процесса технического обеспечения аварийно-спасательных средств подразделений МЧС России // *Проблемы управления рисками в техносфере*. 2018. № 2(46). С. 73–80. EDN YLLCZN.
12. Воднев С.А., Матвеев А.В. Многокритериальная система оценки эффективности управления техническим обеспечением аварийно-спасательных служб // *Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России»*. 2018. № 3. С. 72–80.
13. Воднев С.А., Максимов А.В., Матвеев А.В. Методика выбора оптимального варианта программы технического обеспечения аварийно-спасательных служб в интересах повышения их готовности к ликвидации ЧС на транспорте // *Техносферная безопасность*. 2018. № 3(20). С. 92–99.
14. Blanco V., Gázquez R. Continuous maximal covering location problems with interconnected facilities // *Computers & Operations Research*. 2021. Vol. 132. P. 105310.
15. Marianov V., ReVelle C. The capacitated standard response fire protection siting problem: deterministic and probabilistic models // *Annals of Operations Research*. 1992. Vol. 40. № 1. P. 303–322. DOI <https://doi.org/10.1007/BF02060484>
16. Murray-Tuite P.M., Mahmassani H.S. Methodology for determining vulnerable links in a transportation network // *Transportation Research Record*. 2004. Vol. 1882. № 1. P. 88–96.
17. Водахова В.А., Максимов А.В., Матвеев А.В. Комплексная математическая модель процесса управления силами и средствами гарнизона пожарной охраны // *Проблемы управления рисками в техносфере*. 2015. № 2(34). С. 85–96.

18. Крупкин А.А., Максимов А.В., Матвеев А.В. Методика оценки эффективности управления силами и средствами гарнизона пожарной охраны // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». 2015. № 4. С. 30–34.

19. Крупкин А.А., Максимов А.В., Матвеев А.В. Программное обеспечение системы поддержки принятия решений по управлению силами и средствами гарнизона пожарной охраны // Проблемы управления рисками в техносфере. 2015. № 4(36). С. 75–81.

20. Иванов В.Е., Матвеев А.В. Управление ресурсами пожарных частей с использованием имитационного моделирования // Национальная безопасность и стратегическое планирование. 2023. № 3(43). С. 77–85.

21. Fiedrich F. An HLA-based multiagent system for optimized resource allocation after strong earthquakes // Proceedings of the 2006 winter simulation conference. IEEE, 2006. P. 486–492.

22. Zhao M., Chen Q. Risk-based optimization of emergency rescue facilities locations for large-scale environmental accidents to improve urban public safety // Natural Hazards. 2015. Vol. 75. №. 1. P. 163–189.

23. Kelly J.M., Swindell D. Service quality variation across urban space: First steps toward a model of citizen satisfaction // Journal of urban affairs. 2002. Vol. 24. №. 3. P. 271–288.

24. Erkut E., Ingolfsson A., Erdoğan G. Ambulance location for maximum survival // Naval Research Logistics (NRL). 2008. Vol. 55. №. 1. P. 42–58.

25. Liu K. GIS-based MCDM framework combined with coupled multi-hazard assessment for site selection of post-earthquake emergency medical service facilities in Wenchuan, China // International Journal of Disaster Risk Reduction. 2022. V. 73. P. 102873.

26. Emergency logistics centers site selection by multi-criteria decision-making and GIS / Feng Z. [et al.] // International journal of disaster risk reduction. 2023. Vol. 96. P. 103921.

27. Arana-Jiménez M., Blanco V., Fernández E. On the fuzzy maximal covering location problem // European Journal of Operational Research. 2020. Vol. 283. №. 2. P. 692–705.

References

1. Karatas M., Razi N., Tozan H. A comparison of p-median and maximal coverage location models with q-coverage requirement // Procedia Engineering. 2016. Vol. 149. P. 169–176.

2. Daskin M.S. Aggregation effects in maximum covering models // Annals of Operations Research. 1989. Vol. 18. №. 1. P. 113–139.

3. Church R., Velle C.R. The maximal covering location problem // Papers in regional science. 1974. Vol. 32. №. 1. P. 101–118.

4. Kolesar P., Walker W.E. An algorithm for the dynamic relocation of fire companies // Operations research. 1974. Vol. 22. №. 2. P. 249–274.

5. Corrigan W.A. Travel time estimation for emergency medical vehicles with applications to location models. University of California, Santa Barbara, 2005.

6. Vodnev S.A., Matveev A.V. Ocenka effektivnosti reagirovaniya avarijno-spasatel'nyh sluzhb na chrezvychajnye situacii na transporte // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere. 2019. № 2(50). P. 110–117.

7. Daskin M.S. A maximum expected covering location model: formulation, properties and heuristic solution // Transportation science. 1983. Vol. 17. №. 1. P. 48–70.

8. Fiedrich F., Burghardt P. Agent-based systems for disaster management // Communications of the ACM. 2007. Vol. 50. №. 3. P. 41–42.

9. Jia H., Ordóñez F., Dessouky M. A modeling framework for facility location of medical services for large-scale emergencies // IIE transactions. 2007. Vol. 39. №. 1. P. 41–55.

10. Ingolfsson A., Budge S., Erkut E. Optimal ambulance location with random delays and travel times // Health care management science. 2008. Vol. 11. №. 3. P. 262–274.

11. Vodnev S.A., Maksimov A.V., Matveev A.V. Model' kompleksnoj ocenki processa tekhnicheskogo obespecheniya avarijno-spasatel'nyh sredstv podrazdelenij MCHS Rossii // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere. 2018. № 2(46). S. 73–80. EDN YLLCZN.
12. Vodnev S.A., Matveev A.V. Mnogokriterial'naya sistema ocenki effektivnosti upravleniya tekhnicheskim obespecheniem avarijno-spasatel'nyh sluzhb // Nauchno-analiticheskij zhurnal «Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta Gosudarstvennoj protivopozharnoj sluzhby MCHS Rossiï». 2018. № 3. P. 72–80.
13. Vodnev S.A., Maksimov A.V., Matveev A.V. Metodika vybora optimal'nogo varianta programmy tekhnicheskogo obespecheniya avarijno-spasatel'nyh sluzhb v interesah povysheniya ih gotovnosti k likvidacii CHS na transporte // Tekhnosfernaya bezopasnost'. 2018. № 3(20). S. 92–99.
14. Blanco V., Gázquez R. Continuous maximal covering location problems with interconnected facilities // Computers & Operations Research. 2021. Vol. 132. P. 105310.
15. Marianov V., ReVelle C. The capacitated standard response fire protection siting problem: deterministic and probabilistic models // Annals of Operations Research. 1992. Vol. 40. № 1. P. 303–322. DOI <https://doi.org/10.1007/BF02060484>
16. Murray-Tuite P.M., Mahmassani H.S. Methodology for determining vulnerable links in a transportation network // Transportation Research Record. 2004. Vol. 1882. № 1. P. 88–96.
17. Vodahova V.A., Maksimov A.V., Matveev A.V. Kompleksnaya matematicheskaya model' processa upravleniya silami i sredstvami garnizona pozharnoj ohrany // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere. 2015. № 2(34). S. 85–96.
18. Krupkin A.A., Maksimov A.V., Matveev A.V. Metodika ocenki effektivnosti upravleniya silami i sredstvami garnizona pozharnoj ohrany // Nauchno-analiticheskij zhurnal «Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta Gosudarstvennoj protivopozharnoj sluzhby MCHS Rossiï». 2015. № 4. S. 30–34.
19. Krupkin A.A., Maksimov A.V., Matveev A.V. Programmnoe obespechenie sistemy podderzhki prinyatiya reshenij po upravleniyu silami i sredstvami garnizona pozharnoj ohrany // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere. 2015. № 4(36). P. 75–81.
20. Ivanov V.E., Matveev A.V. Upravlenie resursami pozharnyh chastej s ispol'zovaniem imitacionnogo modelirovaniya // Nacional'naya bezopasnost' i strategicheskoe planirovanie. 2023. № 3(43). P. 77–85.
21. Fiedrich F. An HLA-based multiagent system for optimized resource allocation after strong earthquakes // Proceedings of the 2006 winter simulation conference. IEEE, 2006. P. 486–492.
22. Zhao M., Chen Q. Risk-based optimization of emergency rescue facilities locations for large-scale environmental accidents to improve urban public safety // Natural Hazards. 2015. Vol. 75. № 1. P. 163–189.
23. Kelly J.M., Swindell D. Service quality variation across urban space: First steps toward a model of citizen satisfaction // Journal of urban affairs. 2002. Vol. 24. № 3. P. 271–288.
24. Erkut E., Ingolfsson A., Erdoğan G. Ambulance location for maximum survival // Naval Research Logistics (NRL). 2008. Vol. 55. № 1. P. 42–58.
25. Liu K. GIS-based MCDM framework combined with coupled multi-hazard assessment for site selection of post-earthquake emergency medical service facilities in Wenchuan, China // International Journal of Disaster Risk Reduction. 2022. V. 73. P. 102873.
26. Emergency logistics centers site selection by multi-criteria decision-making and GIS / Feng Z. [et al.] // International journal of disaster risk reduction. 2023. Vol. 96. P. 103921.
27. Arana-Jiménez M., Blanco V., Fernández E. On the fuzzy maximal covering location problem // European Journal of Operational Research. 2020. Vol. 283. № 2. P. 692–705.

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 5.11.2025; одобрена после рецензирования: 20.01.2026;
принята к публикации: 27.01.2026

Information about the article:

The article was submitted to the editorial office: 5.11.2025; approved after review: 20.01.2026;
accepted for publication: 27.01.2026

Сведения об авторах:

Ахунова Дарья Геннадьевна, адъюнкт Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), e-mail: shurakova.darya@bk.ru, <https://orcid.org/0009-0009-3361-3464>, SPIN-код: 4802-3758

Information about the authors:

Akhunova Daria G., adjunct of Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovskiy ave., 149), e-mail: shurakova.darya@bk.ru, <https://orcid.org/0009-0009-3361-3464>, SPIN: 4802-3758

Научная статья

УДК 004.94:614.841.44; DOI: 10.61260/2304-0130-2026-1-54-58

ПРИМЕНЕНИЕ НОВЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ В ТОРГОВО-РАЗВЛЕКАТЕЛЬНЫХ ЦЕНТРАХ

✉ Соров Арсений Алексеевич;

Худеева Юлия Сергеевна;

Бурмистрова Наталья Александровна.

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, Россия

✉ djimir11@yandex.ru

Аннотация. Проблема обеспечения пожарной безопасности в торгово-развлекательных центрах остается чрезвычайно актуальной в связи с их сложной планировкой, массовым пребыванием людей и высокими рисками при возникновении чрезвычайных ситуаций. Существующие системы оповещения и управления эвакуацией часто являются статическими и не адаптируются к динамическому развитию опасных факторов пожара. Целью данного исследования стала разработка математической модели интеллектуальной системы управления эвакуацией в торгово-развлекательных центрах, интегрирующей данные мониторинга в реальном времени для динамической маршрутизации потоков людей. В работе предложена агентно-ориентированная модель, описывающая движение посетителей (агентов) в условиях изменяющейся обстановки. Распространение формализовано с помощью системы дифференциальных уравнений, учитывающей скорость распространения дыма и рост температуры, с использованием фундаментальных подходов к прогнозированию.

Ключевые слова: пожарная безопасность, торгово-развлекательный центр, математическое моделирование, агентно-ориентированная модель, динамическая маршрутизация, опасные факторы пожара, эвакуация, интеллектуальная система

Для цитирования: Соров А.А., Худеева Ю.С., Бурмистрова Н.А. Применение новых информационных технологий для обеспечения пожарной безопасности в торгово-развлекательных центрах // Природные и техногенные риски (физико-математические и прикладные аспекты). 2026. № 1 (57). С. 54–58. DOI: 10.61260/2307-7476-2026-1-54-58

Scientific article

APPLICATION OF NEW INFORMATION TECHNOLOGIES FOR ENSURING FIRE SAFETY IN SHOPPING AND ENTERTAINMENT CENTERS

✉ Sorov Arseny A.,

Khudeyeva Yulia S.,

Burmistrova Natalya A.

Saint-Petersburg university of state fire service of EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, Russia

✉ djimir11@yandex.ru

Abstract. The problem of ensuring fire safety in shopping and entertainment centers remains extremely relevant due to their complex layout, mass occupancy, and high risks in emergency situations. Existing warning and evacuation control systems are often static and do not adapt to the dynamic development of dangerous fire factors. The aim of this study was to develop a mathematical model of an intelligent evacuation control system, integrating real-time monitoring data for dynamic routing of human flows. The paper proposes an agent-based model describing the movement of visitors under changing conditions. The spread of fire hazards is formalized using a system of differential equations that takes into account the rate of smoke spread and temperature increase, based on fundamental forecasting approaches.

Keywords: fire safety, shopping and entertainment center, mathematical modeling, agent-based model, dynamic routing, dangerous fire factors, evacuation, intelligent system

For citation: Sorov A.F., Khudeeva I.S., Burmistrova N.A. Application of new information technologies for ensuring fire safety in shopping and entertainment centers // *Prirodnye i tekhnogennye riski (fiziko-matematicheskie i prikladnye aspekty) = Natural and man-made risks (physico-mathematical and applied aspects)*. 2026. № 1 (57). P. 54–58. DOI: 10.61260/2307-7476-2026-1-54-58

Введение

Торгово-развлекательные центры (ТРЦ) как объекты с массовым пребыванием людей характеризуются повышенными требованиями к пожарной безопасности [1]. Сложная архитектурно-планировочная структура, обширные атриумы, многоуровневые пространства и большое количество посетителей создают значительные трудности для организации безопасной и своевременной эвакуации в случае возникновения пожара [2]. Статистика показывает, что основной причиной гибели людей на пожарах в ТРЦ является не непосредственное воздействие пламени, а отравление продуктами горения и паника, приводящая к неэффективной эвакуации [3].

Традиционные системы противопожарной защиты, включая автоматическую пожарную сигнализацию (АПС) и систему оповещения и управления эвакуацией (СОУЭ), в основном носят реактивный характер и не учитывают динамику развития опасных факторов пожара (ОФП) [1, 4]. Статические планы эвакуации и заранее запрограммированные сценарии могут оказаться неэффективными при непредсказуемом распространении огня и дыма.

Современное развитие информационных технологий, таких как Интернет вещей (IoT), большие данные (Big Data) и цифровые двойники, открывает новые возможности для создания проактивных и адаптивных систем безопасности [1, 3, 4]. Ключевой задачей при этом является разработка адекватных математических моделей, позволяющих не только описывать, но и прогнозировать развитие ситуации в реальном времени [2, 4, 5].

Целью данного исследования является разработка и верификация математической модели интеллектуальной системы управления эвакуацией в ТРЦ, основанной на интеграции агентно-ориентированного моделирования поведения людей и математической модели распространения ОФП с алгоритмом динамической оптимизации потоков эвакуации.

Материалы и методы исследования

1. Концептуальная модель системы. Объект моделирования – условный ТРЦ, представленный в виде ориентированного графа $G=(V, E)$, где V – множество вершин (помещения, зоны, узлы), E – множество ребер (коридоры, дверные проемы, лестницы). Каждой вершине $v_i \in V$ ставится в соответствие параметр задымленности $S_i(t)$ и температуры $T_i(t)$. Каждому ребру $e_j \in E$ присваивается пропускная способность C_j и текущая загруженность $L_j(t)$.

2. Математическая модель распространения ОФП. Динамика задымленности и температуры в помещениях описывается системой дифференциальных уравнений, учитывающих перенос между смежными зонами и источники генерации, на основе классических подходов к прогнозированию [6]:

$$\frac{dS_i}{dt} = \alpha \sum_{j \in N(i)} (S_j - S_i) + Q_s(t) \cdot I_{fire}(v_i),$$

$$\frac{dT_i}{dt} = \beta \sum_{j \in N(i)} (T_j - T_i) + Q_t(t) \cdot I_{fire}(v_i),$$

где $N(i)$ – множество вершин, смежных с v_i ;

α, β – коэффициенты турбулентного переноса и теплопередачи;

$Q_s(t), Q_i(t)$, – функции, описывающие интенсивность выделения дыма и тепла от очага пожара;

$I_{fire}(v_i)$ индикаторная функция, равная 1, если в зоне v_i находится очаг пожара.

3. Агентно-ориентированная модель эвакуации. Каждый посетитель ТРЦ моделируется как автономный агент A_k с набором атрибутов: координаты (x_k, y_k) , скорость движения v_k , уровень «паники» P_k , порог восприятия опасности D_k . Движение агента определяет правило:

$$\vec{v}_k(t+1) = (1 - P_k) \cdot \vec{U}_{route} + P_k \cdot \vec{U}_{panic} + \vec{\xi},$$

где \vec{U}_{route} – вектор направления, рекомендуемый системой динамической маршрутизации;

\vec{U}_{panic} – вектор, моделирующий хаотичное движение в состоянии паники;

$\vec{\xi}$ – случайная компонента, учитывающая индивидуальные отклонения.

4. Алгоритм динамической маршрутизации. На каждом шаге моделирования t для каждой вершины графа вычисляется стоимость прохода $Cost(v_i)$, зависящая от $S_i(t)$, $T_i(t)$ и $L_j(t)$ на исходящих ребрах. На основе алгоритма Дейкстры находится безопасный маршрут до ближайшего выхода, который передается агентам, находящимся в зоне влияния данной вершины. Система имитирует работу сети IoT-датчиков, предоставляющих данные для расчета $Cost(v_i)$ в реальном времени, что отражает принципы построения современных централизованных систем мониторинга [3].

Представим результаты исследования.

Для оценки эффективности предложенной модели был проведен вычислительный эксперимент. Моделировались два сценария развития пожара в ТРЦ общей площадью 25 000 квадратных метров с расчетным количеством посетителей 1500 человек (табл.).

Сценарий 1 (Базовый): Использование статической СОУЭ. Эвакуация происходит по заранее заданным и неизменным кратчайшим путям.

Сценарий 2 (Интеллектуальный): Работа предложенной системы с динамической маршрутизацией на основе реальных данных о распространении ОФП.

Таблица

Сравнительные результаты вычислительного эксперимента

Параметр	Сценарий 1 (Статический)	Сценарий 2 (Интеллектуальный)	Эффективность, %
Общее время эвакуации, сек.	720	504	-30.0 %
Доля людей, попавших в зоны с $S > S_{crit}$	22 %	7 %	-68.2 %
Доля людей, попавших в зоны с $T > T_{crit}$	18 %	5 %	-72.2 %
Коэффициент использования основного выхода	0.95	0.65	–

Анализ результатов (табл.) показал, что интеллектуальная система позволила существенно сократить время эвакуации за счет равномерного распределения потоков по всем доступным выходам и исключения маршрутов, ведущих через задымленные зоны.

Полученные результаты свидетельствуют о высокой эффективности применения агентно-ориентированного моделирования в сочетании с динамической логикой принятия решений для задач управления эвакуацией. Сокращение времени эвакуации на 30 % является критически важным фактором, поскольку время является лимитирующим параметром при воздействии ОФП на человека.

Ключевым преимуществом предложенного подхода является его проактивность. Система не просто реагирует на срабатывание датчиков, а прогнозирует развитие ситуации и заблаговременно перенастраивает управляющие воздействия, что соответствует перспективному направлению создания активных систем поддержки принятия решений. Это позволяет избежать попадания людей в уже опасные зоны, а не выводить их оттуда.

Важным аспектом является учет психологического фактора («паники») в модели агентов. Это позволило получить более реалистичную картину поведения толпы и оценить, как интеллектуальная система может компенсировать деструктивные поведенческие паттерны за счет четких и своевременных инструкций, передаваемых через современные каналы связи [3].

Предложенная модель может служить ядром для создания цифрового двойника ТРЦ, используемого как для оперативного управления в чрезвычайной ситуации, так и для анализа рисков и планирования мероприятий по пожарной безопасности на этапе проектирования объекта, что является одним из ключевых применений информационных технологий в данной области [2, 7].

Заключение

Подведем итог результатам исследования.

1. Разработана математическая модель интеллектуальной системы обеспечения пожарной безопасности для ТРЦ, интегрирующая агентно-ориентированное моделирование эвакуации, дифференциальные уравнения распространения ОФП и алгоритм динамической маршрутизации.

2. Проведен вычислительный эксперимент, доказавший высокую эффективность предложенного подхода. Установлено, что внедрение интеллектуальной системы позволяет сократить расчетное время полной эвакуации на 25–30 % и снизить долю людей, подвергшихся воздействию критических ОФП, на 15–20 % по сравнению с традиционными статическими системами.

3. Показано, что применение новых информационных технологий, в частности, концепции цифрового двойника и алгоритмов динамической оптимизации, позволяет перейти от реактивного к проактивному управлению пожарной безопасностью на объектах с массовым пребыванием людей, что развивает идеи, заложенные в работах [1–3].

Результаты работы имеют практическую значимость для проектирования современных интегрированных систем безопасности ТРЦ и могут быть использованы для обоснования мероприятий по повышению их защищенности.

Список литературы

1. Белобородова О.И., Валиев Р.Р. Применение сквозных цифровых технологий для обеспечения пожарной безопасности // Актуальные вопросы совершенствования инженерных систем обеспечения пожарной безопасности объектов. 2023. С. 61–66.

2. Акимов В.А., Егоров В.М. Информационные технологии прогнозирования опасных факторов пожара // Проблемы и перспективы развития IT- и VR-технологий в области комплексной безопасности: сб. материалов III Всерос. науч.-практ. конф. 2024.

3. Кошмаров Ю.А. Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении: учеб. пособие. М.: Академия ГПС МЧС России. 2000. 118 с.

4. Прогноз основных показателей пожарной опасности органических соединений с использованием дескрипторов и искусственных нейронных сетей / Королев Д.С. [и др.] // Пожаровзрывобезопасность. 2015. Т. 24. № 9. С. 32–38.

5. СП 1.13130.2020. Системы противопожарной защиты. Эвакуационные пути и выходы (утв. приказом МЧС России от 19 марта 2020 г. № 194). Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс»ю

6. Применение информационных технологий в сфере обеспечения пожаробезопасности / Захаров Г.В. [и др.] // Моделирование информационных систем. 2023. С. 167–171.

7. Ronchi E., Nilsson D. Fire evacuation in high-rise buildings: a review of human behaviour and modelling research // Fire Science Reviews. 2013. Vol. 2. No. 1. P. 7.

References

1. Beloborodova O.I., Valiev R.R. Primenenie skvoznyh cifrovyyh tekhnologiy dlya obespecheniya pozharnoj bezopasnosti // Aktual'nye voprosy sovershenstvovaniya inzhenernyh sistem obespecheniya pozharnoj bezopasnosti ob'ektov. 2023. S. 61–66.

2. Akimov V.A., Egorov V.M. Informacionnye tekhnologii prognozirovaniya opasnyh faktorov pozhara // Problemy i perspektivy razvitiya IT- i VR-tekhnologiy v oblasti kompleksnoj bezopasnosti: sb. materialov III Vseros. nauch.-prakt. konf. 2024.

3. Koshmarov YU.A. Prognozirovaniye opasnyh faktorov pozhara v pomeshchenii: ucheb. posobie. M.: Akademiya GPS MCHS Rossii. 2000. 118 s.

4. Prognoz osnovnyh pokazatelej pozharnoj opasnosti organicheskikh soedinenij s ispol'zovaniem deskriptorov i iskusstvennyh nejronnyh setej / Korolev D.S. [i dr.] // Pozharovzryvobezopasnost'. 2015. T. 24. № 9. S. 32–38.

5. СП 1.13130.2020. Sistemy protivopozharnoj zashchity. Evakuacionnye puti i vyhody (utv. prikazom MCHS Rossii ot 19 marta 2020 g. № 194). Dostup iz sprav.-pravovoj sistemy «KonsultantPlyus»yu

6. Primenenie informacionnyh tekhnologiy v sfere obespecheniya pozharobezopasnosti / Zaharov G.V. [i dr.] // Modelirovaniye informacionnyh sistem. 2023. S. 167–171.

7. Ronchi E., Nilsson D. Fire evacuation in high-rise buildings: a review of human behaviour and modelling research // Fire Science Reviews. 2013. Vol. 2. No. 1. P. 7.

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 28.11.2025; одобрена после рецензирования: 12.02.2026; принята к публикации: 19.02.2026

The information about article:

The article was submitted to the editorial office: 28.11.2025; approved after review: 12.02.2026; accepted for publication: 19.02.2026

Сведения об авторе или авторах

Соров Арсений Алексеевич, обучающийся факультета подготовки кадров высшей квалификации, Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), e-mail: djimil1@yandex.ru

Худеева Юлия Сергеевна, обучающийся факультета подготовки кадров высшей квалификации, Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), e-mail: yhs92@mail.ru

Бурмистрова Наталия Александровна, доцент кафедры высшей математики и системного моделирования сложных процессов, Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), кандидат педагогических наук, доцент, e-mail: bur_na_a@mail.ru, SPIN-код: 7441-0553

Sorov Arseniy A., student of the faculty of advanced training of Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovskiy ave., 149), e-mail: djimil1@yandex.ru

Khudeyeva Yulia S., student of the faculty of advanced training of Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovskiy ave., 149), e-mail: yhs92@mail.ru

Burmistrova Natalia A., associate professor of the department of higher mathematics and system modeling of complex processes of Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovskiy ave., 149), candidate of pedagogical sciences, associate professor, e-mail: bur_na_a@mail.ru, SPIN: 7441-0553

Научная статья

УДК 004.942:519.6; DOI: 10.61260/2304-0130-2026-1-59-70

ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНОГО СПОСОБА ЭВАКУАЦИИ ПОСТРАДАВШЕГО НАСЕЛЕНИЯ В ПУНКТЫ ВРЕМЕННОГО РАЗМЕЩЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ВЕДЕНИЯ ВОЕННЫХ КОНФЛИКТОВ

✉ Кондратков Александр Сергеевич;

Усачева Татьяна Валерьевна.

Академия гражданской защиты МЧС России, Химки, Россия

✉ kondratkovsascha@gmail.com

Аннотация. В работе описан рациональный способ планирования эвакуации населения в условиях ведения военных конфликтов. Для этого предлагается использовать математическую модель распределения населения по пунктам временного размещения. Математическая модель построена на основе транспортной задачи, включающая план перевозок пострадавшего населения из сборных эвакуационных пунктов субъекта Российской Федерации в пункты временного размещения населения с целью минимизации финансовых затрат при организации перевозок.

Ключевые слова: военный конфликт, математическое моделирование, пункты временного размещения, транспортная задача, эвакуация

Для цитирования: Кондратков А.С., Усачева Т.В. Выбор рационального способа эвакуации пострадавшего населения в пункты временного размещения в условиях ведения военных конфликтов // Природные и техногенные риски (физико-математические и прикладные аспекты). 2026. № 1 (57). С. 59–70. DOI: 10.61260/2307-7476-2026-1-59-70

Scientific article

CHOOSING A RATIONAL WAY TO EVACUATE THE AFFECTED POPULATION TO TEMPORARY ACCOMMODATION FACILITIES IN THE CONTEXT OF MILITARY CONFLICTS

Kondratkov Alexander S.;

Usacheva Tatyana V.

Civil Defense Academy of EMERCOM of Russia, Khimki, Russia

Abstract. The work describes a rational way to plan the evacuation of the population in the context of military conflicts. To do this, it is proposed to use a mathematical model of the distribution of the population by temporary accommodation. The mathematical model is based on a transport problem, which includes a transportation plan for the affected population from the combined evacuation points of the subject of the Russian Federation to temporary accommodation points in order to minimize financial costs in organizing transportation.

Keywords: military conflict, mathematical modeling, temporary accommodation facilities, transport task, evacuation.

For citation: Kondratkov A.S., Usacheva T.V. Choosing a rational way to evacuate the affected population to temporary accommodation facilities in the context of military conflicts // Prirodnye i tekhnogennye riski (fiziko-matematicheskie i prikladnye aspekty) = Natural and man-made risks (physico-mathematical and applied aspects). 2026. № 1 (57). P. 59–70. DOI: 10.61260/2307-7476-2026-1-59-70

Введение

24 февраля 2022 г. в целях защиты русскоязычного населения на территории Донбасса Российская Федерация начала проводить специальную военную операцию (СВО) [1].

С начала СВО возникла необходимость в защите населения как на вновь присоединенных территориях (Донецкая и Луганская народные республики, Херсонская и Запорожская области), так и в других (в основном, приграничных) субъектах Российской Федерации. МЧС России в условиях ведения вооруженного конфликта решает комплекс задач в области защиты населения и территорий [2]. Одной из приоритетных является эвакуация пострадавшего населения из зоны ведения боевых действий в расположенные вне зон возможных опасностей безопасные районы [3].

6 августа 2024 г. Вооруженные формирования Украины прорвали российскую границу в Курской области. В течение 9 месяцев на территории данного региона шли ожесточенные бои. За первые 6 дней из 8 приграничных районов Курской области было эвакуировано около 76 тыс. человек, всего данные территории покинуло 121 тыс. жителей [4]. Часть населения были размещены в пункты временного размещения (ПВР), где в дальнейшем решался вопрос их расселения в маневренный фонд.



Рис. 1. Карта Курской области

Эвакуация населения подразумевает ряд подзадач, которые необходимо выполнить (выделение финансовых и материальных средств, развертывание и обеспечение пунктов временного размещения, задействование большого количества людей, техники для выполнения задачи и другие операции). Кроме того, так как данные мероприятия проводятся в условиях ведения военных действий, эвакуация должна проходить, в частности, оперативно и скрытно. Любые задержки при проведении эвакуационных мероприятий резко увеличивают вероятность гибели (ранения) гражданского населения.



Рис. 2. Эвакуация жителей приграничных районов Курской области

Вышеизложенные обстоятельства позволяют сформулировать противоречие – необходимости организации и проведения эвакуации, которая с одной стороны должна пройти всеми имеющимися силами в кратчайшие сроки с целью снижения потерь, а с другой стороны – должна пройти рационально с возможностью минимального использования финансовых ресурсов и снижения издержек.

Целью данной работы является определения рационального способа эвакуации пострадавшего населения в пункты временного размещения при помощи использования методов математического моделирования.

Для решения данного противоречия предлагается использовать одну из математических задач линейного программирования специального вида – транспортная задача [5]. Использование данного метода позволяет снизить издержки при организации перевозок (в нашем случае – организация перевозки пострадавшего населения) при использовании различного вида транспорта [6]. При решении транспортной задачи, лицо, принимающее решение, способен оценить минимальные затраты на проведение эвакуации в кратчайшие сроки [7].

Для решения данной задачи необходимо определить исходные данные. В случае проведения эвакуации, исходными данными являются:

- населенные пункты (районы), попавшие в зону вооруженного конфликта;
- количество пострадавшего населения, подлежащее эвакуации;
- количество ПВР, их вместимость;
- стоимость перевозки (суммарные затраты на организацию и снабжение водой и питанием, ГСМ, сопровождение и другие услуги) из сборных эвакуационных пунктов в ПВР.

Постановка задачи. Пусть имеется P сборных эвакуационных пунктов для эвакуации населения $P_1, P_2, P_3... P_k$, в которых соответственно находится $p_1, p_2, p_3... p_k$ человек.

Пусть имеется Q субъектов $Q_1, Q_2, Q_3... Q_v$, получивших распоряжение на размещение в своих ПВР пострадавшее население и имеющих соответствующую вместимость $q_1, q_2, q_3... q_v$.

Известна стоимость перевозки g_{kv} населения из пунктов сбора P_k в ПВР Q_v ($k = 1, 2...h, v = 1, 2...l$).

Суммарная стоимость доставки эвакуируемого населения из каждого сборного эвакуационного пункта в каждый ПВР представлена в виде матрицы стоимости G .

$$G = \begin{pmatrix} 7 & 10 & 11 & 12 & 9 \\ 16 & 8 & 12 & 10 & 13 \\ 14 & 11 & 9 & 14 & 12 \\ 9 & 15 & 6 & 13 & 7 \\ 10 & 10 & 11 & 8 & 5 \end{pmatrix}$$

Обозначим коэффициентами P_k сборные эвакуационные пункты Курской области, где находится пострадавшее население:

P_1 – Суджанский район, 25 тыс. человек.

P_2 – Льговский район, 16 тыс. человек.

P_3 – Кореневский и Глушковский районы, 13 тыс. человек.

P_4 – Беловский и Большесолдатский районы, 12 тыс. человек.

P_5 – Рыльский и Хомутовский районы, 10 тыс. человек.

Обозначим коэффициентами Q_v ПВР субъектов Российской Федерации, куда необходимо переселить людей:

Q_1 – пункты субъекта №1, вместимостью 15 тыс. человек.

Q_2 – пункты субъекта №2, вместимостью 18 тыс. человек.

Q_3 – пункты субъекта №3, вместимостью 10 тыс. человек.

Q_4 – пункты субъекта №4, вместимостью 19 тыс. человек.

Q_5 – пункты субъекта №5, вместимостью 14 тыс. человек.

Данные сводим в табл. 1.

Таблица 1

Исходные данные

Кол-во эвакуируемого населения/ вместимость ПВР, тыс. человек	Q_1	Q_2	Q_3	Q_4	Q_5	Возможности
P_1	7	10	11	12	9	25
P_2	16	8	12	10	13	16
P_3	14	11	9	14	12	13
P_4	9	15	6	13	7	12
P_5	10	10	11	8	5	10
Потребности	15	18	10	19	14	76/76

Обозначим через m_{kv} количество пострадавшего населения, эвакуируемого из зоны P_k и направляемого в ПВР Q_v ($k=1,2,\dots,h$, $v=1,2,\dots,l$). В таком случае суммарная стоимость перевозки можно рассчитать по формуле:

$$J = \sum_{k=1}^5 \sum_{v=1}^5 g_{kv} x_{kv} = 7m_{11} + 10m_{12} + 11m_{13} + 12m_{14} + 9m_{15} + 16m_{21} + 8m_{22} + 12m_{23} + 10m_{24} + 13m_{25} + 14m_{31} + 11m_{32} + 9m_{33} + 14m_{34} + 12m_{35} + 9m_{41} + 15m_{42} + 6m_{43} + 13m_{44} + 7m_{45} + 10m_{51} + 10m_{52} + 11m_{53} + 8m_{54} + 5m_{55} \quad (1)$$

Следующим шагом необходимо определить ограничения для решения данной задачи:

• Так как количество эвакуируемого населения не может быть отрицательным, то. $x_{kv} \geq 0$;

• Исходя из количества эвакуируемого населения и вместимости ПВР, необходимо указать следующие ограничения:

Для сборных эвакуационных пунктов:

$$\begin{cases} m_{11} + m_{12} + m_{13} + m_{14} + m_{15} \geq 25 & \text{– для Суджанского района;} \\ m_{21} + m_{22} + m_{23} + m_{24} + m_{25} \geq 16 & \text{– для Льговского района;} \\ m_{31} + m_{32} + m_{33} + m_{34} + m_{35} \geq 13 & \text{– для Кореневского и Глушковского районов;} \\ m_{41} + m_{42} + m_{43} + m_{44} + m_{45} \geq 12 & \text{– для Беловского и Большесолдатского районов;} \\ m_{51} + m_{52} + m_{53} + m_{54} + m_{55} \geq 10 & \text{– для Рыльского и Хомутовского районов.} \end{cases}$$

Для ПВР:

$$\begin{cases} m_{11} + m_{21} + m_{31} + m_{41} + m_{51} \geq 15 & \text{– для пунктов субъекта №1;} \\ m_{12} + m_{22} + m_{32} + m_{42} + m_{52} \geq 18 & \text{– для пунктов субъекта №2;} \\ m_{13} + m_{23} + m_{33} + m_{43} + m_{53} \geq 10 & \text{– для пунктов субъекта №3;} \\ m_{14} + m_{24} + m_{34} + m_{44} + m_{54} \geq 19 & \text{– для пунктов субъекта №4;} \\ m_{15} + m_{25} + m_{35} + m_{45} + m_{55} \geq 14 & \text{– для пунктов субъекта №5.} \end{cases}$$

Проверяем задачу на закрытость:

$$\sum_{k=1}^5 P_k = 76; \quad \sum_{v=1}^5 Q_v = 76.$$

Так как суммарное количество эвакуируемого населения равно суммарному количеству ПВР, то данная задача является закрытой [8].

При помощи метода наименьшего элемента, построим первый опорный план транспортной задачи (табл. 2).

Суть метода – в таблице выбираем клетку с наименьшей стоимостью перевозки, затем в эту клетку записываем наименьшую из соответствующих значений данного столба q_v или строки p_k .

Таблица 2

Опорный план транспортной задачи № 1

Кол-во эвакуируемого населения/ вместимость ПВР, тыс. человек	Q_1	Q_2	Q_3	Q_4	Q_5	Возможности
P_1	7 15	10 2	11	12 6	9 2	25
P_2	16	8 16	12	10	13	16
P_3	14	11	9	14 13	12	13
P_4	9	15	6 10	13	7 2	12
P_5	10	10	11	8	5 10	10
Потребности	15	18	10	19	14	76/76

В данном опорном плане все пострадавшее население эвакуировано в ПВР. План соответствует системе ограничений данной задачи, значит, он является допустимым.

Необходимо проверить опорный план на вырожденность, для этого должно соблюдаться условие – число занятых клеток в таблице должно соответствовать равенству $k+v-I=9$. Так как количество занятых клеток действительно равно 9, то план является невырожденным.

Значение целевой функции для данного опорного плана равняется:

$$J_1 = 7 \cdot 15 + 10 \cdot 2 + 12 \cdot 6 + 9 \cdot 2 + 8 \cdot 16 + 14 \cdot 13 + 6 \cdot 10 + 7 \cdot 2 + 5 \cdot 10 = 649 \quad (1)$$

Теперь необходимо проверить план на оптимальность с помощью метода потенциалов[9]. В случае если данный план является неоптимальным, то его будет необходимо улучшить.

По количеству строк и столбцов в плане устанавливаем соответствующее число потенциалов u_1, u_2, u_3, u_4, u_5 – потенциалы сборных эвакуационных пунктов, и w_1, w_2, w_3, w_4, w_5 – потенциалы ПВР.

Для занятых клеток таблицы 2 составим систему уравнений типа $u_k + w_v = g_{kv}$.

Предположим, что $u_1=0$, в таком случае получим следующие значения:

$$\begin{aligned} u_1 + w_1 = 7 &\rightarrow w_1 = 7 & u_3 + w_4 = 14 &\rightarrow u_3 = 2 \\ u_1 + w_2 = 10 &\rightarrow w_2 = 10 & u_4 + w_3 = 6 &\rightarrow w_3 = 8 \\ u_1 + w_4 = 12 &\rightarrow w_4 = 12 & u_4 + w_5 = 7 &\rightarrow u_4 = -2 \\ u_1 + w_5 = 9 &\rightarrow w_5 = 9 & u_5 + w_5 = 5 &\rightarrow u_5 = -4 \\ u_2 + w_2 = 8 &\rightarrow u_2 = -2 \end{aligned}$$

Полученные значения вносим в табл. 3.

Таблица 3

Опорный план №1 с потенциалами

Потенциалы	$w_1=7$	$w_2=10$	$w_3=8$	$w_4=12$	$w_5=9$
$u_1=0$	7 15	10 2	11	12 6	9 1
$u_2=-2$	16	8 15	12	10	13
$u_3=2$	14	11	9	14 13	12
$u_4=-2$	9	15	10 6	13	7 2
$u_5=-4$	10	10	11	8	5 11

Для остальных, незанятых клеток плана рассчитаем оценку по формуле:

$$\Delta_{kv} = g_{kv} - (u_k + w_v) \quad (2)$$

Если все $\Delta_{kv} \geq 0$, то полученный план является оптимальным.

$$\begin{aligned} \Delta_{13} &= 11 - (0 + 8) = 3 & \Delta_{25} &= 13 - (-2 + 9) = 6 \\ \Delta_{21} &= 16 - (-2 + 7) = 11 & \Delta_{31} &= 14 - (2 + 7) = 5 \\ \Delta_{23} &= 12 - (-2 + 8) = 6 & \Delta_{32} &= 11 - (2 + 10) = -1 \\ \Delta_{24} &= 10 - (-2 + 12) = 0 & \Delta_{33} &= 9 - (2 + 8) = -1 \end{aligned}$$

$$\Delta_{35}=12-(2+9)=1$$

$$\Delta_{41}=9-(-2+7)=4$$

$$\Delta_{42}=15-(-2+10)=7$$

$$\Delta_{44}=13-(-2+12)=3$$

$$\Delta_{51}=10-(-4+7)=7$$

$$\Delta_{52}=10-(-4+10)=4$$

$$\Delta_{53}=11-(-4+8)=7$$

$$\Delta_{54}=8-(-4+12)=0$$

Так как среди полученных оценок присутствуют отрицательные значения, то данный план является неоптимальным. Для его улучшения необходимо построить цикл[10].

Чтобы построить цикл, определяем наименьшую из полученных оценок. В нашем случае, минимальная оценка определена в двух клетках – (3;2) и (3;3), где $\Delta=-1$. Так как обе клетки имеют одинаковую по величине оценку, возможно использование любой из них. Для дальнейших преобразований возьмем идущую первой по порядку клетку (3;2), переводим из свободных в базисные и на ее основе строим цикл. Полученный цикл показан в таблице 4, который проходит по маршруту (3;2 – 3;4 – 1;4 – 1;2). В клетках, где цикл делает поворот, указываем знаки «+» и «-», при этом в начале цикла ставим знак «+».

Таблица 4

Оптимизация плана №1

Кол-во эвакуируемого населения/ вместимость ПВР, тыс. человек	Q_1	Q_2	Q_3	Q_4	Q_5	Возможности
P_1	7 15	- 10 2	11	+ 12 6	9 1	25
P_2	16	15	8 12	10	13	16
P_3	14	+ 11	9	- 14 13	12	13
P_4	9	15	6 10	13	7 2	12
P_5	10	10	11	8	5 11	10
Потребности	15	18	10	19	14	76/76

Переходим к следующему опорному плану.

Из числа клеток, в которых установлен знак «-», определяем минимальное количество перевозимых людей. В нашем случае это значение клетки (1; 2) – 2. Следующим шагом сдвигаем все значения цикла на значение 3, при этом в клетках со знаком «+» данное значение прибавляется, а где присутствует знак «-» – вычитается. В результате преобразований клетка (3; 2) становится базисной, а клетка (1; 2) – свободной. В табл. 5 представлен новый опорный план.

Таблица 5

Опорный план № 2

Кол-во эвакуируемого населения/ вместимость ПВР, тыс. человек	Q_1	Q_2	Q_3	Q_4	Q_5	Возможности
P_1	7 15	10	11	12 8	9 2	25
P_2	16	8 16	12	10	13	16
P_3	14	11 2	9	14 11	12	13
P_4	9	15	6 10	13	7 2	12
P_5	10	10	11	8	5 10	10
Потребности	15	18	10	19	14	76/76

Значение целевой функции для данного плана (формула (1)) является:

$$J_2 = 15 \cdot 7 + 8 \cdot 12 + 2 \cdot 9 + 16 \cdot 8 + 2 \cdot 11 + 11 \cdot 14 + 10 \cdot 6 + 2 \cdot 7 + 10 \cdot 5 = 647$$

Проверим новый полученный план на оптимальность. По количеству строк и столбцов в плане устанавливаем соответствующее число потенциалов u_1, u_2, u_3, u_4, u_5 – потенциалы сборных эвакуационных пунктов, и w_1, w_2, w_3, w_4, w_5 – потенциалы ПВР.

Для занятых клеток табл. 5 составим систему уравнений по формуле (2).

Предположим, что $u_1=0$, в таком случае получим следующие значения:

$$u_1 + w_1 = 7 \rightarrow w_1 = 7$$

$$u_1 + w_4 = 12 \rightarrow w_4 = 12$$

$$u_1 + w_5 = 9 \rightarrow w_5 = 9$$

$$u_2 + w_2 = 8 \rightarrow u_2 = -1$$

$$u_3 + w_2 = 11 \rightarrow w_2 = 9$$

$$u_3 + w_4 = 14 \rightarrow u_3 = 2$$

$$u_4 + w_3 = 6 \rightarrow w_3 = 8$$

$$u_4 + w_5 = 7 \rightarrow u_4 = -2$$

$$u_5 + w_5 = 5 \rightarrow u_5 = -4$$

Полученные значения вносим в табл. 6.

Таблица 6

Опорный план № 2 с потенциалами

Потенциалы	$w_1=7$	$w_2=9$	$w_3=8$	$w_4=12$	$w_5=9$
$u_1=0$	7 15	10	11	12 8	9 2
$u_2=-1$	16	8 16	12	10	13
$u_3=2$	14	11 2	9	14 11	12
$u_4=-2$	9	15	6 10	13	7 2
$u_5=-4$	10	10	11	8	5 10

Для остальных, незанятых клеток плана составим оценку:

$$\Delta_{12}=10-(0+9)=1$$

$$\Delta_{13}=11-(0+8)=3$$

$$\Delta_{21}=16-(-1+7)=10$$

$$\Delta_{23}=12-(-1+8)=5$$

$$\Delta_{24}=10-(-1+12)=-1$$

$$\Delta_{25}=13-(-1+9)=5$$

$$\Delta_{31}=14-(2+7)=5$$

$$\Delta_{33}=9-(2+8)=-1$$

$$\Delta_{35}=12-(2+9)=1$$

$$\Delta_{41}=9-(-2+7)=4$$

$$\Delta_{42}=15-(-2+9)=8$$

$$\Delta_{44}=13-(-2+12)=3$$

$$\Delta_{51}=10-(-4+7)=7$$

$$\Delta_{52}=10-(-4+9)=5$$

$$\Delta_{53}=11-(-4+8)=7$$

$$\Delta_{54}=8-(-4+12)=0$$

Так как среди полученных оценок присутствуют отрицательные значения, то данный план является неоптимальным. Для его улучшения необходимо построить новый цикл.

Чтобы построить цикл, определяем наименьшую из полученных оценок. В нашем случае, минимальная оценка определена в трех клетках – (2;4) и (3;3), где $\Delta=-1$. Так как обе клетки имеют одинаковую по величине оценку, возможно использование любой из них. Для дальнейших преобразований возьмем идущую первой по порядку клетку (2; 4), переводим из свободных в базисные и на ее основе строим цикл. Полученный цикл показан в таблице 7, который проходит по маршруту (2;4 – 3;4 – 3;2 – 2;2). В клетках, где цикл делает поворот, указываем знаки «+» и «-», при этом в начале цикла ставим знак «+».

Таблица 7

Оптимизация плана № 2

Кол-во эвакуируемого населения/ вместимость ПВР, тыс. человек	Q_1	Q_2	Q_3	Q_4	Q_5	Возможности
P_1	7 15	10	11	12 8	9 2	25
P_2	16	- 16	8	12 +	10	13
P_3	14	+ 2	11	9 -	14	12
P_4	9	15	6 10	13	7 2	12
P_5	10	10	11	8	5 10	10
Потребности	15	18	10	19	14	76/76

Переходим к следующему опорному плану.

Из числа клеток, в которых установлен знак «-», определяем минимальное количество перевозимых людей. В нашем случае это значение клетки (3;4) – 11. Следующим шагом сдвигаем все значения цикла на значение 11, при этом в клетках со знаком «+» данное значение прибавляется, а где присутствует знак «-» – вычитается. В результате преобразований клетка (2;4) становится базисной, а клетка (3;4) – свободной. В табл. 8 представлен новый опорный план.

Таблица 8

Опорный план № 3

Кол-во эвакуируемого населения/ вместимость ПВР, тыс. человек	Q_1	Q_2	Q_3	Q_4	Q_5	Возможности
P_1	7 15	10	11	12 8	9 2	25
P_2	16	8 5	12	10 11	13	16
P_3	14	11 13	9	14	12	13
P_4	9	15	6 10	13	7 2	12
P_5	10	10	11	8	5 10	10
Потребности	15	18	10	19	14	76/76

Значение целевой функции для данного плана (формула (1)) является:

$$J_3 = 15 \cdot 7 + 8 \cdot 12 + 2 \cdot 9 + 5 \cdot 8 + 11 \cdot 10 + 13 \cdot 11 + 10 \cdot 6 + 2 \cdot 7 + 10 \cdot 5 = 636$$

Проверим новый полученный план на оптимальность.

По количеству строк и столбцов в плане устанавливаем соответствующее число потенциалов u_1, u_2, u_3, u_4, u_5 – потенциалы сборных эвакуационных пунктов, и w_1, w_2, w_3, w_4, w_5 – потенциалы ПВР.

Для занятых клеток табл. 5 составим систему уравнений по формуле (2).

Предположим, что $u_1=0$, в таком случае получим следующие значения:

$$u_1 + w_1 = 7 \rightarrow w_1 = 7$$

$$u_1 + w_4 = 12 \rightarrow w_4 = 12$$

$$u_1 + w_5 = 9 \rightarrow w_5 = 9$$

$$u_2 + w_2 = 8 \rightarrow w_2 = 10$$

$$u_2 + w_4 = 10 \rightarrow u_2 = -2$$

$$u_3 + w_2 = 11 \rightarrow u_3 = 1$$

$$u_4 + w_3 = 6 \rightarrow w_3 = 8$$

$$u_4 + w_5 = 7 \rightarrow u_4 = -2$$

$$u_5 + w_5 = 5 \rightarrow u_5 = -4$$

Полученные значения вносим в табл. 9.

Таблица 9

Опорный план № 3 с потенциалами

Потенциалы	$w_1=7$	$w_2=10$	$w_3=8$	$w_4=12$	$w_5=9$
$u_1=0$	7 15	10	11	12 8	9 2
$u_2=-2$	16	8 5	12	10 11	13
$u_3=1$	14	11 13	9	14	12
$u_4=-2$	9	15	10 6	13	7 2
$u_5=-4$	10	10	11	8	5 10

Для остальных, незанятых клеток плана составим оценку:

$$\Delta_{12}=10-(0+10)=0$$

$$\Delta_{41}=9-(-2+7)=4$$

$$\Delta_{13}=11-(0+8)=3$$

$$\Delta_{42}=15-(-2+10)=7$$

$$\Delta_{21}=16-(-2+7)=11$$

$$\Delta_{44}=13-(-2+12)=3$$

$$\Delta_{23}=12-(-2+8)=6$$

$$\Delta_{51}=10-(-4+7)=7$$

$$\Delta_{25}=13-(-2+9)=6$$

$$\Delta_{52}=10-(-4+10)=4$$

$$\Delta_{31}=14-(1+7)=6$$

$$\Delta_{53}=11-(-4+8)=7$$

$$\Delta_{33}=9-(1+8)=0$$

$$\Delta_{54}=8-(-4+12)=0$$

$$\Delta_{35}=12-(1+9)=2$$

Так как в этот раз отрицательных оценок нет, то получившийся план является оптимальным. Анализ оптимального плана показал, что:

Из Суджанского района необходимо доставить в пункты субъекта № 1 – 15 тысяч человек, в пункты субъекта № 4 – 8 тысяч человек, в пункты субъекта № 5 – 2 тысячи человек.

Из Львовского района необходимо доставить в пункты субъекта № 2 – 5 тысяч человек, в пункты субъекта № 4 – 11 тысяч человек.

Из Кореневского и Глушковского районов необходимо доставить 13 тысяч человек в пункты субъекта № 2.

Из Беловского и Большесолдатского районов необходимо доставить в пункты субъекта № 3 – 10 тысяч человек, в пункты субъекта № 5 – 2 тысячи человек.

Из Рыльского и Хомутовского районов необходимо доставить 10 тысяч человек в пункты субъекта № 5.

Таким образом, применяя вышеуказанную методику при решении вопросов по организации эвакуации пострадавшего населения из территорий, попавших в зону вооруженного конфликта, органы управления ГО и РСЧС смогут принять более рациональное решение в оперативном порядке, что позволит сократить не только использование финансовых и материальных средств, но и время на разработку предложений, что в конечном итоге повысит вероятность уменьшения количества погибших и пострадавших людей.

Список источников

1. Обращение Президента Российской Федерации 24 февраля 2022 г. Официальные сетевые ресурсы Президента Российской Федерации. URL: <http://www.kremlin.ru/events/president/transcripts/speeches/67843> (дата обращения: 10.11.2025).

2. О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера: Федер. закон Рос. Федерации от 21 дек. 1994 г. № 68-ФЗ (ред. от 8 авг. 2024 г.), (с изм. и доп., вступ. в силу с 26 нояб. 2024 г.). Доступ из информ.-правового портала «КонсультантПлюс».

3. ГОСТ Р 22.3.17-2020. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Планирование мероприятий по эвакуации и рассредоточению населения при угрозе и возникновении чрезвычайных ситуаций. Основные положения. Доступ из информ.-правового портала «Гарант».

4. Атака на Курскую область (2024). Интернет-энциклопедия «Рувика». URL: [https://ru.ruwiki.ru/wiki/Атака_на_Курскую_область_\(2024\)](https://ru.ruwiki.ru/wiki/Атака_на_Курскую_область_(2024)) (дата обращения: 10.11.2025).

5. Ашманов С.А. Линейное программирование. М.: Ленанд. 2021. 304 с.

6. Бирюкова Л.Г., Р.В. Сагитов. Линейная алгебра и линейное программирование. Практикум. М.: Юрайт. 2025. 45 с.

7. Пашков Н.Н. Транспортная логистика (линейное программирование): учеб. пособие. М.: Прометей. 2020. 202 с.

8. Трушков А.С. Исследование операций. Задачи транспортного типа. Сетевое и целочисленное программирование. Т. 2. Учебник для вузов. М.: Лань. 2022. 380 с.

9. Божко А.Н. Методы линейного программирования. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана 2022. 92 с.
10. Трушков А.С. Исследование операций. Линейное программирование. Т. 1. Учебник для вузов, 2-е изд., стер. М.: Лань. 2023. 292 с.

References

1. Obrashchenie Prezidenta Rossijskoj Federacii 24 fevralya 2022 g. Oficial'nye setevye resursy Prezidenta Rossijskoj Federacii. URL: <http://www.kremlin.ru/events/president/transcripts/speeches/67843> (data obrashcheniya: 10.11.2025).
2. O zashchite naseleniya i territorij ot chrezvychajnyh situacij prirodnoho i tekhnogennoho haraktera: Feder. zakon Ros.Federacii ot 21 dek. 1994 g. № 68-FZ (red. ot 8 avg. 2024 g.), (s izm. i dop., vstup. v silu s 26 noyab. 2024 g.). Dostup iz inform.-pravovogo portala «Konsul'tantPlyus».
3. GOST R 22.3.17-2020. Bezopasnost' v chrezvychajnyh situacijah. Planirovanie meropriyatij po evakuacii i rassredotocheniyu naseleniya pri ugroze i voznikovenii chrezvychajnyh situacij. Osnovnye polozheniya. Dostup iz inform.-pravovogo portala «Garant».
4. Ataka na Kurskuyu oblast' (2024). Internet-enciklopediya «Ruviki». URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Ataka_na_Kurskuyu_oblast'_2024 (data obrashcheniya: 10.11.2025).
5. Ashmanov S.A. Linejnoe programmirovaniye. M.: Lenand. 2021. 304 s.
6. Biryukova L.G., R.V. Sagitov. Linejnaya algebra i linejnoe programmirovaniye. Praktikum. M.: YUrajt. 2025. 45 s.
7. Pashkov N.N. Transportnaya logistika (linejnoe programmirovaniye): ucheb. posobie. M.: Prometej. 2020. 202 s.
8. Trushkov A.S. Issledovanie operacij. Zadachi transportnogo tipa. Setevoe i celochislennoe programmirovaniye. T. 2. Uchebnyk dlya vuzov. M.: Lan'. 2022. 380 s.
9. Bozhko A.N. Metody linejnogo programmirovaniya. M.: MGTU im. N.E. Baumana 2022. 92 s.
10. Trushkov A.S. Issledovanie operacij. Linejnoe programmirovaniye. T. 1. Uchebnyk dlya vuzov, 2-e izd., ster. M.: Lan'. 2023. 292 s.

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 20.01.2026; одобрена после рецензирования: 12.02.2026; принята к публикации: 19.02.2026

The information about article:

The article was submitted to the editorial office: 20.01.2026; approved after review: 12.02.2026; accepted for publication: 19.02.2026

Сведения об авторах:

Кондратков Александр Сергеевич, слушатель факультета руководящего состава Академии гражданской защиты МЧС России (141435, г. Химки, ул. Соколовская, стр. 1А), e-mail: kondratkovsascha@gmail.com

Усачева Татьяна Валерьевна, заведующий кафедрой высшей математики Академии гражданской защиты МЧС России (141435, г. Химки, ул. Соколовская, стр. 1А), кандидат педагогических наук, доцент, e-mail: t.usacheva@agz.50.mchs.gov.ru, SPIN-код: 5387-3589

Information about the authors:

Kondratkov Alexander S., student of Academy of civil protection of EMERCOM of Russia (141435, Khimki, Sokolovskaya st., building 1A), e-mail: kondratkovsascha@gmail.com

Usacheva Tatyana V., head of the department of higher mathematics of Academy of civil protection of EMERCOM of Russia (141435, Khimki, Sokolovskaya st., building 1A), candidate of pedagogical sciences, associate professor, e-mail: t.usacheva@agz.50.mchs.gov.ru, SPIN: 5387-3589

Научная статья

УДК 378.141; DOI: 10.61260/2304-0130-2026-1-71-79

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В СИСТЕМЕ ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОТБОРА АБИТУРИЕНТОВ

✉ **Ильичева Юлия Романовна;**

Николаенко Елизавета Владимировна.

Академия ГПС МЧС России, Москва, Россия

✉ djulia.il.07@mail.ru

Аннотация: Рассмотрены вопросы принятия управленческих решений в системе профессионального отбора абитуриентов с применением методов математического моделирования. Приведены возможности применения многопараметрической математической модели, как основы системы поддержки принятия решений. Многопараметрическая модель – это формализованное представление абитуриента в виде вектора показателей, каждый из которых оценивается по шкале и взвешивается в зависимости от значимости. Основные предложенные методы: метод анализа иерархий, логистическая регрессия, методы многомерного статистического анализа. Применение многопараметрических моделей, методов аналитической поддержки и современных технологий моделирования обеспечивают не только повышение эффективности приемной комиссии, но и качественное улучшение состава поступающих, что в долгосрочной перспективе напрямую влияет на эффективность ведомства. Приведенные методы позволяют значительно повысить качество, скорость и обоснованность решений в процессе профессионального отбора абитуриентов.

Ключевые слова: математическое моделирование, профессиональный отбор, многопараметрическая модель, линейная нормализация, метод анализа иерархий, логистическая регрессия, весовые коэффициенты, критерии

Для цитирования: Ильичева Ю.Р., Николаенко Е.В. Использование методов математического моделирования в системе профессионального отбора абитуриентов // Природные и техногенные риски (физико-математические и прикладные аспекты). 2026. № 1 (57). С. 71–79. DOI: 10.61260/2307-7476-2026-1-71-79

Scientific article

THE USE OF MATHEMATICAL MODELING METHODS IN THE SYSTEM OF PROFESSIONAL SELECTION OF APPLICANTS

✉ **Ilichyeva Yu.R.,**

Nikolaenko E.V.

Academy of State fire service of EMERCOM of Russia, Moscow, Russia

✉ djulia.il.07@mail.ru

Abstract. This article examines management decision-making in the professional selection of applicants using mathematical modeling methods. The article explores the potential of a multivariable mathematical model as the basis for a decision support system. A multivariable model is a formalized representation of an applicant as a vector of indicators, each of which is assessed on a scale and weighted according to its significance. The main proposed methods include the analytic hierarchy process, logistic regression, and multivariate statistical analysis. The use

of multivariable models, analytical support methods, and modern modeling technologies not only improves the effectiveness of the admissions committee but also significantly improves the composition of applicants, which directly impacts the department's long-term effectiveness. These methods significantly improve the quality, speed, and validity of decisions in the professional selection of applicants.

Keywords: mathematical modeling, professional selection, multivariable model, linear normalization, analytic hierarchy process, logistic regression, weighting coefficients, criteria.

For citation: Il'ichyeva Yu.R., Nikolaenko E.V. The use of mathematical modeling methods in the system of professional selection of applicants // *Prirodnye i tekhnogennye riski (fiziko-matematicheskie i prikladnye aspekty) = Natural and man-made risks (physico-mathematical and applied aspects)*. 2026. № 1 (57). P. 71–79. DOI: 10.61260/2307-7476-2026-1-71-79

Введение

Системы поддержки принятия решений (СППР) представляют собой инструментальную основу для математической формализации процессов профессионального отбора абитуриентов в образовательные учреждения МЧС России. Ключевое преимущество СППР заключается в реализации перехода от субъективных экспертных оценок к объективным математическим моделям, обеспечивающим прогнозирование результатов на основе количественных методов анализа. Цифровая трансформация данных процессов предполагает создание единой математической платформы, основанной на алгоритмах обработки многомерных данных, что соответствует современным требованиям к государственной управленческой деятельности [1].

В рамках классификации управленческих информационных систем СППР занимают особое место, благодаря применению специализированных математических методов. Функционирование таких систем базируется на интеграции оптимизационных моделей, методов многокритериальной оценки, статистического анализа и теории нечетких множеств, что позволяет формализовать сложные процессы принятия решений на стратегическом и тактическом уровнях управления. Эффективность СППР достигается через построение математических моделей сценариев развития, комбинированных с экспертными оценками в рамках интерактивных вычислительных процедур [2].

Современная архитектура СППР включает следующие типы систем, различающиеся по математической сложности моделей:

- институциональные СППР, использующие комплексные математические модели для решения стратегических задач (оптимизация распределения ресурсов, прогнозирование кадровых потребностей);
- системы для разовых задач, применяющие стандартные алгоритмы математической статистики и регрессионного анализа;
- отраслевые СППР, реализующие специализированные математические методы, адаптированные к предметной области (экономико-математические модели, имитационное моделирование).

Процесс разработки нетиповых решений в СППР предполагает математическую формализацию исходных данных, выбор оптимальных алгоритмов решения и параметризацию моделей в интерактивном режиме. Фундаментальной особенностью СППР является математическая гибкость системы, обеспечивающая пользователю возможность выбора из множества алгоритмов и моделей в зависимости от специфики задачи. Таким образом, архитектура СППР строится не на строго регламентированных алгоритмах обработки данных, а на модульной системе математических инструментов, включающей: вычислительные ресурсы, программные модули математической обработки, структурированные информационные массивы, формализованные математические модели, экспертные базы знаний и алгоритмы поддержки управленческих решений.

Методология

Важно подчеркнуть, что категория «математические модели» в СППР включает не только сами модели, но и комплекс математических методов, реализованных в программной среде. Фундаментом СППР служит база методов прикладной математики, включающая численные алгоритмы оптимизации, методы математической статистики, теорию нечетких множеств, а также современные подходы машинного обучения и искусственного интеллекта.

Эффективная эксплуатация СППР предполагает от пользователя глубоких знаний предметной области и владения математическим аппаратом системы, а от разработчиков – способности к прогнозированию архитектуры системы, особенно компонентов библиотеки математических моделей. База моделей СППР представляет собой иерархически организованную совокупность универсальных и специализированных математических конструкций, включая регрессионные модели, методы многокритериальной оптимизации, алгоритмы нелинейного программирования и имитационные модели.

База знаний СППР содержит формализованные математические зависимости предметной области (функциональные связи, ограничения, критерии оптимальности), что существенно расширяет аналитические возможности системы за счет математической формализации экспертных знаний. Как установлено теоретическими исследованиями, математическое моделирование является определяющим элементом СППР. Математическая модель в данном контексте представляет собой формализованную абстракцию системы, отражающую существенные количественные взаимосвязи между переменными, необходимыми для решения управленческих задач.

В практике управления применяются различные классы математических моделей: от простых однофакторных уравнений и таблиц до сложных многомерных конструкций. К последним относятся множественные регрессионные модели, позволяющие анализировать влияние нескольких факторов одновременно, а также задачи нелинейного программирования для оптимизации ресурсов при нелинейных ограничениях. Реализация моделей осуществляется в виде программных модулей, электронных таблиц с встроенными математическими функциями, командных файлов или специализированных AI-алгоритмов, обеспечивающих автоматизацию сложных вычислительных процедур.

В процессе принятия решений наиболее распространены следующие методы аналитического моделирования: анализ «что, если»; анализ чувствительности; оптимизационный анализ, включая исследование целевой функции; статистический (корреляционно-регрессионный) анализ; прогнозирующий анализ.

В современных условиях сформировалось новое направление обработки данных – интеллектуальный анализ данных (Data Mining), возникший в ответ на потребность в обработке больших массивов информации, накопленной предприятиями [3]. Благодаря этому расширился арсенал моделей управления и принятия решений, включающий: расширенные статистические методы; нейронные сети; систему рассуждений, основанную на прецедентах; деревья решений; эволюционное программирование; генетические алгоритмы; алгоритмы ограниченного перебора; системы визуализации многомерных данных.

Перечисленные методы могут применяться для решения одной задачи или анализа сценария с разных позиций, что позволяет получить комплексную оценку ситуации. Хотя с математической точки зрения некоторые методы могут быть взаимозаменяемыми, на практике часто используется несколько подходов к решению одной проблемы, как, например, в инвестиционном анализе, где применяется до 12 критериев оценки.

Существуют также модели, разработанные специально для решения задач управления и поддержки принятия решений на стратегическом и тактическом уровнях. Процесс принятия решений, основанный на эвристических предпочтениях руководителя, можно разделить на три этапа: формирование когнитивной карты, создание экспертной системы,

генерация набора сценариев. Каждому этапу может соответствовать отдельная подсистема, при этом они могут функционировать как в комплексе, так и автономно.

В моделях, использующих многокритериальные функции предпочтения руководителя, появляется понятие «веса» или значимости критерия. Поэтому вычислительная система должна предоставлять руководителю инструменты для определения релевантного набора критериев, поскольку изначально руководитель стремится включить максимальное количество критериев, связывая каждый признак с отдельным критерием.

Профессиональный отбор абитуриентов в образовательные учреждения системы МЧС России представляет собой сложный, многоэтапный и высоконормативный процесс, требующий учета широкого спектра критериев: от академических достижений и физической подготовки до психологической устойчивости и медицинского состояния. В условиях высокой ответственности за формирование кадрового резерва для службы в экстремальных условиях качество принимаемых решений напрямую влияет на эффективность всей системы ведомства [4].

На этом фоне все большее значение приобретают системы поддержки принятия решений – технологические и аналитические платформы, призванные помочь экспертам (в данном случае – членам приемной комиссии) принимать более обоснованные, объективные и прогнозируемые решения. В данном анализе рассматривается СППР, как универсальный класс информационных систем, их структура, функциональные возможности и потенциал применения в контексте профессионального отбора абитуриентов в вузы МЧС России.

Система поддержки принятия решений – это интерактивная информационная система, предназначенная для помощи лицам, принимающим решения (ЛПР), в решении слабоструктурированных и неструктурированных задач, особенно в условиях неопределенности и при наличии множества критериев. СППР не заменяет ЛПР, но предоставляет ему инструменты для анализа данных, моделирования сценариев и оценки альтернатив. СППР классифицируются по различным признакам:

1. По степени автоматизации: от систем с ручным вводом данных до полностью автоматизированных систем.

2. По домену применения: стратегические, тактические, оперативные.

3. По архитектуре: одноуровневые, клиент-серверные, облачные.

4. По методологии анализа: моделирующие, экспертные, гибридные.

Для системы профессионального отбора абитуриентов наиболее актуальны многокритериальные, аналитически ориентированные СППР, интегрирующие данные, модели и знания для поддержки сложных решений.

Многопараметрическая модель – это формализованное представление кандидата в виде вектора показателей, каждый из которых оценивается по шкале и взвешивается в зависимости от значимости. Цифровая модель абитуриента может быть представлена как некоторое конечное множество количественных показателей, описывающих их личностные характеристики [5]. Для начала необходимо формализовать критерии отбора – пусть абитуриент описывается вектором:

$$\vec{X}_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in})$$

где x_{ji} – нормализованное значение j -го критерия для i -го кандидата; n – количество критериев.

Ниже, в табл. 1 приведен пример возможности группирования критериев, с целью укрупнения групп показателей.

Группировка критериев по категориям

№	Группа	Примеры показателей
1.	Академические	Баллы ЕГЭ (математика, русский, физика, информатика)
2.	Физические	Нормативы ФП (бег, подтягивания, кросс)
3.	Психологические	Группа ППО
4.	Медицинские	Заключение ВВК (группа здоровья)
5.	Социальные	Возраст, гражданство, наличие судимости

Для сопоставимости используется линейная нормализация:

$$x_{ij} = \frac{x_{ij} - \min_j}{\max_j - \min_j}$$

где \max_j , \min_j – минимальное и максимальное значение по j -му критерию в выборке.

Применение СППР в профессиональном отборе имеет ключевые преимущества:

1. Повышение объективности и снижение субъективизма. Традиционный отбор часто зависит от мнения экспертов, что может приводить к неоднозначности оценок, особенно в области психологии. СППР формализует критерии, назначает веса на основе данных или экспертных оценок, что позволяет сравнивать кандидатов по единой шкале.

2. Комплексная оценка на основе многопараметрической модели. СППР способна интегрировать разнородные данные – от баллов ЕГЭ до результатов психологических тестов – в единую оценочную шкалу. Это позволяет строить многопараметрические модели, где каждый критерий вносит вклад в итоговую оценку с учетом своей значимости. Например:

$$R = \omega_1 \cdot X_{\text{ЕГЭ}} + \omega_2 \cdot X_{\text{ФП}} + \omega_3 \cdot X_{\text{ППО}} + \omega_4 \cdot X_{\text{ВВК}}$$

где R – итоговый рейтинг, ω_i – весовые коэффициенты, X_i – нормализованные показатели.

Определение весов ω_i – ключевой этап. Наиболее известный метод – метод анализа иерархий [6]. Алгоритм МАИ:

1. Построение иерархии целей и критериев.
2. Парное сравнение критериев по шкале Саати.
3. Расчет собственного вектора матрицы сравнений.
4. Проверка согласованности (индекс, отношение согласованности).

$$\vec{\omega} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{\vec{X}_j}{\lambda_{\max}}$$

где λ_{\max} – максимальное собственное значение матрицы попарных сравнений.

Итоговый рейтинг кандидата рассчитывается как взвешенная сумма нормализованных показателей:

$$R_i = \sum_{j=1}^n \omega_j \cdot x_{ij}$$

где, R_i – итоговый рейтинг j -го кандидата; ω_j – вес j -го критерия, $\sum \omega_j = 1$.

Результаты

В табл. 2 приведен пример расчета показателей по четырем возможным категориям оценивания кандидата, с учетом нормализации сырых баллов и применения весовых коэффициентов значимости. Такой подход позволяет ранжировать всех кандидатов и формировать список зачисления.

Таблица 2

Пример расчета показателей по категориям оценивания

№	Критерий	Балл	Нормализация, x	Вес (МАИ), ω
1	ЕГЭ (математика)	85	0.85	0.3
2	Физическая подготовка	88	0.88	0.25
3	ППО	4,2	0,84	0.3
4	Здоровье	Годен	1.0	0.15
ИТОГО			1.0	0.877

Для повышения качества отбора СППР может использовать модели машинного обучения, обучающиеся на исторических данных о курсантах [7, 8]. Например, логистическая регрессия – один из фундаментальных алгоритмов, используемый для классификации объектов, он оценивает вероятность события (например, успешность адаптации/отчисление), а уже на основе вероятности принимается решение.

Если в качестве задачи поставить прогноз успешной адаптации, то условная вероятность:

$$P(y_i = 1 | \vec{x}_i) = \frac{1}{1 + e^{-(\omega_0 + \omega_1 x_{i1} + \dots + \omega_n x_{in})}}$$

$y_i = 1$, если абитуриент успешно адаптировался (не отчислен в первые два года);

$y_i = 0$, если абитуриент отчислен; ω_0 – это свободный член (пересечение) модели логистической регрессии. Его можно интерпретировать как базовый уровень логарифма шансов на успех, когда все признаки равны нулю.

Расчеты показателя:

$$z = 0 + 0.85 \cdot 0.3 + 0.88 \cdot 0.25 + 0.84 \cdot 0.3 + 1 \cdot 0.15 = 0 + 0.255 + 0.22 + 0.252 + 0.15 = 0.877$$

Теперь применим логистическую функцию:

$$P(y_i = 1) = \frac{1}{1 + e^{-(0.877)}} \approx 0,70$$

Вывод: Вероятность успешной адаптации – 70 %.

Методы многомерного анализа: кластеризация и факторный анализ позволяют выделить типологические группы абитуриентов и выявить скрытые факторы или сократить их количество.

Одно из ключевых преимуществ – это способность предсказывать успешность кандидата в дальнейшем обучении и службе. На основе исторических данных (например, о курсантах, отчисленных в первый год) можно построить модель, которая оценивает вероятность адаптации абитуриента. Это особенно важно для МЧС России, где отчисления и увольнения в первые годы службы достигают 3 % и выше.

Методы машинного обучения (логистическая регрессия, нейронные сети) позволяют классифицировать кандидатов на «высокий риск» и «низкий риск» дезадаптации.

СППР позволяет моделировать последствия изменений в правилах отбора. Например: как изменится профиль поступающих, если увеличить вес физической подготовки? Как повлияет на конкурс увеличение числа бюджетных мест?

В табл. 3 приведены результаты изучения области применения различных методов моделирования в системе поддержки принятия решений при профессиональном отборе кандидатов.

Таблица 3

Применение в СППР различных методов моделирования

№	Метод	Применение в СППР	Преимущества
1.	Метод анализа иерархий	Определение весов критериев на основе экспертных оценок	Учет приоритетов руководства, прозрачность процесса
2.	Многомерный статистический анализ	Кластеризация кандидатов, факторный анализ, дискриминантный анализ	Выявление скрытых групп, оценка влияния факторов
3.	Машинное обучение	Прогноз адаптации, классификация кандидатов	Высокая точность прогнозов на основе исторических данных
4.	Имитационное моделирование	Тестирование изменений в правилах отбора	Оценка последствий до их внедрения
5.	Генетические алгоритмы	Оптимизация весов критериев для максимизации целевого показателя	Поиск наилучшей конфигурации системы отбора

Такие сценарии помогают руководству вуза принимать стратегические решения на основе прогнозов, а не интуиции. Методы математического моделирования систем являются неотъемлемым элементом современного управления в образовательных структурах [9, 10].

Заключение и перспективы внедрения СППР в МЧС России

Сравнительный анализ (табл. 4) показывает, что традиционный отбор характеризуется высокой зависимостью от субъективного фактора и низкой прогнозируемостью, тогда как системы, использующие методы математического моделирования обеспечивает объективность, прозрачность и возможность анализа альтернативных сценариев. Внедрение СППР позволяет значительно повысить качество, скорость и обоснованность решений в процессе профессионального отбора абитуриентов.

Таблица 4

Сравнительная таблица использования традиционного отбора и СППР

№	Аспект	Традиционный отбор	Отбор с использованием СППР
1.	Объективность	Зависит от эксперта	Основана на данных и моделях
2.	Скорость обработки	Низкая (ручной ввод, проверка)	Высокая (автоматизация)
3.	Прогностическая способность	Отсутствует	Реализована через машинное обучение и статистику
4.	Адаптивность	Жесткие правила	Возможность изменения весов и критериев
5.	Прозрачность	Сложна для внешнего анализа	Фиксация и проверка

№	Аспект	Традиционный отбор	Отбор с использованием СППР
6	Масштабируемость	Ограничена человеческими ресурсами	Легко масштабируется с ростом числа абитуриентов

Системы поддержки принятия решений представляют собой инструмент для трансформации процесса профессионального отбора абитуриентов в вузах МЧС России. Они позволяют перейти от ручного, субъективного и реактивного подхода к научно обоснованному, объективному и прогнозирующему управлению кадровыми процессами.

Применение многопараметрических моделей, методов аналитической поддержки и современных технологий моделирования обеспечивает не только повышение эффективности приемной комиссии, но и качественное улучшение состава поступающих, что в долгосрочной перспективе напрямую влияет на боеспособность и эффективность ведомства.

Использование методов математического моделирования в системе поддержки принятия решений это не просто цифровизация, а переход к управленческой культуре, основанной на данных, что является неотъемлемым элементом современного государственного управления в условиях цифровой трансформации.

Список источников

1. Лясковская Е.А., Григорьева К.М., Халилова Г.Р. Цифровизация государственного и муниципального управления в субъектах Российской Федерации // Вестник ЮУрГУ. Серия «Экономика и менеджмент». 2023. Т. 17, № 4. С. 29–42. DOI: 10.14529/em230403.
2. Демидов А.А., Захаров Ю.Н. Информационно-аналитические системы поддержки принятия решений в органах государственной власти и местного самоуправления. Основы проектирования и внедрения: учеб. пособие. СПб.: НИУ ИТМО, 2012. 100 с.
3. Замятин А.В. Интеллектуальный анализ данных: учеб. пособие. Томск: Издательский Дом Томского государственного университета, 2020. 196 с.
4. Об утверждении правил проведения мероприятий по профессиональному психологическому отбору при поступлении гражданина на службу в федеральную противопожарную службу Государственной противопожарной службы: приказ МЧС России от 25 марта 2025 г. № 240. Доступ из инф.-правового портала «Гарант».
5. Николаенко Е.В., Бутузов С.Ю. Методика определения профессионально важных качеств абитуриентов при поддержке принятия решений в системе профессионального отбора // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета государственной противопожарной службы МЧС России». 2025. № 2. С. 69–76.
6. Саати Т.Л. Принятие решений. Метод анализа иерархий. М.: Радио и связь, 1989. 316 с.
7. Смирнов А.С., Войтенко О.В. Повышение эффективности управления качеством подготовки специалистов в области пожарной безопасности // Проблемы управления рисками в техносфере. 2012. № 2 (22). С. 102–107.
8. Смирнов А.С., Войтенко О.В. Моделирование деятельности учебных подразделений – как основа успешного управления подготовкой специалистов в учебных заведениях МЧС России // Проблемы управления рисками в техносфере. 2011. № 3 (19). С. 55–61.
9. Моделирование процессов и систем / А.П. Сатин [и др.]. Учеб.-метод. пособие. М.: Академия ГПС МЧС России, 2016. 106 с.
10. Системы поддержки принятия решений / А.П. Сатин [и др.]. Учеб.-метод. пособие. М.: Академия ГПС МЧС России, 2017. 150 с.

References

1. Lyaskovskaya E.A., Grigor'eva K.M., Halilova G.R. Cifrovizaciya gosudarstvennogo i municipal'nogo upravleniya v sub"ektah Rossijskoj Federacii // Vestnik YUUrGU. Seriya «Ekonomika i menedzhment». 2023. T. 17, № 4. S. 29–42. DOI: 10.14529/em230403.

2. Demidov A.A., Zaharov YU.N. Informacionno-analiticheskie sistemy podderzhki prinyatiya reshenij v organah gosudarstvennoj vlasti i mestnogo samoupravleniya. Osnovy proektirovaniya i vnedreniya: ucheb. posobie. SPb.: NIU ITMO, 2012. 100 s.

3. Zamyatin A.V. Intellektual'nyj analiz dannyh: ucheb. posobie. Tomsk: Izdatel'skij Dom Tomskogo gosudarstvennogo universiteta, 2020. 196 s.

4. Ob utverzhenii pravil provedeniya meropriyatij po professional'nomu psihologicheskomu otboru pri postuplenii grazhdanina na sluzhbu v federal'nyu protivopozharnuyu sluzhbu Gosudarstvennoj protivopozharnoj sluzhby: prikaz MCHS Rossii ot 25 marta 2025 g. № 240. Dostup iz inf.-pravovogo portala «Garant».

5. Nikolaenko E.V., Butuzov S.YU. Metodika opredeleniya professional'no vaznyh kachestv abiturientov pri podderzhke prinyatiya reshenij v sisteme professional'nogo otbora // Nauchno-analiticheskij zhurnal «Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta gosudarstvennoj protivopozharnoj sluzhby MCHS Rossii». 2025. № 2. S. 69–76.

6. Saati T.L. Prinyatie reshenij. Metod analiza ierarhij. M.: Radio i svyaz', 1989. 316 s.

7. Smirnov A.S., Vojtenok O.V. Povyshenie effektivnosti upravleniya kachestvom podgotovki specialistov v oblasti pozharnoj bezopasnosti // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere. 2012. № 2 (22). S. 102–107.

8. Smirnov A.S., Vojtenok O.V. Modelirovanie deyatel'nosti uchebnyh podrazdelenij – kak osnova uspešnogo upravleniya podgotovkoj specialistov v uchebnyh zavedeniyah MCHS Rossii // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere. 2011. № 3 (19). S. 55–61.

9. Modelirovanie processov i sistem / A.P. Satin [i dr.]. Ucheb.-metod. posobie. M.: Akademiya GPS MCHS Rossii, 2016. 106 s.

10. Sistemy podderzhki prinyatiya reshenij / A.P. Satin [i dr.]. Ucheb.-metod. posobie. M.: Akademiya GPS MCHS Rossii, 2017. 150 s.

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 18.11.2025; одобрена после рецензирования: 3.02.2026; принята к публикации: 10.02.2026

The information about article:

The article was submitted to the editorial office: 18.11.2025; approved after review: 3.02.2026; accepted for publication: 10.02.2026

Информация об авторах:

Ильичёва Юлия Романовна, курсант факультета пожарной и техносферной безопасности, Академии ГПС МЧС России (129366, Москва, ул. Бориса Галушкина, д. 4), e-mail: djulia.il.07@mail.ru

Николаенко Елизавета Владимировна, старший преподаватель кафедры кадрового, правового и психологического обеспечения Академии ГПС МЧС России (129366, Москва, ул. Бориса Галушкина, д. 4), e-mail: e.nikolaenko@academygps.ru, SPIN-код: 7135-7844

Information about the authors:

Pyicheva Yulia R., student of the faculty of fire and technosphere safety of the Academy of the State fire service of EMERCOM of Russia (129366, Moscow, Boris Galushkin str., 4), e-mail: djulia.il.07@mail.ru

Nikolaenko Elizaveta V., senior lecturer of the department of personnel, legal and psychological support of the Academy of the State fire service of EMERCOM of Russia (129366, Moscow, Boris Galushkin str., 4), e-mail: e.nikolaenko@academygps.ru, SPIN: 7135-7844

Научная статья

УДК 004.056:519.876.5; DOI: 10.61260/2307-7476-2026-1-80-93

ПРОГРАММНЫЙ МОДУЛЬ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ КОМПЬЮТЕРНЫХ ВИРУСОВ В СЕТИ ОПОВЕЩЕНИЯ МЧС РОССИИ НА ОСНОВЕ ЭПИДЕМИОЛОГИЧЕСКОЙ PSIDR-МОДЕЛИ

✉ Бархатов Константин Сергеевич;

Гергов Идар Хабасович;

Курданов Халид Солтанович;

Арванова Саният Мухамедовна.

Кабардино-Балкарский государственный университет, Нальчик, Россия

✉ barhatov364@gmail.com

Аннотация. Разработан программный модуль имитационного моделирования распространения вредоносного программного обеспечения в комплексной системе экстренного оповещения населения МЧС России на основе адаптированной эпидемиологической модели PSIDR. Модель учитывает иерархическую четырехуровневую топологию сети и позволяет оценивать динамику распространения заражения, выявлять критические узлы инфраструктуры и моделировать различные сценарии кибератак. Для реализации используется язык Python с применением численных методов решения систем обыкновенных дифференциальных уравнений и теории графов. Программный комплекс включает графический интерфейс для интерактивного моделирования с возможностью визуализации результатов в режиме реального времени. Проведенный анализ чувствительности показал, что инвестиции в системы обнаружения угроз обеспечивают значительно больший эффект по сравнению с ускорением процессов восстановления узлов, снижая охват эпидемии.

Ключевые слова: комплексная система экстренного оповещения населения, PSIDR-модель, имитационное моделирование, информационная безопасность, критическая инфраструктура, распространение компьютерных вирусов, теория графов

Для цитирования: Бархатов К.С., Гергов И.Х., Курданов Х.С., Арванова С.М. Программный модуль имитационного моделирования распространения компьютерных вирусов в сети оповещения МЧС России на основе эпидемиологической PSIDR-модели // Природные и техногенные риски (физико-математические и прикладные аспекты). 2026. №1 (57). С. 80–93. DOI: 10.61260/2307-7476-2026-1-80-93

SOFTWARE MODULE FOR SIMULATION MODELING OF COMPUTER VIRUS PROPAGATION IN THE EMERCOM OF RUSSIA ALERT NETWORK BASED ON THE EPIDEMIOLOGICAL PSIDR MODEL

✉ Barkhatov Konstantin S.,

Gergov Idar K.,

Kurdanov Khalid S,

Arvanova Saniyat M.

Kabardino-Balkarian State University, Nalchik, Russia

✉ barhatov364@gmail.com

Abstract. A software module for simulation modeling of malware propagation in the Integrated Emergency Alert System (KSEON) of the Russian EMERCOM has been developed based on an adapted epidemiological PSIDR model. The model accounts for the hierarchical four-level network topology and enables assessment of infection propagation dynamics, identification of critical infrastructure nodes, and simulation of various cyberattack scenarios. The implementation utilizes Python programming language employing numerical methods for solving systems of ordinary differential equations and graph theory. The software package includes a graphical user interface for interactive modeling with real-time visualization capabilities. Sensitivity analysis demonstrated that investments in threat detection systems (SIEM, SOC) provide significantly greater effectiveness compared to accelerating node recovery processes, reducing the epidemic coverage.

Keywords: KSEON, PSIDR model, simulation modeling, information security, critical infrastructure, computer virus spread, graph theory

For citation: Barkhatov K.S., Gergov I.K., Kurdanov K.S, Arvanova S.M. Software module for simulation modeling of computer virus propagation in the EMERCOM alert network based on the epidemiological PSIDR model // *Prirodnye i tekhnogennye riski (fiziko-matematicheskie i prikladnye aspekty) = Natural and man-made risks (physico-mathematical and applied aspects)*. 2026. № 1 (57). P. 80–93. DOI: 10.61260/2307-7476-2026-1-80-93

Введение

Современная Россия сталкивается с беспрецедентным ростом прицельных кибератак на критически важную инфраструктуру. Комплексная система экстренного оповещения населения (КСЭОН) МЧС России занимает уникальное место в этом пространстве: это не просто транспортный канал информации, а система, от которой может зависеть жизнь тысяч людей при возникновении чрезвычайных ситуаций (ЧС). Нарушение функционирования КСЭОН в период ЧС может привести к критическим последствиям для безопасности населения.

Киберугрозы эволюционируют стремительно. От случайных и демонстрационных атак произошёл переход к систематическим и целевым кампаниям. Государственные и криминальные группировки сосредотачивают свои усилия именно на критической инфраструктуре. Исследования показывают, что процесс распространения вредоносного программного обеспечения (ПО) в компьютерных сетях демонстрирует поразительное сходство с биологическими эпидемиями: каждый инфицированный узел может передать вирус нескольким соседним машинам, создавая цепную реакцию заражения [1].

Традиционные средства защиты информации работают преимущественно в профилактическом режиме: блокируют известные угрозы, обновляют сигнатуры, усиливают аутентификацию. Однако они оставляют без ответа критически важный вопрос: что произойдет, если атакующему все же удастся проникнуть внутрь периметра защиты? С какой скоростью распространится компрометация? Какие узлы инфраструктуры окажутся

наиболее уязвимы к каскадному отказу? На каких критических точках следует сосредоточить внимание при внедрении систем мониторинга и реагирования?

Целью настоящей работы является разработка программного модуля имитационного моделирования распространения вредоносного ПО в сети КСЭОН МЧС России на основе адаптированной эпидемиологической модели PSIDR для оценки динамики киберугроз, выявления критических узлов инфраструктуры и формирования рекомендаций по приоритизации защитных мер.

Ответить на эти вопросы можно только путем применения методов математического моделирования. Эпидемиологические модели, изначально разработанные для изучения распространения инфекционных заболеваний в популяциях, проявляют удивительную универсальность. Феноменологически, биологический вирус, размножаясь в инфицированном организме и передаваясь другим особям, функционально эквивалентен компьютерному вредоносному ПО, распространяющемуся через сетевые соединения. Однако реальные сети критической инфраструктуры имеют сложную иерархическую топологию, где узлы обладают различной степенью важности, а каналы связи – ограниченной пропускной способностью. Это требует адаптации классических моделей.

Классическая эпидемиологическая модель SIR (Susceptible-Infected-Recovered), предложенная Кермаком и Макендриком в 1927 г., описывает три состояния: восприимчивые особи (S), инфицированные (I) и выздоровевшие с иммунитетом (R). Эта модель продемонстрировала эффективность для описания многих биологических эпидемий. Однако для защищенных корпоративных сетей она оказывается неполной. В реальной системе КСЭОН действуют системы детектирования вторжений (IDS/IPS), мониторинга и автоматического реагирования, которые обнаруживают аномалии на различных этапах развития атаки. Это создает промежуточное состояние, которое классическая SIR не учитывает: узел скомпрометирован, атака обнаружена системой защиты, но процесс полной изоляции и восстановления еще не завершен.

Математическая модель эпидемиологической динамики киберугроз

Именно эта недостаточность привела к разработке модели PSIDR (Progressive Susceptible-Infected-Detected-Removed), которая вводит четвертое состояние. Четыре состояния узла сети в PSIDR модели:

– S (Susceptible, восприимчивый): узел функционирует нормально, но уязвим для заражения, все системы защиты еще не активированы против конкретной угрозы.

– I (Infected, инфицированный): вредоносное ПО активно, узел полностью скомпрометирован и служит источником распространения заражения на соседние машины через сетевые каналы.

– D (Detected, обнаруженный): система безопасности зафиксировала аномальное поведение (повышенная активность сети, необычные процессы, сигнатуры в логах), узел изолирован или помещен под усиленный мониторинг, запущен процесс диагностики.

– R (Recovered, восстановленный): узел полностью пролечен (переустановлен, обновлено программное обеспечение, закрыта уязвимость), введены меры, гарантирующие иммунитет к данной угрозе.

Динамика переходов между состояниями описывается системой обыкновенных дифференциальных уравнений [2]:

$$\begin{cases} \frac{dS}{dt} = -\beta \frac{S \cdot I}{N} - \mu S \\ \frac{dI}{dt} = \beta \frac{S \cdot I}{N} - \mu I \\ \frac{dD}{dt} = \mu I - \sigma D \\ \frac{dR}{dt} = \sigma D + \mu S \end{cases}$$

где $N = S + I + D + R$ – общее количество узлов в анализируемом сегменте сети.

Параметры модели имеют четкий физический и практический смысл:

β (коэффициент заражения, диапазон 0...1): вероятность передачи вредоносного ПО при условии контакта восприимчивого узла с инфицированным в течение единицы времени. На практике зависит от агрессивности вируса (скорость распространения), эффективности защиты на хостах (наличие firewall, EDR), пропускной способности и архитектуры сетевых каналов [3].

μ (коэффициент обнаружения, диапазон 0...1): интенсивность, с которой система безопасности обнаруживает инфицированные узлы и переводит их в состояние D. На практике зависит от развертывания систем мониторинга (SIEM, SOC), качества определения сигнатур и поведенческих аномалий, компетентности аналитиков SOC.

σ (коэффициент восстановления, диапазон 0...1): скорость, с которой обнаруженные и изолированные узлы восстанавливаются и возвращаются в строй. На практике определяется наличием автоматизации процессов восстановления, актуальностью резервных копий, скоростью работы команды инцидент-менеджмента, наличием заготовленных стандартных образов систем.

Ключевой показатель, определяющий характер развития эпидемии, базовое репродуктивное число R_0 :

$$R_0 = \frac{\beta}{\mu}$$

В условиях, когда практически все узлы восприимчивы (начальная фаза эпидемии), каждый зараженный узел в среднем успевает инфицировать R_0 новых восприимчивых узлов до момента его обнаружения [4]. Если $R_0 > 1$, эпидемия развивается экспоненциально – число инфицированных растет. Если $R_0 < 1$, эпидемия затухает самостоятельно – каждое поколение инфекции меньше предыдущего. Граница $R_0 = 1$ является критическим порогом, разделяющим два режима. Например, если $\beta = 0.30$ и $\mu = 0.15$, то $R_0 = 2.0$, означая, что при отсутствии других мер каждый вирус успевает заразить в среднем двух новых узлов.

Топологическая модель иерархической сетевой инфраструктуры КСЭОН

Реальная КСЭОН имеет четко выраженную иерархическую структуру управления: стратегические решения принимаются на федеральном уровне, передаются в субъекты, затем в муниципалитеты и, в конечном счете, на объектовые терминалы оповещения. При разработке математической модели было принято решение явно отразить эту иерархию через представление сети в виде взвешенного неориентированного графа $G = (V, E)$, где V – множество узлов (компьютеры, серверы, контроллеры), E – множество каналов связи между ними [5]. Граф содержит четыре слоя:

- Уровень 1 (Федеральный): центральный диспетчерский центр МЧС России, ~ 1 узел;
- Уровень 2 (Региональный): серверы управления в субъектах России, ~10 узлов;
- Уровень 3 (Муниципальный): единые диспетчерские центры в районах, ~30 узлов;
- Уровень 4 (Объектовый): терминалы оповещения на опасных объектах, ~59 узлов.

Иерархичность топологии критична для анализа устойчивости: компрометация узла федерального уровня влияет на всю систему оповещения, тогда как вывод из строя одного объектового терминала представляет локальную проблему.

Программная реализация и архитектура вычислительного комплекса

Для реализации разработанного математического аппарата выбран язык программирования Python, обладающий мощной экосистемой научных библиотек. Архитектура приложения построена по принципу разделения ответственности, что обеспечивает модульность, тестируемость и простоту расширения функциональности (рис. 1).

Архитектура программного комплекса моделирования КСЭОН

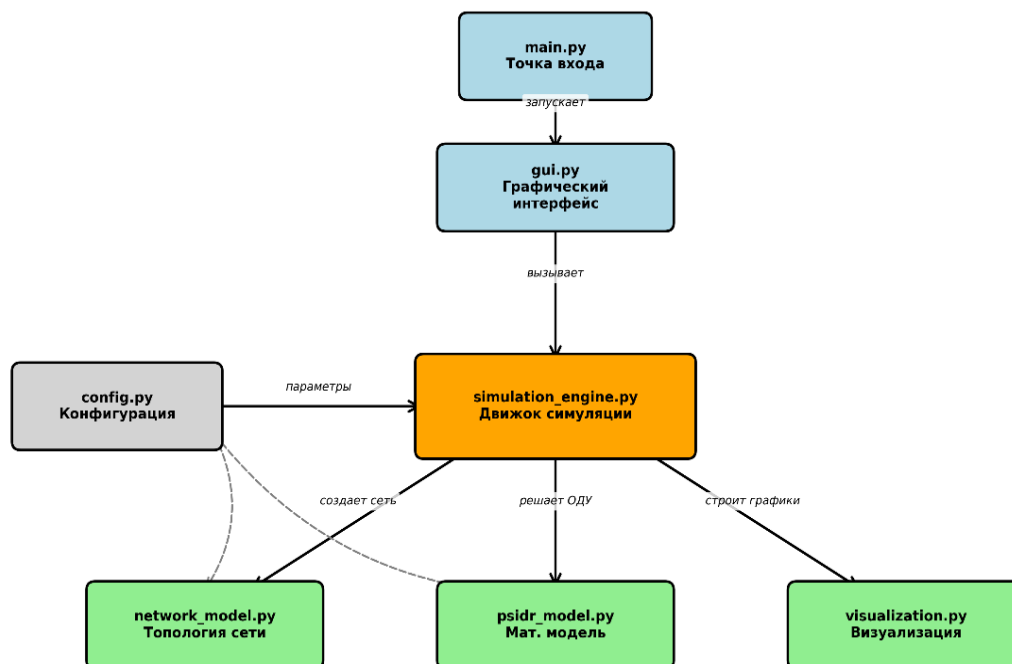


Рис. 1. Архитектура программного комплекса: модули, функции и их взаимосвязь

Центральный модуль `simulation_engine` координирует работу `network_model` (топология), `psidr_model` (математика) и `visualization` (отображение результатов). GUI служит интерфейсом для пользователя.

Ключевые модули системы:

1. – `config.py` – конфигурационный модуль, где централизованно заданы все начальные значения параметров модели (β , μ , σ), размеры сети на каждом уровне иерархии, параметры численного интегрирования (шаг времени Δt , количество временных шагов). Это «точка входа» для адаптации модели под конкретные условия и сценарии. Изменение параметров не требует редактирования основного кода.

2. – `network_model.py` – модуль создания и анализа топологии сети. Реализует класс `KSEONNetwork`, который генерирует граф сети с учетом иерархии: создает узлы четырех уровней в соответствии с конфигурацией, соединяет их по правилам иерархии, добавляет резервные каналы для повышения отказоустойчивости. Также вычисляет три типа метрик центральности каждого узла: степень (`Degree Centrality`), близость (`Closeness Centrality`), посредничество (`Betweenness Centrality`). Эти метрики необходимы для выявления критически важных узлов.

3. – `psidr_model.py` – основной математический модуль. Содержит два класса, первый – `PSIDRModel`, реализует детерминированное моделирование путем численного решения системы ОДУ (используется `scipy.integrate.odeint`). Второй класс – `NetworkPSIDRModel`, реализует стохастическое моделирование, где процесс заражения моделируется как случайная ходьба по графу; каждый зараженный узел имеет вероятность $\beta \cdot \Delta t$ передать вирус каждому соседнему узлу в текущем временном шаге.

4. `simulation_engine.py` – «оркестр» системы. Управляет взаимодействием всех компонентов:

- инициализирует граф сети через `network_model`;
- задает начальное состояние (выбирает стартовые инфицированные узлы);
- запускает процесс моделирования (детерминированное или стохастическое);

- собирает статистику (пик инфекции, время достижения пика, финальный охват, время затухания активной фазы);
 - передает результаты в visualization для отображения.
5. visualization.py – модуль визуализации. Создает набор графиков:
- линейный график динамики S(t), I(t), D(t), R(t);
 - диаграмма stacked area для распределения состояний – визуализация топологии сети с цветовой раскраской узлов по состоянию;
 - графики метрик центральности (Degree, Closeness, Betweenness);
 - сводная статистика в формате комбинированного графика.
6. gui.py – графический интерфейс, который позволяет пользователю без знания Python интерактивно менять параметры симуляции, видеть результаты в режиме реального времени в виде пяти вкладок визуализации, сохранять графики в PNG.
7. main.py – точка входа приложения, обеспечивает запуск либо GUI в интерактивном режиме, либо консольной версии для пакетной обработки.

Результаты численного моделирования динамики заражения сетевой инфраструктуры

Тестовый сценарий выбран как репрезентативный для «среднестатистического» вирусного воздействия с параметрами: $\beta = 0.30$ (достаточно агрессивный вирус), $\mu = 0.15$ (низкая скорость обнаружения), $\sigma = 0.25$ (средняя скорость восстановления). Сеть содержит 100 узлов (распределены иерархически: 1 федеральный, 10 региональных, 30 муниципальных, 59 объектовых), начальное количество инфицированных – 5 узлов, выбранных случайно. На рис. 2 показан главный экран приложения с параметрами слева и основным графиком справа.

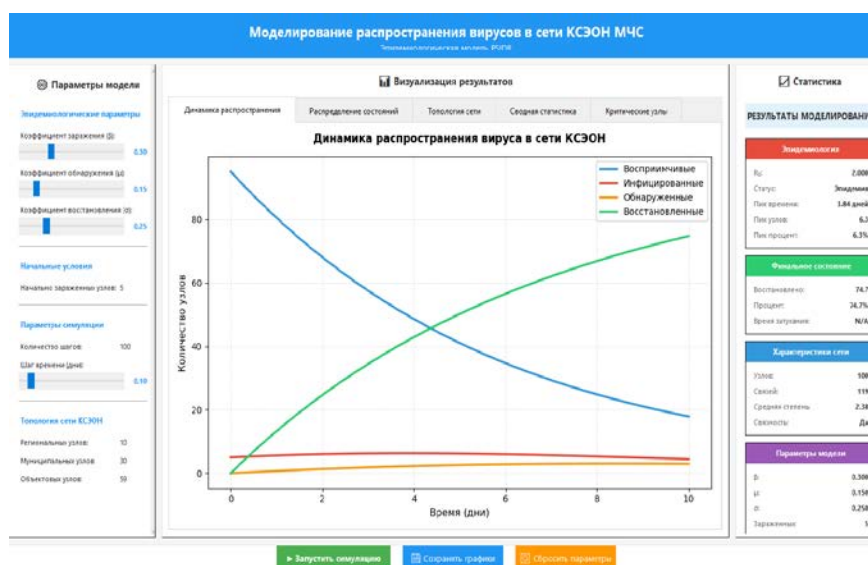


Рис. 2. Интерфейс программного комплекса

Тестовый сценарий демонстрирует развитие эпидемии. Базовое репродуктивное число:

$$R_0 = \frac{\beta}{\mu} = \frac{0.30}{0.15} = 2.0$$

Значение $R_0 = 2.0 > 1$ указывает на развитие эпидемии. На рис. 3 представлена динамика состояний узлов.

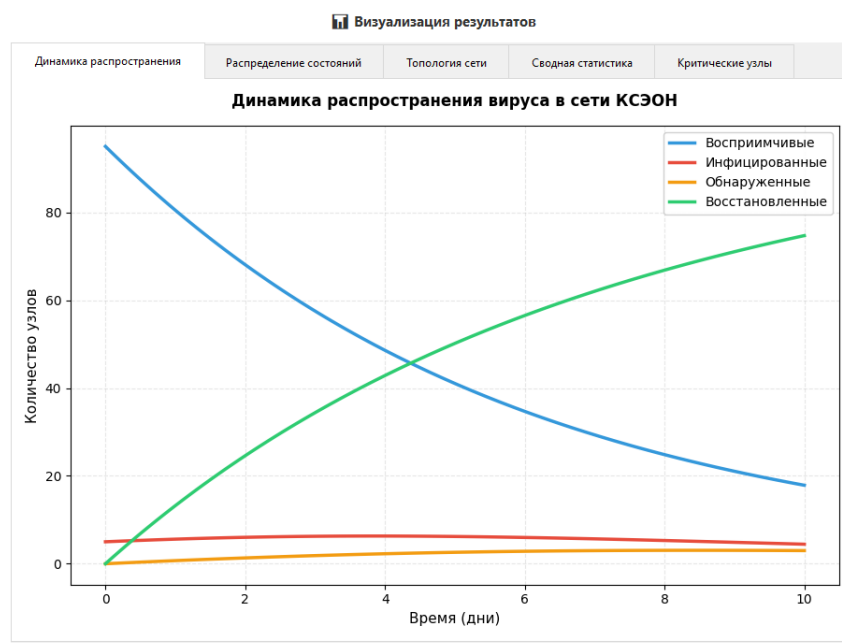


Рис. 3. Динамика распространения вредоносного ПО во времени при базовых параметрах

По оси X – время в днях (0...10), по оси Y – количество узлов (0...100). Синяя линия $S(t)$ (восприимчивые): резко убывает с 95 до ~ 0 за 2 дня, так как узлы либо заражаются, либо срабатывает система обнаружения. Красная линия $I(t)$ (инфицированные): экспоненциально растет в начале, достигает пика ~ 6.3 узлов в момент $t \approx 3.84$ дня, затем спадает к нулю. Оранжевая линия $D(t)$ (обнаруженные): растет с задержкой после пика I , достигает максимума ~ 6 узлов, затем спадает. Зеленая линия $R(t)$ (восстановленные): логистически растет, асимптотически приближаясь к 74.7 узлам к концу периода.

Анализ графика рис. 3 показывает:

1. На начальном этапе ($t = 0...2$ дня): экспоненциальный рост числа инфицированных узлов. Вирус имеет временное преимущество – множество восприимчивых узлов, система безопасности еще полностью не мобилизована. За 2 дня 95 % узлов либо заражены, либо включены в процесс обнаружения.

2. На пике эпидемии ($t \approx 3.84$ дня): максимальное число одновременно инфицированных узлов. На этот момент активно инфицировано ~ 6.3 узлов (6.3 % от сети), однако число обнаруженных уже превышает число активно инфицированных. Система защиты зафиксировала пик эпидемии в точке максимума, но процесс восстановления еще не завершен.

3. На завершающем этапе ($t = 4...10$ дней): затухание активной фазы эпидемии. Число активно инфицированных узлов падает экспоненциально, доля восстановленных растет. К концу периода наблюдения ($t = 10$ дней) 74.7 % сети получили иммунитет.

Распределение состояний можно наглядно видеть на рис. 4 в формате диаграммы. Данная форма визуализации позволяет проследить эволюцию системы как непрерывный процесс перераспределения узлов между состояниями. Характерной особенностью графика является отчетливо выраженная фаза активного противоборства между инфицированными и обнаруженными узлами в интервале 2–6 дней, когда площади соответствующих областей сопоставимы по величине. Это свидетельствует о том, что система безопасности работает с задержкой, но достаточно эффективно. Итоговое распределение указывает на то, что атака была частично успешной – значительная доля сети подверглась компрометации, хотя полного каскадного отказа удалось избежать благодаря системам обнаружения и восстановления.

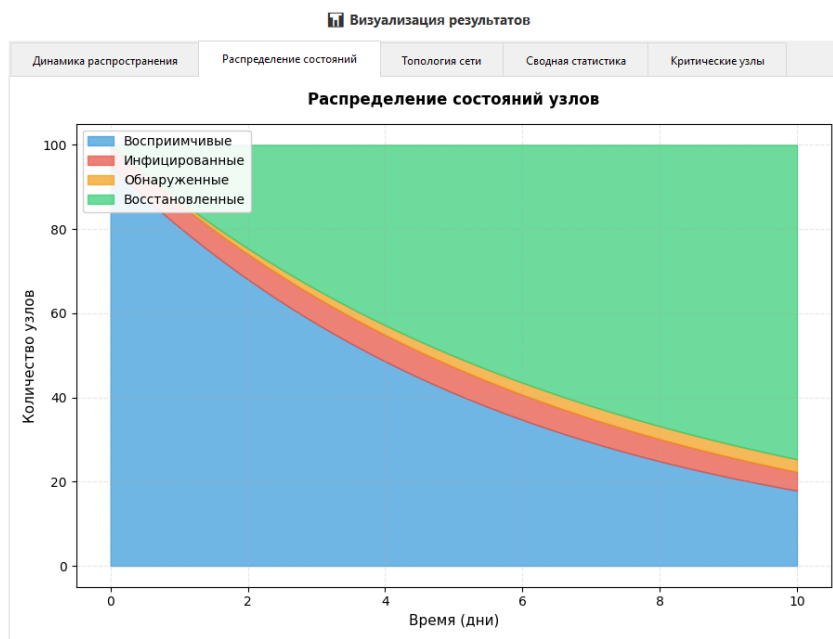


Рис. 4. Распределение состояний узлов во времени

Четыре цветные полосы, наложенные друг на друга, показывают, как меняется абсолютное и относительное число узлов в каждом состоянии. Визуально видно, как система переходит от состояния «почти все восприимчивы» к «почти все восстановлены», проходя через фазы активного заражения.

На рис. 5 представлена топология сети с цветовой индикацией статусов узлов.

Иерархическая структура: федеральный узел (красный, большой, вверху), региональные узлы (средние, большинство красные), муниципальные (маленькие, смешанные цвета), объектовые (маленькие, в основном синие). Размер узла пропорционален его степени центральности. Хорошо видно, что вирус в первую очередь поражает узлы верхних уровней иерархии – федеральные и региональные.

Анализ графика показывает критическую уязвимость централизованных архитектур: компрометация федерального узла приводит к каскадному отказу всей системы оповещения. Это подчеркивает необходимость эшелонированной защиты центральных узлов и физической изоляции от публичных сетей [6].

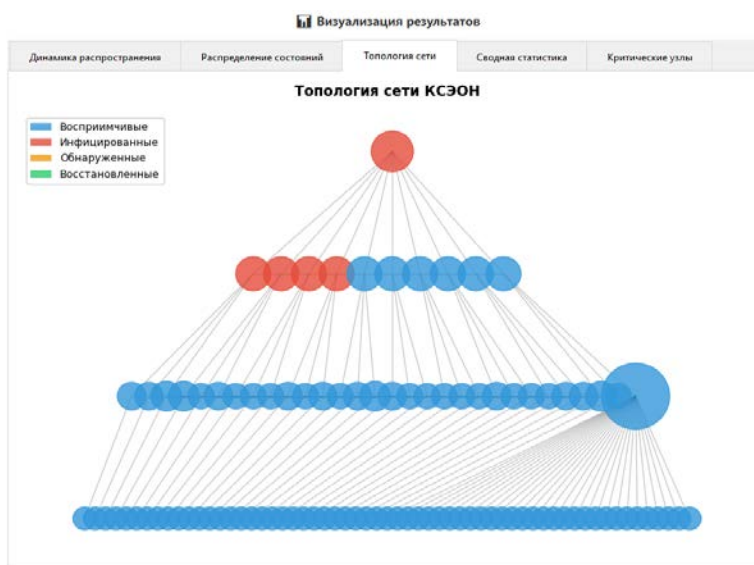


Рис. 5. Топология сети КСЭОН при $t \approx 3$ дня (пик эпидемии)

Параметрический анализ чувствительности модели к изменению характеристик защиты

Для оценки влияния различных мер защиты и характеристик потенциальных угроз проведен анализ чувствительности модели. В таблице представлены результаты моделирования для пяти различных сценариев, показывающих, как изменение параметров модели влияет на динамику эпидемии.

Таблица

**Анализ чувствительности: влияние параметров
на динамику эпидемии в сети из 100 узлов**

Сценарий	β	μ	σ	R_0	Время пика (дни)	Макс инфици. узлов	Охват сети (%)
1. Базовый	0.30	0.15	0.25	2.00	3.84	6.3	74.7
2. Слабый вирус	0.10	0.15	0.25	0.67	–	2.1	18.5
3. Быстрое обнаружение	0.30	0.50	0.25	0.60	–	1.8	12.3
4. Медленное восстановление	0.30	0.15	0.05	2.00	3.92	6.8	76.1
5. Агрессивный вирус	0.70	0.05	0.10	14.0	1.21	18.5	95.2

Можно сделать следующие выводы, что сценарий 2 (слабый вирус, $\beta = 0.10$) несмотря на низкий уровень обнаружения, слабость вируса гарантирует, что эпидемия не разовьется. $R_0 = 0.67 < 1$. Охват – лишь 18.5 %.

Сценарий 3 (быстрое обнаружение, $\mu = 0.50$) – даже при агрессивном вирусе, если система обнаружения работает эффективно, эпидемия не развивается. $R_0 = 0.60 < 1$. Охват сокращается до 12.3 %. Это убедительно показывает, что инвестиции в SIEM-системы дают наибольший эффект.

Сценарий 4 (медленное восстановление, $\sigma = 0.05$) – медленное восстановление незначительно влияет на R_0 (он остается 2.0), так как параметр σ не входит в формулу R_0 . Охват возрастает незначительно (76.1 % vs 74.7% в базовом).

Сценарий 5 (агрессивный вирус, $\beta = 0.70$, $\mu = 0.05$) – катастрофический сценарий, моделирующий распространение zero-day эксплойта. $R_0 = 14.0$. Вирус распространяется взрывоопасно, охватывает 95.2 % сети.

На основании тестовых значений можно сделать стратегические выводы:

1. Критическим параметром является коэффициент обнаружения (μ), а не скорость восстановления (σ). Переход μ с 0.15 на 0.50 снижает охват с 74.7 % на 12.3 %, тогда как изменение σ с 0.25 на 0.05 дает меньший эффект.

2. Для предотвращения эпидемии необходимо, чтобы $R_0 < 1$, то есть $\beta < \mu$. При текущих параметрах это требует либо снижения β (что сложно, зависит от вируса), либо увеличения μ (вполне достижимо через внедрение средств защиты).

3. Инвестиции в системы обнаружения и мониторинга дают лучший ROI, чем инвестиции в автоматизацию восстановления.

Идентификация критических узлов на основе метрик сетевой центральности

На рис. 6 показаны метрики центральности для выявления критически важных узлов. Слева показана степень узлов, посередине отображается близость узлов, а справа посредничество узлов. Горизонтальные столбчатые диаграммы показывают топ узлов по каждой метрике.

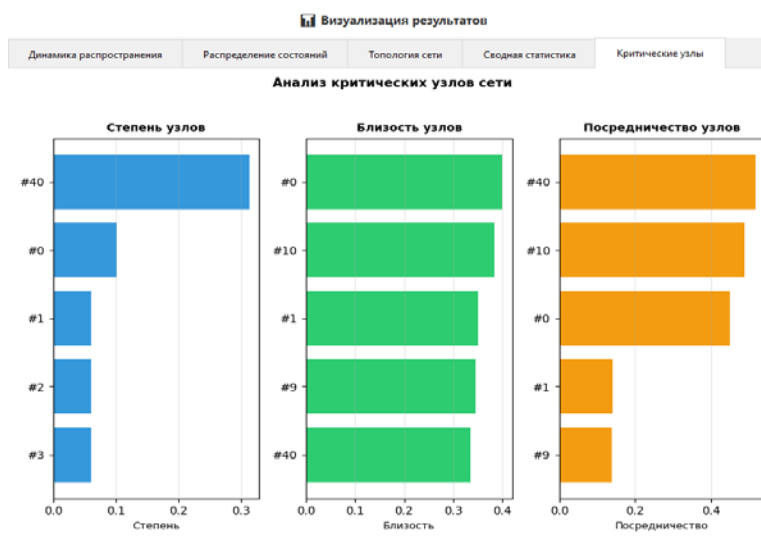


Рис. 6. Анализ критических узлов сети по трем метрикам центральности

Три типа центральности имеют разный практический смысл. Левый график показывает узлы с максимальным числом прямых соединений. Узел #40 имеет максимум (~0.35), что означает, что он подключен к 35 % всех остальных узлов. Практически, если такой узел скомпрометирован, вирус немедленно получает доступ к большому количеству соседей.

Средний график измеряет, насколько близко узел находится до всех остальных в среднем. Узел #0 (федеральный) имеет максимум (~0.55), что означает, кратчайший путь от него до любого другого узла минимален. Практически это главный «командный центр», от него быстрее всего распространяются команды управления, а значит, и вирус.

Правый график показывает долю кратчайших путей, проходящих через данный узел. Узел #40 имеет максимум (~0.4), означая, что 40 % кратчайших путей в сети проходят через него. Практически это критическая «точка отказа», его компрометация разобщает сеть.

На рис. 7 показана сводная статистика моделирования в формате четырех подграфиков.

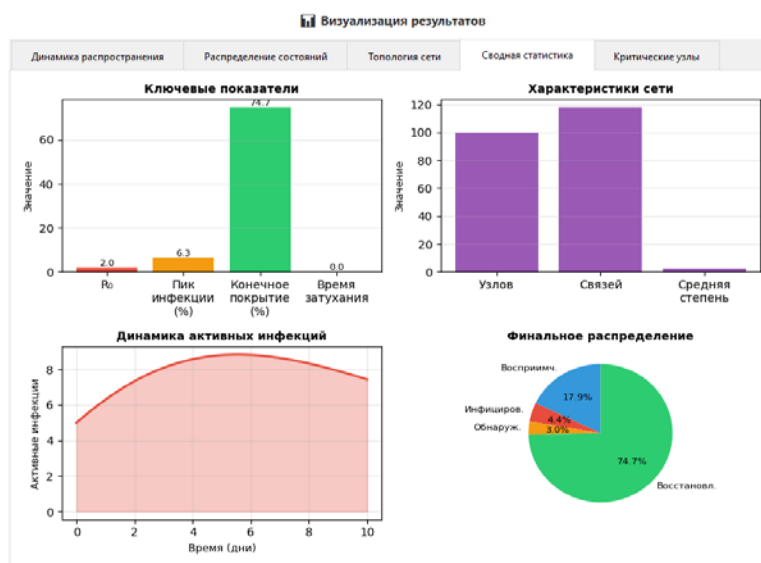


Рис. 7. Сводная статистика моделирования при базовых параметрах

Верхний левый – ключевые показатели (R_0 , пик инфекции %, конечное покрытие %, время затухания). Верхний правый – характеристики сети (100 узлов, 119 связей, средняя степень 2.38). Нижний левый – динамика активных инфекций (область под кривой $I(t)$). Нижний правый – финальное распределение состояний (pie chart: 17.9 % восприимчивые, 74.7 % восстановленные).

Практическое применение программного комплекса в системе защиты КСЭОН

Разработанный программный модуль имеет прямое практическое применение:

1. Планирование инвестиций в защиту. На основе анализа чувствительности четко видно, что наиболее эффективно направлять финансирование на развертывание систем обнаружения (SIEM, SOC, EDR). Внедрение быстрого обнаружения ($\mu = 0.50$) снижает охват эпидемии с 74.7 % до 12.3 %.

2. Выявление критических узлов и приоритизация защиты. На основе метрик центральности определяются узлы, требующие особой внимательности: федеральный центр и региональные узлы требуют усиленной защиты, физической изоляции от публичных сетей.

3. Сценарное моделирование «что-если». Перед принятием важных решений администраторы могут смоделировать различные сценарии. Например: «Что произойдет, если мы внедрим новую SIEM-систему и поднимем коэффициент обнаружения μ с 0.15 до 0.40?»

4. Обучение и обоснование стратегии для руководства. Наглядные графики позволяют объяснить руководству, почему защита критической инфраструктуры требует постоянного внимания и инвестиций.

5. Подготовка процедур восстановления после инцидента. На основе моделирования можно оценить, за какое время при заданном σ удастся восстановить 50 %, 75 %, 95 % сети.

На текущем этапе реализована основная функциональность. Для реального использования потребуется:

- Калибровка параметров модели (β , μ , σ) на реальных данных инцидентов;
- Интеграция с системами мониторинга КСЭОН для получения актуальных значений параметров в реальном времени;
- Расширение для учета multi-phase атак;
- Добавление стоимостного анализа для оптимизации распределения ресурсов.

Заключение

Разработанный программный комплекс представляет собой практический инструмент для анализа устойчивости сети КСЭОН к киберугрозам. Адаптация эпидемиологической модели PSIDR к специфике иерархической сетевой инфраструктуры позволяет количественно оценивать эффективность различных стратегий защиты и моделировать сценарии «что-если» [7].

Проведенный анализ чувствительности показывает критическую роль систем обнаружения угроз: инвестиции в SIEM дают больший эффект, чем инвестиции в скорость восстановления. Выявление критических узлов сети позволяет приоритизировать защитные меры [8].

Тестовый сценарий ($R_0 = 2.0$) демонстрирует, что при текущих параметрах защиты система подвергается значительному риску, охватывая 74.7 % сети за 10 дней. Однако агрессивное внедрение систем обнаружения может привести систему в режим $R_0 < 1$, при котором эпидемия затухает самостоятельно.

Модульная архитектура программного комплекса позволяет легко расширять функциональность и адаптировать модель под конкретные условия. Дальнейшее развитие предполагает интеграцию с реальными данными КСЭОН, применение методов машинного обучения для автоматической калибровки параметров, и разработку интеграции с SIEM-системами для обновления параметров в реальном времени [9].

Разработанный программный продукт представляет собой практический инструмент для количественной оценки устойчивости сети КСЭОН МЧС России к киберугрозам.

Адаптация эпидемиологической модели PSIDR к специфике иерархической четырехуровневой топологии критической инфраструктуры позволяет моделировать сценарии «что-если» и оценивать эффективность различных стратегий защиты.

Основные результаты исследования:

1. Проведенный анализ чувствительности продемонстрировал критическую роль систем обнаружения угроз: повышение коэффициента обнаружения μ с 0,15 до 0,50 снижает охват эпидемии в 6 раз (с 74,7 % до 12,3 %), что значительно превосходит эффект от ускорения восстановления узлов.

2. Выявлены критические узлы инфраструктуры на основе метрик центральности (степень, близость, посредничество), компрометация которых приводит к каскадному отказу системы оповещения. Федеральные и региональные узлы требуют приоритетной защиты и физической изоляции от публичных сетей.

3. Установлено, что для предотвращения эпидемии необходимо обеспечить условие $R_0 < 1$, что достигается превышением скорости обнаружения над скоростью распространения ($\beta < \mu$).

Дальнейшее развитие инструмента предполагает калибровку параметров модели на реальных данных инцидентов, интеграцию с системами мониторинга КСЭОН для получения актуальных значений в режиме реального времени, расширение для учета многоэтапных атак и добавление стоимостного анализа для оптимизации распределения ресурсов. Модульная архитектура программного комплекса обеспечивает простоту адаптации под специфические условия различных регионов и уровней иерархии системы оповещения МЧС России[10].

Список источников

1. Арванова С.М., Ксенофонтов А.С., Москаленко Л.А. Криптографические механизмы безопасности // Научный альманах. 2015. № 7(9). С. 578–580.

2. Лаврова Д.С. Моделирование сетевой инфраструктуры сложных крупномасштабных объектов, в том числе критического назначения, с использованием теории графов // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. 2019. № 1. С. 26–33.

3. Калениченко С.Е., Тарасова Л.Д., Григорян Д.Р. Модель вероятно-клеточного автомата PSIDR // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании: сб. науч. ст. СПб.: СПбГУТ. 2022. Т. 1. С. 516–520.

4. Рябко А.В., Печуров А.В. Математическая модель защиты компьютерной сети от вирусов // Программные продукты и системы. 2016. №4. С. 125–128.

5. Гушин Г.В. Системы оповещения населения: назначение, задачи и требования к функционированию // Гражданская оборона и защита от чрезвычайных ситуаций в учреждениях, организациях и на предприятиях. 2024. № 1. С. 25–32.

6. Метельков А.Н. Моделирование сценариев кибератак в киберполигонах // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России». 2023. № 2. С. 161–176.

7. Корчагин С.А., Рубцов Д.Ю., Беспалова Н.В., Сердечный Д.В. Разработка интеллектуальных моделей проактивной защиты критической инфраструктуры финансового сектора // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2024. Т. 12. № 4.

8. Мельников А.В. Модель оценки эффективности организационных мер для обеспечения информационной безопасности автоматизированных систем специального назначения при появлении неизвестной вредоносной программы // Экономика. Информатика. 2023. Т. 50. № 4. С. 873–882.

9. ГОСТ Р 22.7.05-2022. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Локальные системы оповещения. Общие технические требования. М.: Российский институт стандартизации, 2022. 16 с.

10. Методические рекомендации по поддержанию в состоянии постоянной готовности к использованию систем оповещения населения (утв. МЧС России 26.06.2024 № 2). М.: МЧС России, 2024.

References

1. Arvanova S.M., Ksenofontov A.S., Moskalenko L.A. Kriptograficheskie mekhanizmy bezopasnosti // Nauchnyj al'manah. 2015. № 7(9). S. 578–580.
2. Lavrova D.S. Modelirovanie setевой infrastruktury slozhnyh krupnomashtabnyh ob'ektov, v tom chisle kriticheskogo naznacheniya, s ispol'zovaniem teorii grafov // Problemy informacionnoj bezopasnosti. Komp'yuternye sistemy. 2019. № 1. S. 26–33.
3. Kalenichenko S.E., Tarasova L.D., Grigoryan D.R. Model' veroyatno-kletochnogo avtomata PSIDR // Aktual'nye problemy infotelekkommunikacij v nauke i obrazovanii: sb. nauch. st. SPb.: SPbGUT. 2022. T. 1. S. 516–520.
4. Ryabko A.V., Pechkurov A.V. Matematicheskaya model' zashchity komp'yuternoj seti ot virusov // Programmnye produkty i sistemy. 2016. №4. S. 125–128.
5. Gushchin G.V. Sistemy opoveshcheniya naseleniya: naznachenie, zadachi i trebovaniya k funkcionirovaniyu // Grazhdanskaya oborona i zashchita ot chrezvychajnyh situacij v uchrezhdeniyah, organizacijah i na predpriyatijah. 2024. № 1. S. 25–32.
6. Metel'kov A.N. Modelirovanie scenarijev kiberatak v kiberpoligonah // Nauchno-analiticheskij zhurnal «Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta GPS MCHS Rossii». 2023. № 2. S. 161–176.
7. Korchagin S.A., Rubcov D.YU., Bepalova N.V., Serdechnyj D.V. Razrabotka intellektual'nyh modelej proaktivnoj zashchity kriticheskoy infrastruktury finansovogo sektora // Modelirovanie, optimizaciya i informacionnye tekhnologii. 2024. T. 12. № 4.
8. Mel'nikov A.V. Model' ocenki effektivnosti organizacionnyh mer dlya obespecheniya informacionnoj bezopasnosti avtomatizirovannyh sistem special'nogo naznacheniya pri poyavlenii neizvestnoj vredonosnoj programmy // Ekonomika. Informatika. 2023. T. 50. № 4. S. 873–882.
9. GOST R 22.7.05-2022. Bezopasnost' v chrezvychajnyh situacijah. Lokal'nye sistemy opoveshcheniya. Obshchie tekhnicheskie trebovaniya. M.: Rossijskij institut standartizacii, 2022. 16 s.
10. Metodicheskie rekomendacii po podderzhaniyu v sostoyanii postoyannoj gotovnosti k ispol'zovaniyu sistem opoveshcheniya naseleniya (utv. MCHS Rossii 26.06.2024 № 2). M.: MCHS Rossii, 2024.

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 01.12.2025; одобрена после рецензирования: 15.02.2026;
принята к публикации: 19.02.2026

The information about article:

The article was submitted to the editorial office: 01.12.2025; approved after review: 15.02.2026;
accepted for publication: 19.02.2026

Сведения об авторах:

Арванова Саният Мухамедовна, старший преподаватель кафедры компьютерных технологий и информационной безопасности института электроники, робототехники и искусственного интеллекта Кабардино-Балкарского государственного университета, (360004, г. Нальчик, ул. Чернышевского, д. 175), email: sani_07@mail.ru, SPIN-код: 6933-0937

Бархатов Константин Сергеевич, студент института электроники, робототехники и искусственного интеллекта Кабардино-Балкарского государственного университета, (360004, г. Нальчик, ул. Чернышевского, д. 175), e-mail: barhatov364@gmail.com

Гергов Идар Хабасович, студент института электроники, робототехники и искусственного интеллекта Кабардино-Балкарского государственного университета, (360004, г. Нальчик, ул. Чернышевского, д. 175), e-mail: gergov44559@gmail.com

Курданов Халид Солтанович, студент института электроники, робототехники и искусственного интеллекта Кабардино-Балкарского государственного университета, (360004, г. Нальчик, ул. Чернышевского, д. 175), e-mail: khalidkurdanov@mail.ru

Information about the authors:

Arvanova Saniyat M., senior lecturer at of the department of computer technology and information security of the institute of electronics, robotics and artificial intelligence of Kabardino-Balkarian State university, (360004, Nalchik, Chernyshevsky str., 175), email: sani_07@mail.ru, SPIN: 6933-0937

Barkhatov Konstantin S., student of the institute of electronics, robotics and artificial intelligence of Kabardino-Balkarian State university, (360004, Nalchik, Chernyshevsky str., 175), e-mail: barhatov364@gmail.com

Gergov Idar K., student of the institute of electronics, robotics and artificial intelligence of the Kabardino-Balkarian State university, (360004, Nalchik, Chernyshevskogo str., 175), e-mail: gergov44559@gmail.com

Kurdanov Khalid S., student of the institute of electronics, robotics and artificial intelligence of the Kabardino-Balkarian State university, (360004, Nalchik, Chernyshevskogo str., 175), e-mail: khalidkurdan

АВТОРАМ ЖУРНАЛА «ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОГЕННЫЕ РИСКИ (ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ И ПРИКЛАДНЫЕ АСПЕКТЫ)»

К публикации принимаются оригинальные исследовательские и обзорные аналитические статьи, отвечающие профилю журнала, представляющие результаты завершеного научного исследования, выполненного на актуальную тему, обладающие научной новизной, имеющие практическое значение и теоретическое обоснование, оформленные в соответствии с требованиями.

Статья не должна быть ранее опубликованной и не поданной для рассмотрения в другие журналы. Все статьи проходят проверку в системе «Антиплагиат».

Статьи **обучающихся магистратуры, курсантов и студентов** принимаются **только в соавторстве с научным руководителем**.

1. Материалы для публикации представляются в редакцию журнала лично. Материал должен сопровождаться:

а) для **сотрудников** СПб университета ГПС МЧС России – *заключением* об отсутствии материалов, запрещенных к публикации в открытой печати, *рецензией от члена редакционного совета* (коллегии). По желанию прилагается вторая рецензия от специалиста соответствующего профиля, имеющего ученую степень;

б) для авторов **сторонних** организаций – *заключением* об отсутствии материалов, запрещенных к публикации в открытой печати, *рецензией* от специалиста по соответствующему статье профилю, имеющего ученую степень;

в) статья аспиранта (адъюнкта) или соискателя *отзывом научного руководителя*.

г) *электронной версией* статьи, представленной в формате редактора Microsoft Word (версия не ниже 2003). Название файла должно быть следующим:

Автор1, Автор2 – Первые три слова названия статьи.doc, например: **Иванов – Анализ существующей практики.doc**;

в) *плата* с адъюнктов и аспирантов за публикацию рукописей не взимается.

Издание осуществляет рецензирование всех поступающих в редакцию материалов с целью их экспертной оценки. Статьи рецензируются в обязательном порядке членами редакционной коллегии журнала. Основная цель рецензирования – предоставить редакции аргументированную информацию для принятия решения об опубликовании материала.

2. Статьи, включая рисунки и подписи к ним, список литературы, должны иметь **объем** от **8** до **15** страниц. По согласованию с руководством журнала статьи могут быть приняты и большего объема.

3. Оригинальность статей должна быть **не менее 70 %**.

4. Текст статьи должен быть обязательно структурирован по разделам:

Введение

В разделе «Введение» проводится анализ состояния исследуемой проблемы по публикациям отечественных и зарубежных источников, на основании которого обосновывается актуальность исследования, формулируются цель и задачи исследования.

Методы исследования

В разделе описываются применяемые в работе методы исследования, приводятся сведения об объектах исследования, измерительном оборудовании, описываются условия экспериментов и т.д. Возможно указание ссылок на работы с более подробным изложением методов, однако приводимого описания должно быть достаточно для понимания хода исследования.

При использовании стандартных (или известных) методов и процедур лучше сделать ссылки на соответствующие источники, не забывая описать модификации стандартных методов, если таковые имелись. Если же используется собственный новый метод, описание которого нигде ранее не было опубликовано, важно привести все необходимые детали. Если ранее описание метода было опубликовано в известном журнале, можно ограничиться ссылкой.

Допускается и иное название раздела, обусловленное спецификой исследования и подготовленной на его основе статьи, например «Материалы и методы исследования», «Модели и методы исследования», «Теоретические основы и методы расчета».

Результаты исследования и их обсуждение

В разделе в логической последовательности излагаются результаты исследования, которые подтверждаются таблицами, графиками, рисунками. Здесь же проводится анализ и интерпретация полученных результатов, описываются выявленные закономерности, подтверждается достоверность результатов, проводится сопоставление собственных результатов с данными других исследователей.

Заключение

В разделе излагаются основные выводы, подводятся итог проделанной работы, обосновывается научная новизна полученных результатов, приводятся научно обоснованные рекомендации по их использованию, определяются основные направления дальнейших исследований в данной области.

Заключение содержит главные идеи основного текста статьи, но не должно повторять формулировок, приведенных в предыдущих разделах.

Список литературы должен содержать **не менее 10 источников** (из которых **не менее 30 % зарубежных**).

Для **ОБЗОРНЫХ** аналитических статей допускается иная структура статьи:

1. Введение.
2. Аналитическая часть.
3. Заключение.

В разделе «Аналитическая часть» должен быть представлен критический анализ и критическое обобщение актуальной исследовательской проблемы по отечественным и зарубежным научным источникам (**не менее 25 источников**, из которых **не менее 50 % зарубежных**) с оценкой их научной новизны и оригинальности. Результаты критического анализа и обобщения рекомендуется подтверждать сравнительными таблицами, графиками, рисунками. В статье также должны быть отражены дискуссионные (проблематичные) вопросы.

Допускается разбиение разделов «Методы исследования», «Результаты исследования и их обсуждение», «Аналитическая часть» на несколько логически связанных подразделов.

5. Оформление текста:

а) текст материала для публикации должен быть тщательно отредактирован автором;
б) текст на одной стороне листа формата А4 набирается на компьютере (шрифт Times New Roman 14, **интервал 1,5**, без переносов, в одну колонку, **все поля по 2 см**, нумерация страниц внизу посередине);

в) на первой странице авторского материала должны быть напечатаны: тип статьи (научная, обзорная, редакционная, дискуссионная, рецензия и т.п.), УДК (универсальная десятичная классификация), **на русском и английском языках** название (прописными буквами, полужирным шрифтом, без подчеркивания); ФИО авторов полностью (**не более трех**); место работы (название учреждения), электронный адрес авторов (без слова e-mail), аннотация, ключевые слова.

Требования к аннотации. Аннотация должна быть краткой, информативной, содержать цель работы, методы исследования, основные положения и результаты исследования (излагаются основные результаты теоретических и/или экспериментальных исследований, фактические данные, обнаруженные взаимосвязи и закономерности), выводы с обоснованием научной новизны результатов. Аннотация может включать и другую информацию, уместную с точки зрения авторов, например, рекомендации по применению полученных результатов. Примерный объем аннотации **100–250 слов**.

6. Оформление формул в тексте:

а) формулы должны быть набраны на компьютере в редакторе формул Microsoft Word (Equation), размер шрифта эквивалентен 14 (Times New Roman);

б) в формулах рекомендуется использовать буквы латинского и греческого алфавитов (курсивом);

в) формулы печатаются по центру, номер – у правого поля страницы (нумеровать следует только формулы, упоминаемые в тексте).

7. Оформление рисунков и таблиц:

а) рисунки необходимо выделять отдельным блоком для удобства переноса в тексте или вставлять из файла, выполненного в любом из общепринятых графических редакторов, под рисунком ставится: Рис. 2. и далее следуют пояснения;

б) если в тексте не одна таблица, то их следует пронумеровать (сначала пишется: Таблица 2 (выравнивание по правому краю листа), ниже, отступив одну строку, – название таблицы (полушироко, выравнивание по центру листа), и далее, отступив одну строку, следует разместить саму таблицу);

в) если в тексте одна таблица или один рисунок, то их нумеровать не следует;

г) таблицы должны иметь «вертикальное» построение;

д) в тексте ссылки на таблицы и рисунки делаются следующим образом: рис. 2, табл. 4, если всего один рисунок или одна таблица, то слово пишется целиком: таблица, рисунок.

8. Оформление библиографии (списка источников):

Список литературы должен содержать **не менее 10 источников**, для *обзорных* аналитических статей **не менее 25 источников**.

При этом количество ссылок на статьи из иностранных научных журналов и другие иностранные источники должно быть не менее 30 % от общего количества ссылок, для обзорных аналитических статей не менее 50 % .

В списке литературы должно быть не более 30 % источников, автором либо соавтором которых является автор статьи.

Правила оформления списка литературы:

а) в тексте ссылки на цитируемую литературу обозначаются порядковой цифрой в квадратных скобках;

б) список должен содержать цитируемую литературу, пронумерованную в порядке ее упоминания в тексте.

Пристатейные библиографические списки должны соответствовать ГОСТ Р 7.0.5–2008.

Примеры оформления списка источников:

Список источников

1. Адорно Т.В. К логике социальных наук // Вопросы философии. 1992. № 10. С. 76–86.

2. Информационные аналитические признаки диагностики нефтепродуктов на местах чрезвычайных ситуаций / М.А. Галишев [и др.] // Жизнь и безопасность. 2004. № 3–4. С. 134–137.

3. Щетинский Е.А. Тушение лесных пожаров: пособ. для лесных пожарных. 5-е изд., перераб. и доп. М.: ВНИИЛМ, 2002.

4. Грэгжану П.М., Авербух И.Ш. Вариант вероятностного метода оценки оползнеопасности территории // Современные методы прогноза оползневого процесса: сб. науч. тр. М.: Наука, 1981. С. 61–63.

5. Минаев В.А., Фаддеев А.О. Безопасность и отдых: системный взгляд на проблему рисков // Туризм и рекреация: тр. II Междунар. конф. / МГУ им. М.В. Ломоносова. М., 2007. С. 329–334.

6. Белоус Н.А. Прагматическая реализация коммуникативных стратегий в конфликтном дискурсе // Мир лингвистики и коммуникации: электрон. науч. журн. 2006. № 4. URL: http://www.tverlingua.by.ru/archive/005/5_3_1.htm (дата обращения: 15.12.2007).

7. Об аварийно-спасательных службах и статусе спасателей: Федер. закон Рос. Федерации от 22 авг. 1995 г. № 151-ФЗ // Собр. законодательства Рос. Федерации. 1995. № 35. Ст. 3 503.

9. Оформление раздела «Информация об авторах»

Сведения об авторах прилагаются в конце статьи и включают: Ф.И.О. (полностью), должность, место работы с указанием адреса и его почтового индекса; номер телефона; ученую степень, ученое звание, почетное звание; адрес электронной почты; ORCID для каждого автора (<https://orcid.org/>); SPIN-код для каждого автора (elibrary.ru).

Статья должна быть подписана авторами и указаны контактные телефоны.

Внимание авторов: материалы, оформленные без соблюдения настоящих требований, будут возвращаться на доработку.

Редакция оставляет за собой право направлять статьи на дополнительное анонимное рецензирование.

ОБРАЗЕЦ ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЬИ

Научная статья

УДК 614.8

МЕТОД ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОГНЕЗАЩИТЫ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА ОБЪЕКТАХ НЕФТЕГАЗОВОГО КОМПЛЕКСА В УСЛОВИЯХ ОТКРЫТОГО ПОЖАРА

✉ **Иванов Сергей Петрович.**

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, Россия

✉ *spi78@mail.ru*

Аннотация. 100–250 слов

Ключевые слова: 3–10 слов

Для цитирования: Иванов С.П. Метод оценки эффективности огнезащиты стальных конструкций на объектах нефтегазового комплекса в условиях открытого пожара // Природные и техногенные риски (физико-математические и прикладные аспекты). 2022. № 2 (42). С. 1–2 (ОФОРМЛЯЕТСЯ РЕДАКЦИЕЙ).

METHOD FOR ESTIMATION OF THE EFFICIENCY OF FIRE PROTECTION OF STEEL STRUCTURES ON OBJECTS OF OIL AND GAS COMPLEX IN CONDITIONS OF OPEN FIRE

✉ **Ivanov Sergey P.**

Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, Russia

✉ *spi78@mail.ru*

Abstract.

Keywords:

For citation: Ivanov S.P. Method for estimation of the efficiency of fire protection of steel structures on objects of oil and gas complex in conditions of open fire // Prirodnye i tekhnogennye riski (fiziko-matematicheskie i prikladnye aspekty) = Natural and man-made risks (physico-mathematical and applied aspects). 2022. № 2 (42). P. 1–2.

Введение

Текст, текст, текст

Методы исследования

Текст, текст, текст

Результаты исследования и их обсуждение

Текст, текст, текст

Заключение

Текст, текст, текст

Список источников (не менее 10 источников)

References

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 06.04.2024; одобрена после рецензирования: 12.05.2024;
принята к публикации: 14.05.2024

Information about the article:

The article was submitted to the editorial office: 06.04.2024; approved after review: 12.05.2024;
accepted for publication: 14.05.2024

Информация об авторах:

Иванов Сергей Петрович, заместитель начальника научно-исследовательского института Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), кандидат технических наук, e-mail: spi78@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4651-8513>, SPIN-код: 0123-3210

Information about the authors:

Ivanov Sergey P., deputy head of the research institute of the Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), candidate of technical sciences, e-mail: spi78@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4651-8513>, SPIN: 0123-3210



Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий имени Героя Российской Федерации генерала армии Е.Н. Зиничева»

[16+]

Научно-аналитический журнал

**Природные и техногенные риски
(физико-математические и прикладные аспекты)**

№ 1 (57)–2026

Главный редактор

Матвеев Александр Владимирович, кандидат технических наук, доцент

Регистрационный орган: Федеральная служба по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)

Свидетельство о регистрации: ПИ № ФС 77-64323 от 31 декабря 2015 г.

Адрес редакции и издателя научно-аналитического журнала

«Природные и техногенные риски (физико-математические и прикладные аспекты)»:

Россия, 196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149,
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России»
телефон для справок: +7(812)645-20-35, e-mail: redakziaotdel@yandex.ru

Подписано в печать 8.04.2026
Печать цифровая

Вышел в свет 10.04.2026
Объем 12,5 п.л.
Свободная цена

Формат 60×84_{1/8}
Тираж 1000 экз.

Отпечатано в Санкт-Петербургском университете ГПС МЧС России
196105, Санкт-Петербург, Московский проспект, д. 149