

Научная статья
УДК 681.5
doi:10.34987/vestnik.sibpsa.2025.81.65.011

Модель и алгоритмы управления безопасностью территории и населения

Николай Викторович Мартинович¹

Александр Викторович Вахлеев¹

Евгений Юрьевич Шереметьев¹

Сергей Александрович Гилек¹

Дарья Андреевна Билецкая²

¹Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, Железногорск, Россия

²Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России (федеральный центр науки и высоких технологий), Москва, Россия

Автор, ответственный за переписку: Николай Викторович Мартинович, martin-nv@mail.ru

Аннотация. В статье представлена комплексная модель и набор алгоритмов для управления безопасностью территории и населения, ориентированных на предупреждение и эффективное реагирование на чрезвычайные ситуации техногенного характера. Для решения проблем разнородности исходных данных (концентрация веществ, расстояние, количество техники и т.д.) авторы используют функцию желательности Харрингтона, которая преобразует физические параметры в универсальную безразмерную шкалу от 0 до 1. Используемый математический инструмент позволяет объективно сравнивать и комбинировать совершенно разные показатели, что является критерием для комплексной оценки безопасности. Для нормализации данных используется как одностороннее, так и двустороннее ограничение в зависимости от параметра характера, обобщенный показатель для каждой группы рассчитывается как среднеквадратичное значение, что обеспечивает устойчивость к экстремальным значениям. Для решения задачи распределения ограниченных ресурсов при заданном бюджете предложен подход, основанный на распределении Парето. Особое внимание уделено моделям адаптивности: весовые коэффициенты могут корректироваться в зависимости от типа текущей угрозы, а структурные модели позволяют легко масштабировать и адаптировать подход под специфику различных территорий, включая закрытые административно-территориальные образования. Разработанная методика позволяет количественно оценивать защищенность населения, учитывая состояние потенциально опасных объектов, время реагирования сил и средств и их достаточность. Статья демонстрирует переход от традиционной концепции Safety I, ориентированной на реакцию на инциденты, к современной парадигме Safety II, основанной на превентивном управлении рисками и прогнозировании.

Ключевые слова: управление безопасностью, комплексная безопасность, чрезвычайные ситуации, алгоритмы принятия решений, функция желательности Харрингтона, защищенность населения, множество Парето, РСЧС

Для цитирования: Мартинович Н.В., Вахлеев А.В., Шереметьев Е.Ю., Гилек С.А., Билецкая Д.А. / Модель и алгоритмы управления безопасностью территории и населения // Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2025. № 3 (38). С. 119-126. <https://doi.org/10.34987/vestnik.sibpsa.2025.81.65.011>. Original article.

Model and algorithms for managing the security of the territory and population

Nikolay V. Martinovich¹

Alexander V. Vakhleev¹

Evgeny Y. Sheremetyev¹

Sergey A. Gilek¹

Daria A. Biletskaya²

¹*Siberian Fire and Rescue Academy EMERCOM of Russia, Zheleznogorsk, Russia,*

²*Federal State Budgetary Institution «All-Russian Research Institute for Civil Defense and Emergencies of the Ministry of Emergency Situations of Russia» (Federal Center for Science and High Technologies), Moscow, Russia*

Corresponding author: Nikolay V. Martinovich, martin-nv@mail.ru

Abstract. The article presents a comprehensive model and a set of algorithms for managing the safety of the territory and population, focused on preventing and effectively responding to man-made emergencies. To solve the problems of heterogeneity of the initial data (concentration of substances, distance, amount of equipment, etc.), the authors use the Harrington desirability function, which transforms physical parameters into a universal dimensionless scale from 0 to 1. The mathematical tool used allows objectively comparing and combining completely different indicators, which is a criterion for a comprehensive safety assessment. To normalize the data, both one-sided and two-sided restrictions are used depending on the nature parameter, the generalized indicator for each group is calculated as a root-mean-square value, which ensures resistance to extreme values. To solve the problem of distributing limited resources with a given budget, an approach based on the Pareto distribution is proposed. Particular attention is paid to adaptability models: weighting factors can be adjusted depending on the type of current threat, and structural models allow easy scaling and adaptation of the approach to the specifics of various territories, including closed administrative-territorial entities. The developed methodology allows quantitative assessment of the population's security, taking into account the state of potentially dangerous objects, the response time of forces and means and their sufficiency. The article demonstrates the transition from the traditional Safety I concept, focused on incident response, to the modern Safety II paradigm, based on preventive risk management and forecasting.

Keywords: security management, integrated security, emergency situations, decision-making algorithms, Harrington desirability function, population security, Pareto set, RSChS

For citation: Martinovich N.V., Vakhleev A.V., Sheremetyev E.Y., Gilek S.A., Biletskaya D.A. / Model and algorithms for managing the security of the territory and population // Siberian Fire and Rescue Bulletin. 2025. № 3 (38). С. 119-126. (In Russ.) <https://doi.org/10.34987/vestnik.sibpsa.2025.81.65.011>.

Актуальность обеспечения безопасности территории и населения в современных условиях не вызывает сомнений. Российская Федерация, как и многие другие государства, сталкивается с растущим числом потенциальных угроз, включая техногенные аварии и катастрофы. Основой государственной политики в этой области являются такие документы, как Федеральный закон «О безопасности» [1], и Стратегия национальной безопасности Российской Федерации [2], которые ставят во главу угла защиту жизни и здоровья человека. В этих условиях возникает необходимость в совершенствовании существующих моделей управления, переходе от реактивного реагирования к превентивной стратегии. Современный подход, известный как Safety II, акцентирует внимание не только на предотвращении сбоев, но и на понимании того, как система успешно функционирует в нормальных условиях, что позволяет прогнозировать и предотвращать возможные отклонения. Настоящая работа направлена на разработку научно обоснованной модели и алгоритмов, способных повысить эффективность управления безопасностью на объектовом уровне.

Согласно Федеральному закону от 21.12.1994 № 68-ФЗ «О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера» [3], чрезвычайная ситуация определяется как обстановка на определенной территории, сложившаяся в результате аварии, катастрофы, природной катастрофы, стихийного бедствия, эпидемии, эпизоотии, эпифитотии, массовых беспорядков либо иных чрезвычайных обстоятельств, которые могут привести к человеческим жертвам, ущербу здоровью людей или окружающей природной среде, значительным материальным потерям и нарушению условий жизнедеятельности людей.

В настоящий момент в России создана и успешно функционирует Единая государственная система предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций (РСЧС). Эта система представляет собой многоуровневую структуру, объединяющую силы и средства федеральных, региональных и местных органов власти, а также организаций. Ее работа регулируется нормативными актами, определяющими классификацию чрезвычайных ситуаций и соответствующие режимы реагирования — от повседневной деятельности до режима чрезвычайной ситуации. Ключевыми задачами РСЧС являются сбор и анализ информации, мониторинг состояния окружающей среды и техногенных объектов, а также обеспечение своевременного оповещения и реагирования. Важным направлением развития является интеграция цифровых технологий, таких как концепции «Безопасный город» и «Умный город», которые предполагают создание единого информационного пространства для оперативного управления и прогнозирования угроз.

Предлагаемая модель комплексной безопасности территории представляет собой систему, объединяющую четыре основных компонента:

Первый — это система мониторинга и прогнозирования, которая обеспечивает постоянное наблюдение за состоянием окружающей среды и техногенных объектов, собирая данные для анализа и выявления потенциальных угроз.

Второй компонент — система оценки рисков, которая анализирует структуру возможных чрезвычайных ситуаций и методы оценки параметров системы защиты населения.

Третий компонент — система принятия решений, которая на основе анализа данных формирует оптимальные управленческие воздействия.

Четвертый компонент — система ресурсного обеспечения, которая отвечает за рациональное распределение материальных и финансовых ресурсов для предотвращения и ликвидации чрезвычайных ситуаций.

Модель универсальна и допускает адаптацию под специфические условия, например, для закрытых административно-территориальных образований или предприятий горнодобывающей отрасли, где риски и инфраструктура имеют свои особенности.

Центральным элементом предлагаемых алгоритмов является методика количественной оценки защищенности населения. Эта методика основана на расчете трех ключевых показателей. Первый показатель отражает состояние источников техногенной чрезвычайной ситуации, то есть насколько надежно функционируют потенциально опасные объекты. Второй показатель учитывает время реагирования — насколько быстро силы реагирования могут прибыть на место происшествия. Третий показатель оценивает достаточность сил и средств, необходимых для ликвидации последствий возможной чрезвычайной ситуации.

Для преобразования разнородных количественных данных этих показателей в единый качественный критерий используется функция желательности Харрингтона. Эта функция позволяет перевести физические параметры в безразмерную шкалу от 0 до 1, где 0 означает крайне нежелательное состояние, а 1 — оптимальное. [4-5] Итоговый показатель защищенности рассчитывается как среднее геометрическое или среднее квадратическое от частных показателей, что позволяет получить комплексную оценку. Для принятия решений о распределении ресурсов используется построение множества Парето, которое помогает

найти оптимальный баланс между стоимостью мероприятий и уровнем повышения безопасности, особенно в условиях ограниченного бюджета. [6]

Для формализации процесса оценки защищенности населения от чрезвычайных ситуаций техногенного характера вводится комплексный показатель (P_z), который является аддитивной (мультипликативной) комбинацией 3-х частных показателей (1):

$$P_z = \alpha_1 \times P_1 + \alpha_2 \times P_2 + \alpha_3 \times P_3 \quad (1)$$

где, P_1 - показатель состояния источников техногенной ЧС;

P_2 - показатель времени реагирования;

P_3 - показатель достаточности сил и средств;

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ — весовые коэффициенты, отражающие относительную важность каждого показателя, при этом $\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 = 1$.

Каждый частный показатель P_k (где $k=1,2,3$) формируется на основе набора исходных параметров $y_{k1}, y_{k2}, \dots, y_{kn}$, характеризующих соответствующий аспект системы безопасности. Для приведения этих параметров, имеющих различные физические размерности, к единой безразмерной шкале применяется функция желательности Харрингтона.

Функция желательности Харрингтона для одностороннего ограничения имеет вид (2):

$$d(y) = \exp(-\exp(-y)) \quad (2)$$

где, y — кодированное (нормированное) значение исходного параметра.

Кодирование необходимо по причине того, что исходные параметры имеют разные физические размерности (градусы, паскалы, минуты, штуки и т.д.) и разные диапазоны допустимых значений. Чтобы объединить их в один показатель, их нужно привести к единой шкале.

Кодирование осуществляется линейным преобразованием (3):

$$a_0 + a_1 \times x \quad (3)$$

где, x — исходное значение параметра, а коэффициенты a_0 и a_1 определяются из системы уравнений, связывающей граничные значения параметра с соответствующими значениями желательности (например, $d=0,2$ для критического уровня и $d=0,8$ для уровня «хорошо»).

Для двустороннего ограничения (когда оптимальное значение параметра лежит внутри интервала) используется модифицированная функция (4):

$$d(y') = \exp(-|y'| \ln) \quad (4)$$

где, y' — кодированное значение, вычисляемое по формуле (5):

$$y' = \frac{2 \times y - (y_{\max} + y_{\min})}{y_{\max} - y_{\min}} \quad (5)$$

показатель степени n определяется из условия $d(y')=0,7$ при заданном y' .

После вычисления частных желательностей d_{ki} для каждого параметра i в группе k , рассчитывается обобщенный показатель для каждой группы. В данной работе предлагается использовать среднее квадратическое значение, как более устойчивое к экстремальным значениям и позволяющее учитывать все диапазоны шкалы (6):

$$P_k = \sqrt{\frac{1}{n_k} \sum_{i=1}^{n_k} d_{ki}^2} \quad (6)$$

Таким образом, итоговый показатель защищенности P_z принимает вид (7):

$$P_z = \alpha_1 \times \sqrt{\frac{1}{n_1} \sum_{i=1}^{n_1} d_{1i}^2} + \alpha_2 \times \sqrt{\frac{1}{n_2} \sum_{i=1}^{n_2} d_{2i}^2} + \alpha_3 \times \sqrt{\frac{1}{n_3} \sum_{i=1}^{n_3} d_{3i}^2} \quad (6)$$

Для решения задачи оптимального распределения ресурсов при ограниченном бюджете используем подход основанный на множестве Парето. Пусть имеется m возможных мероприятий, каждое из которых характеризуется двумя векторами:

- вектором увеличения желательности $D=(D_1, D_2, \dots, D_m)$
- вектором стоимости $C=(C_1, C_2, \dots, C_m)$.

Задача состоит в выборе подмножества мероприятий, максимизирующего общий прирост желательности $\sum D_i$ при условии, что суммарная стоимость $\sum C_i$ не превышает заданного бюджета B .

Множество Парето включает в себя те решения, которые не могут быть улучшены по одному критерию (желательности) без ухудшения по-другому (стоимости). Формально, решение i принадлежит множеству Парето, если не существует другого решения j , для которого одновременно выполняются условия $D_j \geq D_i$ и $C_j \leq C_i$, причем хотя бы одно из неравенств — строгое.

Необходимо отметить, что использование множества Парето — это неметод поиска одного ответа, а инструмент для поддержки принятия решения. Он помогает увидеть все эффективные компромиссы между стоимостью и полезностью, отбросить неэффективные варианты и дать лицу, принимающему решение (ЛПР) возможность сделать осознанный выбор на основе своих приоритетов.

Предложенная трехкомпонентная структура показателя P_z (состояние источников угроз, время реагирования, достаточность ресурсов) адекватно отражает ключевые аспекты системы безопасности. Использование функции желательности Харрингтона для нормализации разнородных параметров (например, концентрация вредных веществ, расстояние до ближайшего подразделения, количество единиц техники) позволяет преодолеть одну из главных проблем в данной области — невозможность прямого сравнения и агрегирования данных, измеряемых в разных физических величинах. Получаемая безразмерная шкала желательности от 0 до 1 предоставляет единый, интуитивно понятный язык для оценки состояния самых разных элементов системы.

Анализ показал, что в условиях ограниченного бюджета B всегда существует набор решений, которые нельзя улучшить по одному критерию (например, увеличить общую желательность $\sum D_i$) без ухудшения по другому критерию (увеличения суммарной стоимости $\sum C_i$). Множество Парето не дает единого однозначного ответа, что является его сильной, а не слабой стороной. Оно сужает пространство выбора, отбрасывая заведомо неэффективные варианты, и предоставляет лицу, принимающему решение (ЛПР), обозримый набор оптимальных компромиссов. Это позволяет ЛПР сделать осознанный выбор, основываясь не только на сухих расчетах, но и на стратегических приоритетах, разнообразных факторах, которые невозможно формализовать в рамках модели.

Следует подчеркнуть, что предложенная модель не является статичной. Она обладает высокой степенью адаптивности. Весовые коэффициенты $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ могут динамически изменяться в зависимости от текущей угрозы. Например, в период повышенной опасности риска возникновения химических аварий акцент может смещаться в сторону P_1 (состояние источников), а в период паводков в сторону P_2 (время реагирования). Кроме того, сама структура модели позволяет легко добавлять новые группы показателей или изменять состав существующих, что делает ее универсальным инструментом для различных типов территорий и угроз.

Таким образом, проведенный анализ и ранее проведенные исследования [7-11] подтверждают, что разработанная модель и алгоритмы являются теоретически обоснованными и практически применимыми инструментами. Они позволяют перейти от субъективной, часто запаздывающей оценки ситуации к объективному, количественному и превентивному управлению безопасностью, что полностью соответствует современной парадигме Safety II.

Научная новизна представленного подхода заключается в создании методики оценки защищенности объекта от чрезвычайных ситуаций техногенного характера с использованием аддитивного обобщенного показателя на основе функции желательности Харрингтона. Практическая значимость состоит в том, что предложенные подходы позволяют повысить обоснованность управленческих решений в системе РСЧС, обеспечить рациональное распределение ограниченных ресурсов и осуществить переход от реактивного к превентивному управлению в соответствии с концепцией Safety II. Применение данной модели и алгоритмов дает возможность органам управления получать объективную экспертную информацию о факторах, влияющих на эффективность системы безопасности, и принимать оптимальные решения для ее совершенствования.

Дальнейшие перспективы исследования связаны с развитием и практической реализацией предложенной модели, интеграции с системами искусственного интеллекта и машинного обучения. Перспективным направлением является использование нейронных сетей для автоматической корректировки весовых коэффициентов модели на основе анализа больших массивов исторических данных о ЧС и эффективности принятых мер. Это позволит модели адаптироваться к изменяющимся условиям, повышая точность прогнозов и обоснованность решений. В перспективе модель может быть дополнена элементами динамического моделирования, позволяющими не только оценивать текущее состояние защищенности, но и прогнозировать его изменение во времени под влиянием различных факторов (например, износа инфраструктуры, изменения климата, роста населения).

Список источников

1. Федеральный закон от 28.12.2010 № 390-ФЗ (ред. от 10.07.2023) «О безопасности». – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_108546/.
2. Федеральный закон от 21.12.1994 N 68-ФЗ (ред. от 08.08.2024) "О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера" (с изм. и доп., вступ. в силу с 26.11.2024). – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_5295/.
3. Указ Президента РФ от 02.07.2021 № 400 [Электронный ресурс]: «О Стратегии национальной безопасности Российской Федерации». – Режим доступа: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_389271/.
4. Пичкалев А.В. Обобщенная функция желательности Харрингтона для сравнительного анализа технических средств // Исследования наукограда. – 2012. – № 1 (1). – С. 25-28.
5. Любушин Н.П., Брикач Г.Е. Использование обобщенной функции желательности Харрингтона в многопараметрических экономических задачах // Экономический анализ: теория и практика. – 2014. – № 18 (370). – С. 2-10.
6. Шаяхметов, Р.Г. Использование функции желательности Харрингтона для оценки эффективности перемешивания субстрата в метантенке // Интеллектуальные системы в производстве. – 2014. – № 1 (23). – С. 144-149.
7. Применение метода функции желательности для решения задач управления рисками техногенных чрезвычайных ситуаций / Калач А.В., Батуро А.Н., Мартинович Н.В. [и др.] // Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики: Сборник трудов Международной научной конференции, Воронеж, 13–15 декабря 2021 года. – Воронеж: Общество с ограниченной ответственностью "Вэлборн", 2022. – С. 1755-1760.
8. Калач А.В., Мартинович Н.В., Черных А.К. Современные аспекты управления системой территориальной комплексной безопасности // Научно-аналитический журнал

"Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России". – 2022. – № 1. – С. 84-94.

9. Назаров А.А., Мартинович Н.В., Калач А.В. Обобщенный показатель оценки эффективности функционирования комплексной системы мониторинга безопасности жизнедеятельности населения // Комплексные проблемы техносферной безопасности. Научный и практический подходы к развитию и реализации технологий безопасности: Сборник статей по материалам XVII Международной научно-практической конференции, Воронеж, 26 марта 2021 года. – Воронеж: Воронежский государственный технический университет, 2021. – С. 35-40.

10. Назаров А.А., Мартинович Н.В., Мельник А.А. Определение комплексного показателя защищенности на основе исследования системы защиты населения и территории от техногенных рисков // Проблемы управления рисками в техносфере. – 2020. – № 2 (54). – С. 94-103.

11. Калач А.В., Мартинович Н.В. Управление рисками техногенных чрезвычайных ситуаций с применением функции желательности // Технологии техносферной безопасности. – 2023. – № 2(100). – С. 25-36. – DOI 10.25257/TTS.2023.2.100.25-36.

References

1. Federal Law No. 390-FZ dated 12/28/2010 (as amended on 07.10.2023) "On Security". – [Electronic resource]. – Access mode: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_108546/.

2. Federal Law No. 68-FZ of 12.21.1994 (as amended on 08.08.2024) "On the Protection of the Population and Territories from Natural and Man-made Emergencies" (as amended and supplemented, intro. effective from 11.26.2024). – [Electronic resource]. – Access mode: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_5295/.

3. Decree of the President of the Russian Federation dated 07.02.2021 No. 400 [Electronic resource]: "On the National Security Strategy of the Russian Federation". – Access mode: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_389271/.

4. Pichkalev A.V. Generalized Harrington desirability function for comparative analysis of technical means // Naukograd Research. – 2012. – № 1 (1). – Pp. 25-28.

5. Lyubushin N.P., Brikach G.E. Using the generalized Harrington desirability function in multiparametric economic problems // Economic analysis: theory and practice. – 2014. – № 18 (370). – Pp. 2-10.

6. Shayakhmetov, R.G. Using the Harrington desirability function to evaluate the effectiveness of substrate mixing in a methane tank // Intelligent systems in production. – 2014. – № 1 (23). – Pp. 144-149.

7. Kalach A.V., Baturo A.N., Martinovich N.V. Application of the desirability function method to solve the risk management problems of man-made emergencies [et al.] // Actual problems of applied mathematics, computer science and mechanics: Proceedings of the International Scientific Conference, Voronezh, December 13-15, 2021. Voronezh: Valborn Limited Liability Company, 2022, pp. 1755-1760.

8. Kalach A.V., Martinovich N.V., Chernykh A.K. Modern aspects of management of the territorial integrated security system // Scientific and analytical journal "Bulletin of the St. Petersburg University of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia". – 2022. – No. 1. – pp. 84-94.

9. Nazarov A.A., Martinovich N.V., Kalach A.V. Generalized indicator for evaluating the effectiveness of an integrated system for monitoring the safety of the population // Complex problems of technosphere safety. Scientific and practical approaches to the development and implementation of security technologies: A collection of articles based on the materials of the XVII International Scientific and Practical Conference, Voronezh, March 26, 2021. Voronezh: Voronezh State Technical University, 2021, pp. 35-40.

10. Nazarov A.A., Martinovich N.V., Melnik A.A. Determination of a comprehensive indicator of security based on a study of the system of protection of the population and territory from man-made risks // Problems of risk management in the technosphere. – 2020. – № 2 (54). – Pp. 94-103.

11. Kalach A.V., Martinovich N.V. Risk management of man-made emergencies using the desirability function // Technosphere safety technologies. – 2023. – № 2(100). – Pp. 25-36. – DOI 10.25257/TTS.2023.2.100.25-36.

Информация об авторах

Н.В. Мартинович – кандидат технических наук

Information about the author

N.V. Martinovich – Ph.D. of Engineering Sciences

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 10.08.2025, одобрена после рецензирования 15.09.2025, принята к публикации 16.09.2025.

The article was submitted 10.08.2025, approved after reviewing 15.09.2025, accepted for publication 16.09.2025.