

УДК 614.8:5

chistanal@rambler.ru

**УПРАВЛЕНИЕ ПРОФИЛАКТИЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬЮ
НА ОСНОВЕ МАТРИЧНОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ РИСКОВ****MANAGEMENT OF PREVENTIVE ACTIVITIES
AT RISK-BASED REPRESENTATION**

*Прус Ю. В., доктор физико-математических наук, профессор,
РГУ нефти и газа (НИУ) им. И. М. Губкина, Москва,
Чистякова А. А., Всероссийский ордена «Знак Почета»
научно-исследовательский институт
противопожарной обороны МЧС России, Балашиха,
Россинская К. Г., кандидат технических наук,
Академия Государственной противопожарной
службы МЧС России, Москва*

*Prus Yu. V., RSU of Oil and Gas (NRU) I. M. Gubkin, Moscow,
Chistyakova A. A., All-Russian Research Institute
for Fire Protection of EMERCOM of Russia, Balashikha,
Rossinskaya K. G., Academy of the State Fire Service
of the EMERCOM of Russia, Moscow*

Описывается история развития математического аппарата теории техногенных, природных и пожарных рисков, обосновывается целесообразность перехода к векторно-матричной форме представления рисков. Предлагается дискретно-событийная имитационная модель совокупности рисков в социотехнической системе, описывающая последовательность событий, приводящих к возникновению и реализации опасностей. Авторами рассматривается вариант адаптации предлагаемой модели к управлению профилактической работой по обеспечению пожарной безопасности в жилом секторе.

Ключевые слова: техногенный риск, природный риск, пожарный риск, социотехническая система, риск-ориентированный подход, случайный процесс, система обеспечения безопасности.

The history of the development of the mathematical apparatus of the theory of technogenic, natural and fire risks is described, the feasibility of the transition to a vector-matrix form of risk representation is justified. A discrete-event simulation model of the totality of risks in the socio-technical system is proposed, which describes the sequence of events leading to the emergence and implementation of dangers. The authors are considering the option of adapting the proposed model to the management of preventive work to ensure fire safety in the residential sector.

Keywords: technological risk, natural risk, fire risk, socio-technical system, risk-oriented approach, random process, security system. *Keywords:* technological risk, natural risk, fire risk, socio-technical system, risk-oriented approach, random process, security system.

Развитие общественных институтов и социальных организаций, формирование социально-информационной инфраструктуры создают условия, способ-

ствующие значительному снижению рисков гибели населения при реализации соответствующих федеральных и региональных целевых программ.

Однако, несмотря на проводимые профилактические мероприятия, основные социально-экономические потери от пожаров происходят в жилом секторе. Так, в Российской Федерации от пожаров в 2014 году погибло – 10253 человека, травмировано – 11089 человек (из них в жилом секторе погибло 9339 человек) в 2015 году погибло – 9419 человек, травмировано – 10977 человек (из них в жилом секторе 8515 человек), в 2016 году погибло – 8760 человек, травмировано – 9909 человек (из них в жилом секторе 7982 человека), в 2017 году погибло – 7824 человека, травмировано – 9361 человек (из них в жилом секторе 7211 человек) [5].

Многолетние исследования международной пожарной статистики, проводимые Н. Н. Брушлинским, С. В. Соколовым, Е. М. Алехиным [1], доказали эффективность подхода к представлению индивидуального риска как комбинации рисков, обусловленных вероятностью реализации опасности, а также условной вероятностью наступления определенного вида последствий.

К пожарным рискам относятся:

риск R_1 для человека столкнуться с пожаром (его опасными факторами) за единицу времени. Удобно этот риск измерять в единицах $\left[\frac{\text{пожар}}{\text{чел.} \cdot \text{год}} \right]$;

риск R_2 для человека погибнуть при пожаре (оказаться его жертвой). Здесь единица измерения имеет вид $\left[\frac{\text{жертва}}{\text{пожар}} \right]$;

риск R_3 для человека погибнуть от пожара за единицу времени $\left[\frac{\text{жертва}}{\text{чел.} \cdot \text{год}} \right]$.

Очевидно, что эти риски связаны соотношением

$$R_3 = R_1 \cdot R_2. \quad (1)$$

Риск R_1 характеризует возможность реализации пожарной опасности, а риски R_2 и R_3 – некоторые последствия этой реализации.

В качестве пожарных рисков, характеризующих материальный ущерб от пожаров, используются следующие риски:

риск R_4 уничтожения строений в результате пожара, $\left[\frac{\text{уничт. строение}}{\text{пожар}} \right]$;

риск R_5 прямого материального ущерба от пожара, $\left[\frac{\text{денежная единица}}{\text{пожар}} \right]$.

Поиск эффективных способов моделирования, мониторинга и управления рисками в социотехнических системах требует развития современных методов учета и анализа многомерных статистических данных. Для полноты описания техногенных, природных и пожарных рисков необходимо использование новых форм представления их показателей [1–3].

При имитационном моделировании сложной структуры совокупности рисков в социотехнических системах традиционно применяются методы дискретно-событийного моделирования, основанные на рассмотрении хронологической последовательности событий, приводящих к возникновению и реализации опасностей. В [1, 2] предложено разбиение факторов риска на две группы, одна из которых связана с возникновением опасного явления и подверженностью его неблагоприятному воздействию, а другая – с уязвимостью подвергающихся опасности объектов, при этом ожидаемые последствия реализации опасности определяются некоторым мультипликатором указанных групп факторов.

На основе этого подхода авторами [1, 2] предложена применяемая в настоящее время методика сравнительного анализа статистических данных о пожарах, использующая при оценке уровня и определении основных причин пожарной опасности соответствующие показатели, получившие название «интегральные пожарные риски». В соответствии с [1] для оценки вероятности подвергнуться воздействию опасных факторов пожара вводится риск R_2 , а при разграничении по

степени тяжести последствий пожаров в указанной методике используются несколько интегральных пожарных рисков, такие как риск гибели, риски различных степеней травмирования и пр.

Дальнейшая детализация структуры рисков требует применения более сложного математического аппарата для разделения объектов защиты на отдельные группы, отличающихся по степени уязвимости, а также по подверженности воздействию опасных факторов. При использовании скалярного представления риска невозможно построить модель, позволяющую оперировать не только с последовательностью событий, обуславливающих возникновение факторов риска, но и с результатами их воздействия.

Перспективным направлением развития этого подхода представляется детализация объектов защиты по группам риска и видам последствий на основе векторно-матричного представления рисков [3]. Наиболее полное компьютерное имитационное моделирование динамики рисков в реальных социотехнических системах возможно на основе предложенного в [3] подхода к построению динамической модели социотехнической системы, заключающегося в учете текущих состояний и взаимного влияния входящих в рассматриваемую систему объектов, на основе векторно-матричного представления основных факторов пожарных и техногенных рисков.

В соответствии [3] социотехническая система представляется ориентированным графом:

$$O = \{O, V\}, \quad (2)$$

множество вершин которого соответствует находящимся на некоторой территории объектам:

$$O = \{o_i\}, \quad i = \{1, \dots, N\}, \quad (3)$$

а множество дуг:

$$V = \{v_{ij}\}, \quad v_{ij} = (o_i, o_j), \quad (4)$$

отражает попарное взаимодействие между указанными объектами.

Текущее состояние каждого объекта описывается вектором:

$$\vec{p}_j = (p_1^j, \dots, p_i^j, \dots, p_g^j), \quad (5)$$

компоненты которого p_i^j – вероятности пребывания j -го объекта в i -м состоянии [4].

Имитационное моделирование основано на следующих предположениях:

на каждом из объектов – «источников опасности» o_i в течение определенного временного интервала Δt возможно возникновение опасных событий вида k с вероятностью P_i^k ;

воздействие указанного опасного события на объект «защиты» o_j приводит к изменению его состояния и к возникновению «ущерба» как ряда возможных последствий:

текущее состояние объектов – «источников опасности» o_i , а также объектов защиты может влиять как на возникновение опасных событий, так и на их возможные последствия.

В случае реализации угрозы вида k , обусловленной опасным событием на объекте o_i , моделирование ущерба на объекте o_j требует представления рисков в векторной форме, что возможно при введении «вектора последствий», отражающего негативные последствия для объекта o_j защиты.

Необходимо ввести «вектор возможных последствий», характеризующий возможные негативные последствия, а также «вектор ожидаемых последствий», характеризующий ожидаемые в течение определенного времени негативные последствия.

Для определения компонентов вектора возможных последствий, обусловленных наступлением опасного со-

бытия, вектор текущего состояния объекта защиты связывается с условными вероятностями различных последствий реализации угрозы вида k с помощью оператора:

$$\vec{v}_i = \vec{p}_j^0 \mathbf{S}_j^{k_i}. \quad (6)$$

Компоненты s_{lm}^k матрицы оператора $\mathbf{S}_j^{k_i}$ характеризуют уязвимость объекта o_j к негативному воздействию k и представляют условные вероятности наступления последствий $m = \{1, \dots, M\}$ в зависимости от исходного состояния объекта защиты $l = \{1, \dots, L\}$ [4]:

$$\mathbf{S}_j^{k_i} = \begin{pmatrix} s_{11}^k & \dots & s_{1M}^k \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ s_{L1}^k & \dots & s_{LM}^k \end{pmatrix}. \quad (7)$$

$$\vec{r}_j = (r_1^j, \dots, r_m^j, \dots, r_M^j) = (v_1^j P_i^k, \dots, v_m^j P_i^k, \dots, v_M^j P_i^k). \quad (9)$$

Компоненты вектора ожидаемых последствий (8) можно рассматривать как композицию двух событий:

первое, наступающее с вероятностью P_i^k , событие «объект o_j подвергается опасности вида k при наступлении соответствующего опасного события на объекте o_i »;

второе, характеризуется условной вероятностью v_m^j , событие «наступление негативного последствия s для объекта o_j вследствие реализации угрозы» [4, 5].

Это позволяет трактовать компоненты вектора вероятных последствий как показатели ущерба, а сам вектор вероятных последствий применять в качестве характеристики совокупности однородных рисков.

Выбор оптимальных решений при обеспечении противопожарной и противоаварийной защиты может быть основан на изучении возможности изменения степеней уязвимости, характеризуемыми соответствующими значениями компонент матрицы оператора (7) с учетом текущего состояния объектов защиты [5].

«Вектор ожидаемых последствий», характеризующий степень риска для объекта защиты, можно представить следующим образом:

$$\vec{r}_j = \vec{v}_j P_i^k. \quad (8)$$

Компоненты вектора ожидаемых последствий представляют собой произведение отдельных возможных негативных для объекта защиты последствий на вероятность наступления в течение определенного временного интервала Δt соответствующего опасного события:

Вместе с тем, существующие способы оценки индивидуальных рисков на основе анализа имеющихся статистических данных не позволяют в полной мере реализовать риск-ориентированный подход при управлении профилактической деятельностью. Для определения совокупности направленных на максимальное предотвращение социально-экономических потерь мероприятий необходимо создание соответствующего инструментария, позволяющего выявить статистические закономерности для распределения объектов генеральной совокупности по группам риска, и детализации ущерба по степени тяжести.

Для построения векторно-матричной модели, позволяющей детализировать аспекты рисков, связанные с комбинацией случайных событий, с одной стороны, а также сопровождающим эти события обстоятельствами и воздействиями на объект защиты, с другой, актуализируем основные положения и введем ряд дополнительных элементов модели.

Совокупность объектов целесообразно разбить на n групп (кластеров) и

представить в виде вектора распределения объектов защиты по группам риска:

$$\vec{C} = (c_1, \dots, c_i, \dots, c_n) , \quad (10)$$

при этом компоненты c_i вектора распределения объектов определяются количеством представителей в соответствующем кластере. В качестве критериев, определяющих разбиение совокупности объектов по кластерам, предлагается использовать статистические характеристики показателей риска.

В случае нормировки компонентов (нахождение доли в общем распределении)

$$c_i / \sum_{i=1}^n c_i \quad (11)$$

$$\mathbf{V} = \begin{pmatrix} v_1 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \vdots & v_i & \vdots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & 0 & \dots & v_n \end{pmatrix}, \quad (12)$$

Тогда распределение опасных событий по отдельным кластерам можно представить вектором \vec{F} (от английского frequency – частота), компонентами которого являются частотные характеристики соответствующих кластеров. Указанный

данный вектор является аналогом вектора состояния системы.

При обработке статистических данных необходимо наряду с оценкой уязвимости объектов защиты предусмотреть возможность проведения оценки их подверженности опасному воздействию.

Составляющую риска, отражающую подверженность объектов защиты опасному воздействию, можно представить диагональной матрицей \mathbf{V} (виктимность от лат. victima – жертва), компоненты которой v_i соответствуют отдельным кластерам c_i и определяются вероятностными характеристиками, подвергнутым опасностям определенного вида.

вектор может быть найден как произведение вектора \vec{C} распределения объектов по определенным группам риска на матрицу виктимности \mathbf{V} :

$$\vec{F} = \vec{C}\mathbf{V} = (c_1, \dots, c_i, \dots, c_n) \begin{pmatrix} v_1 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \vdots & v_i & \vdots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & 0 & \dots & v_n \end{pmatrix} = (f_1, \dots, f_i, \dots, f_n), \quad (13)$$

Составляющую риска, отражающую уязвимость объектов защиты, представим прямоугольной матрицей \mathbf{S} (от английского sensitivity – чувствительность), компоненты которой характеризуют уязвимости отдельных представителей кластеров c_i и определяются условными вероятностями s_{ij} наступления по-

следствий вида j для объектов защиты из c_i .

В соответствии с [3] введем «вектор ожидаемых потерь», компоненты которого характеризуют составляющие ожидаемого ущерба по видам последствий для совокупности объектов защиты:

$$\vec{D} = (d_1 \dots d_m) = \vec{C} \mathbf{V} \mathbf{S} = \vec{F} \mathbf{S} =$$

$$= (f_1, \dots, f_i, \dots, f_n) \begin{pmatrix} s_{11} & \dots & s_{1n} \\ \dots & \dots & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \dots & \dots & \dots \\ s_{n1} & \dots & s_{nn} \end{pmatrix}. \quad (14)$$

Компоненты вектора \vec{D} представляют собой произведение частотных характеристик распределения опасных событий по отдельным кластерам совокупности объектов защиты на условные вероятности наступления определенных видов последствий.

Отдельные составляющие ожидаемого ущерба (14) обусловлены композицией наступления отдельных негативных для совокупности объектов защиты событий:

первое, имеющее вероятность v_i , событие «объект из кластера c_i подвергается опасности»;

второе, с условной вероятностью s_{ij} , событие «возможность наступления

негативного последствия d_j для объекта из кластера c_i вследствие реализации рассматриваемой угрозы» [4].

Каждая компонента вектора ожидаемых потерь представляет собой сумму ожидаемых потерь вида j по всем кластерам:

$$d_j = \sum_{i=1}^n c_i v_i s_{ij}. \quad (15)$$

Индивидуальный риск последствий вида j , усредненный по всем кластерам, определяется отношением соответствующей компоненты вектора ожидаемых потерь к мощности множества (совокупности) объектов

$$\{\sum_{i=1}^n c_i\}: R^j = d_j = \frac{d_j}{\sum_{i=1}^n c_i} = \frac{\sum_{i=1}^n c_i v_i s_{ij}}{\sum_{i=1}^n c_i}. \quad (16)$$

Индивидуальный риск последствия вида j характеризуется отношением вклада отдельного кластера в d_j к его мощности $\{c_i\}$ для представителя выбранного кластера:

$$R_i^j = v_i s_{ij}. \quad (17)$$

Объединяя вышеуказанные риски, в соответствии с подходом [3], введем вектор индивидуального риска по кластерам

$$\vec{R}_j = (R_i^1, \dots, R_i^j, \dots, R_i^m). \quad (18)$$

А также общий для совокупности объектов индивидуальный риск:

$$\vec{R} = (R^1, \dots, R^j, \dots, R^m). \quad (19)$$

Планируемая деятельность, направленная на снижение компонент рисков, как на представителей отдельных кластеров \vec{R}^1, \vec{R} общего риска.

Предлагаемая модификация векторно-матричной модели рисков достаточно адекватно описывает относящиеся к определенным группам объектов защиты цепочки взаимосвязанных событий, а также результат каждой возможной комбинации случайных событий. Элементы векторно-матричной модели и связи между ними отражают такие свойства объектов защиты, как подверженность определенного вида опасностям и их уязвимость.

Авторами предлагается следующий вариант адаптации

предлагаемой модели к управлению профилактической работы по обеспечению пожарной безопасности в жилом секторе. Компоненты основных элементов модели основываются на статистических характеристиках показателей риска и экспертных оценках.

Определим компоненты вектора ожидаемого ущерба, отражающие следующее распределение по видам последствий для объектов защиты (людей):

- d_1 – гибель;
- d_2 – тяжелые травмы;
- d_3 – травмы средней тяжести;
- d_4 – легкие травмы.

Определим компоненты вектора распределения объектов защиты по группам риска. С учетом возрастной классификации, трудоспособности, различий по половым признакам, места проживания, физических параметров предложено следующее разбиение объекта по уязвимости:

- c_1 – дети и подростки до 18 лет;
- c_2 – трудоспособное население (мужчины 16–64 лет, женщины 16–59 года);
- c_3 – лица старше трудоспособного возраста (мужчины 65 лет и старше, женщины 60 лет и старше);
- c_4 – инвалиды и лица с ограниченными возможностями.

Каждой из перечисленных групп соответствует одна из четырех групп риска.

Проведение оценки подверженности воздействиям опасных факторов пожара для каждой группы риска позволяет определить компоненты v_i матрицы виктимности (12). При этом у представителей отдельных групп риска существует вероятность наступления различных пожароопасных событий, на которую оказывают влияние их психофизиологические и возрастные особенности.

Определение вероятности различных видов исхода при условии, что представитель определенной группы риска подвергся воздействию опасных факторов пожара, т. е. компонент s_{ij} матрицы (7) основывается на анализе данных о пожарах и их последствиях из [6].

Такая модификация векторно-матричной модели позволяет ввести новые показатели эффективности отдельных профилактических мероприятий, необходимых для определения единых подходов и требований к планированию профилактической деятельности в целом. Детализация объектов защиты, в частности распределение населения по группам риска, позволяет определить комплекс профилактических мероприятий по повышению культуры безопасности, сделать профилактические мероприятия адресными, учитывающими специфику групп риска, а также оптимизировать затраты на оснащение жилого сектора средствами противопожарной защиты.

Литература

1. Брушлинский Н. Н., Соколов С. В., Клепко Е. А. Основы теории пожарных рисков и ее приложения. М., 2012. 192 с.
2. Брушлинский Н. Н., Соколов С. В. Современные проблемы обеспечения пожарной безопасности в России. М., 2014. 178 с.
3. Прус Ю. В. и др. Моделирование структуры и динамики техногенных и пожарных рисков в социотехнических системах // Технологии техносферной безопасности. 2014. № 4. С. 16.
4. Прус Ю. В. Структура и тензорные характеристики техногенных рисков // Проблемы обеспечения безопасности при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. 2014. № 1 (3). 264 с.
5. Присяжнюк Н. Л. и др. Социотехнические системы. Проблемы рисков безопасности // Вестник Санкт Петербургского университета ГПС МЧС России. 2017. № 2.
6. Пожары и пожарная безопасность в 2017 г.: статистический сборник. М., 2018. 125 с.
7. Прус Ю. В., Присяжнюк Н. Л., Чистякова А. А. Управление техногенными, природными и пожарными рисками на основе динамической стохастической модели угроз в социотехнической системе //

XXIX Международная научно-практическая конференция, посвященная 80-летию ФГБУ ВНИИПО МЧС России. М., 2017. С. 193–196.

8. Словарь-справочник по социальной работе / под ред. Е. И. Холостовой. М., 1997. 424 с.

References

1. Brushlinskij N. N., Sokolov S. V., Klepko E. A. Osnovy teorii pozharnyh riskov i ee prilozheniya. М., 2012. 192 p.

2. Brushlinskij N. N., Sokolov S.V. Sovremennye problemy obespecheniya po-zharnoj bezopasnosti v Rossii. М., 2014. 178 p.

3. Prus YU. et al. Modelirovanie struktury i dinamiki tekhnogennyh i pozharnyh riskov v sociotekhnicheskikh sistemah // Tekhnologii tekhnosfernoj bezopasnosti. 2014. № 4. 16 p.

4. Prus YU. V. Struktura i tenzornye harakteristiki tekhnogennyh riskov // Problemy obespecheniya bezopasnosti pri likvidacii posledstvij chrezvychajnyh situacij. Voronezhskij institut GPS MCHS Rossii. 2014. № 1 (3). 264 p.

5. Prisyazhnyuk N. L et al. Sociotekhnicheskie sistemy. Problemy riskov bezopasnosti // Vestnik Sankt Peterburgskogo universiteta GPS MCHS Rossii. 2017. № 2. 121 p.

6. Pozhary i pozharnaya bezopasnost' v 2017 g.: statisticheskij sbornik. М., 2018. 125 p.

7. Prus YU. V. Prisyazhnyuk N. L., CHistyakova A. A. Upravlenie tekhnogenymi, pri-rodnyimi i pozharnymi riskami na osnove dinamicheskoy stohasticheskoy modeli ugroz v sociotekhnicheskoy sisteme //XXIX Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferen-ciya, posvyashchennaya 80-letyu FGBU VNIPO MCHS Rossii. М., 2017. P. 193–196.

8. Slovar'-spravochnik po social'noj rabote / pod red. E. I. Holostovoj. М., 1997. 424 p.