

УДК 004.896

Система поддержки принятия решений о спасении пораженных в результате аварий на опасных производственных объектах*

А.И. МОТИЕНКО¹, О.О. БАСОВ², М.М. БИЗИН³

¹ 199178, РФ, г. Санкт-Петербург, 14 линия В.О., 39, Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук, Санкт-Петербург. E-mail: anna.gunchenko@gmail.com

² 302034, РФ, г. Орел, ул. Приборостроительная, 35 Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации, кандидат технических наук. E-mail: oobasov@mail.ru

³ 199178, РФ, г. Санкт-Петербург, 14-я линия В.О., 39, Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук, Санкт-Петербург. E-mail: bizin@iias.spb.su

Использование робототехнических средств (РТС) в ходе аварийно-спасательных работ на опасных производственных объектах позволяет минимизировать степень риска для пожарных, спасательных и прочих формирований. Применение широкой номенклатуры сенсорных элементов в составе РТС позволяет расширить перечень контролируемых параметров и сформировать управляющие воздействия с использованием прогнозирующих и упреждающих возможностей, базирующихся на методах и технологиях комплексного моделирования. Для снижения сложности общей задачи исследования принята декомпозиция способа спасения пораженных на отдельные действия, а времени спасения – на отдельные составляющие, на основе чего формализованы и поставлены частные задачи повышения эффективности спасения. Решения соответствующих частных задач могут быть получены на основе моделирования процессов выявления травм у пораженных, их сортировки и выбора оптимальной позы для транспортировки, а также модификации решения по планированию траекторий движения РТС, обеспечивающего транспортировку пораженного с учетом выбранного положения. В работе также представлен комплекс моделей поддержки принятия решений о способе спасения пораженных, для формального описания которого обоснован и применен аппарат байесовских сетей доверия. Для выработки решения на проведение эвакуации или дальнейший поиск других пораженных предложена модель эффективности процесса спасения пораженных в результате аварий на опасных производственных объектах. В статье представлены методика оптимизации структуры робототехнического средства спасения пораженных и методика планирования траектории движения робототехнических средств транспортировки пораженных, методика выбора способа спасения пораженного в результате аварии на опасном производственном объекте. Разработанные методики поддержки принятия решений о способе спасения пораженных с использованием робототехнических средств позволяют минимизировать составляющие времени обнаружения и спасения пораженных. Также в статье представлены результаты экспери-

* Статья получена 24 марта 2017 г.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 16-08-00696-а).

ментальной проверки разработанного научно-методического инструментария поддержки принятия решений о способе спасения пораженных.

Ключевые слова: транспортировка пораженных, аварийно-спасательные работы, робототехническая система, байесовская сеть доверия, комплексное моделирование, показатели эффективности, система поддержка принятия решений

DOI: 10.17212/1814-1196-2017-2-65-82

ВВЕДЕНИЕ

На территории нашей страны функционирует более 45 тыс. опасных производственных объектов (ОПО), представляющих потенциальную угрозу в случае возникновения на них аварий и катастроф, сопровождающихся выбросами химически опасных и радиоактивных веществ. Тяжесть последствий усугубляется тем, что на радиационно-дестабилизированных территориях проживает 10 млн человек, а на территориях возможного химического заражения – 60 млн человек. Независимо от конкретного источника такой технологической чрезвычайной ситуации (ЧС) аварии на ОПО имеют практически одни и те же факторы негативного влияния на человека: термическое, барическое, токсическое, механическое, электромагнитное, акустическое и радиационное воздействие.

На спасение пораженных (заболевших, травмированных или раненых в результате поражающего воздействия источника ЧС (ГОСТ Р 22.0.02-94)) направлены аварийно-спасательные работы. Последние характеризуются наличием факторов, угрожающих жизни и здоровью людей, проводящих эти работы (спасателей, пожарных и др.), и тем самым требуют специальной подготовки, экипировки и оснащения. Свести к минимуму степень риска для спасателей при проведении аварийно-спасательных работ на ОПО позволяет использование так называемых безлюдных технологий – робототехнических средств (РТС).

Современные достижения в области робототехники нашли достаточно широкое применение при решении задач автоматизации в различных областях: от социально-бытовой до военно-технической как в штатных ситуациях, так и в экстремальных. Однако в настоящее время объективно существует противоречие между необходимостью в применении РТС при проведении аварийно-спасательных работ и отсутствием решений в области обеспечения возможности спасения пораженных в результате аварий на ОПО с использованием таких комплексов и средств. Его разрешение лежит в области модернизации существующих РТС путем совершенствования модельно-алгоритмического и методического обеспечения поддержки принятия решений о способе спасения пораженных. Указанный подход представляет собой сложную научно-техническую задачу и обуславливает актуальность темы исследования.

1. ПОДХОДЫ К ПОВЫШЕНИЮ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА СПАСЕНИЯ ПОРАЖЕННЫХ

В соответствии с действующими нормативными документами при ликвидации последствий ЧС создается временный штаб и составляется предварительный план мероприятий (рис. 1) [1].

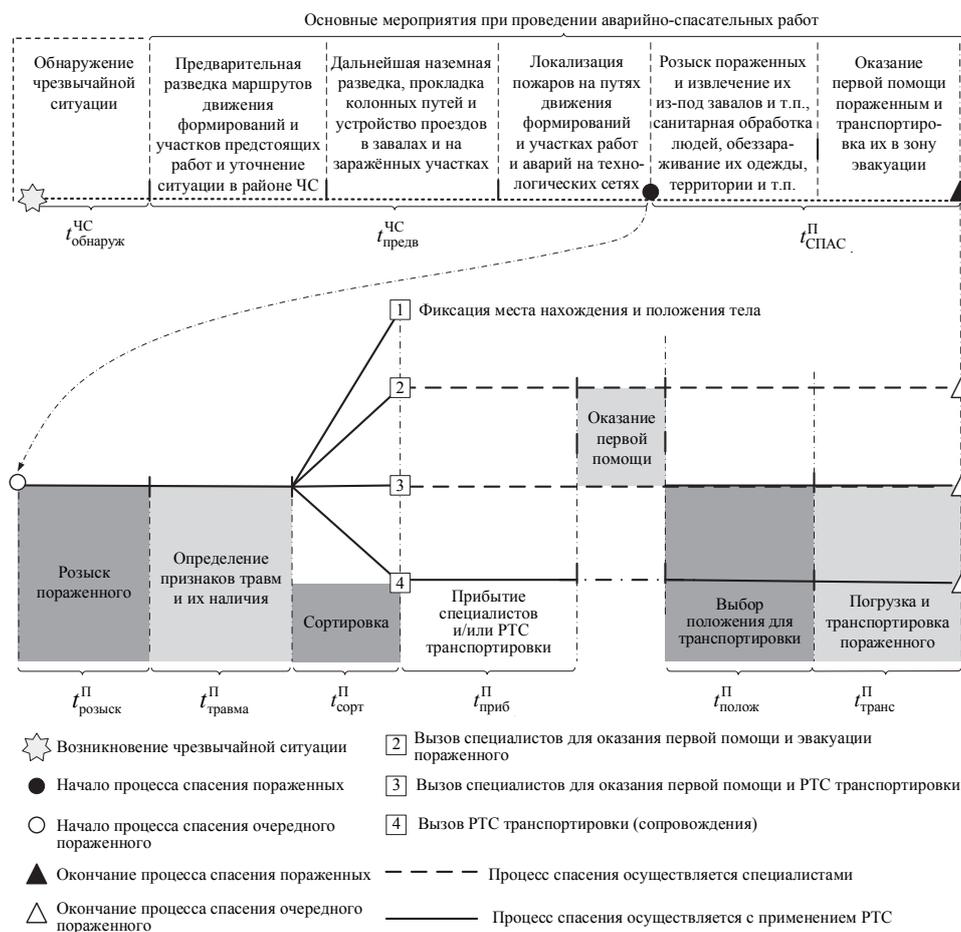


Рис. 1. Схема аварийно-спасательных работ на опасных производственных объектах

При наличии большого количества пораженных и ограниченном количестве сил и средств спасения для определения очередности оказания первой помощи и транспортировки в зону эвакуации осуществляется сортировка пораженных. В условиях ЧС необходимо принимать во внимание тот факт, что 25...30 % пораженных нуждаются в неотложных мероприятиях, наиболее эффективных в первые часы после получения травм [2, 3]. Степень тяжести состояния пораженного определяется по глубине нарушения жизненных функций – дыхания, кровообращения, функций головного мозга. Приоритет отдается в первую очередь тем пораженным, шансы на выживание которых выше [4].

На основе анализа наиболее известных алгоритмов первичной медицинской сортировки [5] в настоящем исследовании использована современная система сортировки, позволяющая дифференцировать всех пораженных на четыре группы, каждой из которых присвоен свой цветовой код (табл. 1) [6–9]. По завершении процесса сортировки пораженные люди помечаются цветом одной из четырех категорий сортировки в виде специальной цветной бирки (англ. triage tag) и цветного фонарика (в темное время суток) либо просто цветной лентой.

Таблица 1

Категории пораженных в зависимости от их состояния

Параметр	Категория	Пояснение	Действие
x_{121}	«Черная»	Пораженные, у которых отсутствует дыхание и пульс, и агонизирующие	Помощь не оказывается
x_{122}	«Красная»	Тяжелое состояние пораженных (могут умереть в течение часа)	Немедленное оказание помощи и транспортировка в больницу
x_{123}	«Желтая»	Тяжелое состояние пораженных, чья жизнь пока не находится под угрозой	Стабилизация состояния и транспортировка во вторую очередь
x_{124}	«Зеленая»	Пораженные (пострадавшие), способные передвигаться самостоятельно	Помощь оказывается в последнюю очередь. В больницу могут добраться самостоятельно

Таким образом, с одной стороны, существует объективная необходимость в применении РТС при проведении аварийно-спасательных работ, с другой – наблюдается отсутствие решений в области обеспечения возможности спасения пораженных в результате аварий на ОПО с использованием данных комплексов и средств.

Использование робототехнических средств в ходе аварийно-спасательных работ на опасных производственных объектах позволяет минимизировать степень риска для пожарных, спасательных и прочих формирований.

В настоящее время имеются прототипы и действующие образцы робототехнических средств, способных выполнять основные этапы таких работ: общую разведку-оценку обстановки на месте ЧС, расчистку завалов, прокладку проходов и трасс для других роботов и людей-спасателей, проникновение в труднодоступные помещения через расчищенные лазы и проходы, открывание дверей [10]. Однако для спасения пораженных требуется наличие у таких средств сенсорных (датчики температуры, давления, влажности) и специализированных (компьютерное зрение, анализ и синтез речи) систем [11, 12], а также систем поддержки принятия решений о травмах, полученных пораженными, категории последних, определяющей способ их спасения, и положении для транспортировки пораженных, нуждающихся в эвакуации.

Проведенный анализ показал, что для указанных систем имеются частные научно-технические решения, слабо адаптированные к их реализации в робототехнических средствах, откуда следует необходимость в разработке модельно-алгоритмического и методического обеспечения поддержки принятия решений о травмах пораженных и степени их тяжести, категории пораженных и способов оказания им помощи и транспортировки в зону эвакуации, позволяющих повысить эффективность спасения людей, заболевших, травмированных или раненых в результате поражающего воздействия источника техногенной ЧС.

Согласно концепции активных подвижных объектов, в решаемой научной задаче способ спасения пораженных с использованием РТС состоит в заранее разработанной последовательности действий (рис. 1), связанной с розыском пораженных – $S^{\text{РОЗЫСК}}$, с определением признаков травм и их наличия – $S^{\text{ТРАВМА}}$, с определением категории пораженного – $S^{\text{КАТЕГОРИЯ}}$, с выработкой решения относительно дальнейших действий – $S^{\text{РЕШЕНИЕ}}$, с прибытием специалистов и/или РТС транспортировки – $S^{\text{ПРИБЫТИЕ}}$, с оказанием первой помощи на месте – $S^{\text{ПОМОЩЬ}}$, с выбором положения для транспортировки – $S^{\text{ПОЛОЖЕНИЕ}}$, с погрузкой и транспортировкой пораженного в зону эвакуации – $S^{\text{ТРАНСПОРТИРОВКА}}$ [13]:

$$S = \left\{ S^{\text{РОЗЫСК}}, S^{\text{ТРАВМА}}, S^{\text{КАТЕГОРИЯ}}, S^{\text{РЕШЕНИЕ}}, S^{\text{ПРИБЫТИЕ}}, S^{\text{ПОМОЩЬ}}, S^{\text{ПОЛОЖЕНИЕ}}, S^{\text{ТРАНСПОРТИРОВКА}} \right\}. \quad (1)$$

Учитывая существующее многообразие способов $S^{\text{РОЗЫСК}}$, $S^{\text{ТРАВМА}}$, $S^{\text{КАТЕГОРИЯ}}$, $S^{\text{РЕШЕНИЕ}}$, $S^{\text{ПРИБЫТИЕ}}$, $S^{\text{ПОМОЩЬ}}$, $S^{\text{ПОЛОЖЕНИЕ}}$, $S^{\text{ТРАНСПОРТИРОВКА}}$, процесс спасения пораженных определяется вариантами их последовательного применения и комбинирования. Тогда для спасения пораженных в результате аварий на ОПО с использованием РТС необходим выбор такого способа спасения S_i , который обеспечивал бы максимум эффективности процесса спасения.

В качестве критерия эффективности спасения пораженных может быть принят критерий оптимальности, в соответствии с которым необходимо обнаружить и спасти максимальное количество пораженных в единицу времени [14]:

$$K_{\text{сп}} = M[N_{\text{сп}}]/T_{\text{п}} = M[N_0 - N - N_{\text{нсп}}]/T_{\text{п}} \rightarrow \max, \quad (2)$$

где $M[]$ – математическое ожидание; $N_{\text{сп}}$ – количество спасенных пораженных, чел.; $T_{\text{п}}$ – время проведения поиска и спасения пораженных; N_0 – число изначально живых в первый момент после возникновения ЧС, чел.; N – число погибших в данный момент времени, чел.; $N_{\text{нсп}}$ – число необнаруженных (неспасенных) пораженных в данный момент времени, чел.

Для определения эффективности работ по спасению за основу принят известный закон гибели пораженных [15]:

$$N = N_0 e^{-\alpha T_{\text{п}}}, \quad (3)$$

где α – показатель темпа гибели; $T_{\text{ср}}$ – среднее время выживания с момента возникновения ЧС до гибели пораженного, чел. Тогда в качестве показателя эффективности спасения пораженных целесообразно использовать темп (ин-

тенсивность) их спасения (число спасенных за час работы), который зависит в том числе от выбора действий в отношении различных категорий пораженных. Учитывая данные обстоятельства, показатель темпа гибели определен как

$$\alpha = K_{\text{кат}}^{\text{П}} \cdot K_{\text{пол}}^{\text{П}} / T_{\text{ср}}, \quad (4)$$

где $K_{\text{кат}}^{\text{П}}$, $K_{\text{пол}}^{\text{П}}$ – коэффициент влияния категории пораженного, определенный в результате первичной медицинской сортировки, и коэффициент влияния положения для транспортировки пораженного на темп гибели соответственно:

$$K_{\text{кат}}^{\text{П}} = \begin{cases} K_{\text{кат}}^{\text{П}} = 1 \text{ при правильно определенной категории,} \\ K_{\text{кат}}^{\text{П}} > 1 \text{ при неправильно определенной категории;} \end{cases}$$

$$K_{\text{пол}}^{\text{П}} = \begin{cases} K_{\text{пол}}^{\text{П}} = 1 \text{ при правильном положении,} \\ K_{\text{пол}}^{\text{П}} > 1 \text{ при неправильном положении.} \end{cases}$$

Время проведения поиска и спасения пораженных при применении РТС определяется следующим выражением:

$$T_{\text{П}} = t_{\text{обнаруж}}^{\text{ЧС}} + t_{\text{предв}}^{\text{ЧС}} + t_{\text{СПАС}}^{\text{П}}, \quad (5)$$

где $t_{\text{обнаруж}}^{\text{ЧС}}$ – время обнаружения ЧС; $t_{\text{предв}}^{\text{ЧС}}$ – время реализации основных этапов аварийно-спасательных работ, предвещающих этап спасения пораженных; $t_{\text{СПАС}}^{\text{П}}$ – время проведения поиска и спасения пораженных.

Время $t_{\text{СПАС}}^{\text{П}}$ проведения поиска и спасения пораженных зависит от способа спасения S_i (1), поэтому общая задача повышения эффективности процесса спасения пораженных в результате аварий на ОПО может быть формализована в следующем виде: необходимо найти оптимальный способ спасения S_0 , при котором достигается максимум числа спасенных пораженных за заданное время:

$$K_{\text{сп}}(S_0) = \max_i K_{\text{сп}i}(S_i) \quad (6)$$

при ограничениях на время проведения поиска (розыска) и спасения пораженного:

$$t_{\text{СПАС}i}^{\text{П}}(S_i) \leq T_{\text{СПАС}}^{\text{ЗД}}, \quad (7)$$

число применяемых РТС поиска и спасения пораженных:

$$M_{\text{РТС СПАС}i}(S_i) \leq M_{\text{РТС СПАС}}^{\text{ДОП}} \quad (8)$$

число специалистов (спасателей), способных оказать первую помощь:

$$M_{\text{СПЕЦ}} i(S_i) \leq M_{\text{СПЕЦ}}^{\text{ДОП}}; \quad (9)$$

число применяемых РТС транспортировки пораженных:

$$M_{\text{РТС ТРАНСП}} i(S_i) \leq M_{\text{РТС ТРАНСП}}^{\text{ДОП}}. \quad (10)$$

Решение задачи (6) предусматривает генерацию альтернативных способов спасения, удовлетворяющих условиям (7)–(10), и оценку их эффективности. Значительному снижению ее сложности способствует принятая декомпозиция способа спасения пораженных (1) на отдельные действия (способы), а времени $t_{\text{СПАС}}^{\text{П}}$ – на составляющие. Формальная постановка частных задач оптимизации процесса спасения, а также модельно-алгоритмическое и методическое обеспечение их решения представлены в табл. 2.

Таблица 2

Частные задачи оптимизации процесса спасения пораженных

№	Способ	Частный критерий	Способ решения
1	$S_i^{\text{РОЗЫСК}}$	$t_{\text{розыск}}^{\text{П}} \rightarrow \min$	Решение задачи планирования траекторий движения на основе известных методов
2	$S_i^{\text{ТРАВМА}}$	$t_{\text{травма}}^{\text{П}} \rightarrow \min$	Моделирование процесса выявления признаков травм и анализ их информативности
3	$S_i^{\text{КАТЕГОРИЯ}}$	$K_{\text{кат}}^{\text{П}} \rightarrow 1, t_{\text{сорт}}^{\text{П}} \rightarrow \min$	Моделирование процесса определения категории пораженного
4	$S_i^{\text{РЕШЕНИЕ}}$	$N_{\text{СП}} \sum_{i=1}^{\text{П}} t_{\text{СПАС}}^{\text{П}} i \rightarrow \min,$ $N_{\text{СП}} \rightarrow \max$	Решение задачи о назначениях на основе симплекс-метода
5	$S_i^{\text{ПРИБЫТИЕ}}$	$t_{\text{приб.}}^{\text{П}} \rightarrow \min$	Решение задачи планирования траекторий движения на основе известных методов
6	$S_i^{\text{ПОМОЩЬ}}$	$N_{\text{нсп}} \rightarrow \min$	Не может быть решена с помощью РТС
7	$S_i^{\text{ПОЛОЖЕНИЕ}}$	$K_{\text{пол}}^{\text{П}} \rightarrow 1, t_{\text{полож}}^{\text{П}} \rightarrow \min$	Моделирование процесса выбора положения для транспортировки
8	$S_i^{\text{ТРАНСПОРТИРОВКА}}$	$t_{\text{трансп}}^{\text{П}} \rightarrow \min$	Решение задачи планирования траектории движения РТС с учетом избранного положения для транспортировки

2. КОМПЛЕКС МОДЕЛЕЙ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ О СПОСОБЕ СПАСЕНИЯ ПОРАЖЕННЫХ

На основе взаимосвязи процедур определения признаков травм, наличия травм у пораженного, категории, к которой он может быть отнесен в зависимости от их тяжести, и положения для транспортировки отдельных категорий пораженных предложен комплекс моделей поддержки принятия решений о способе спасения пораженных (рис. 2).

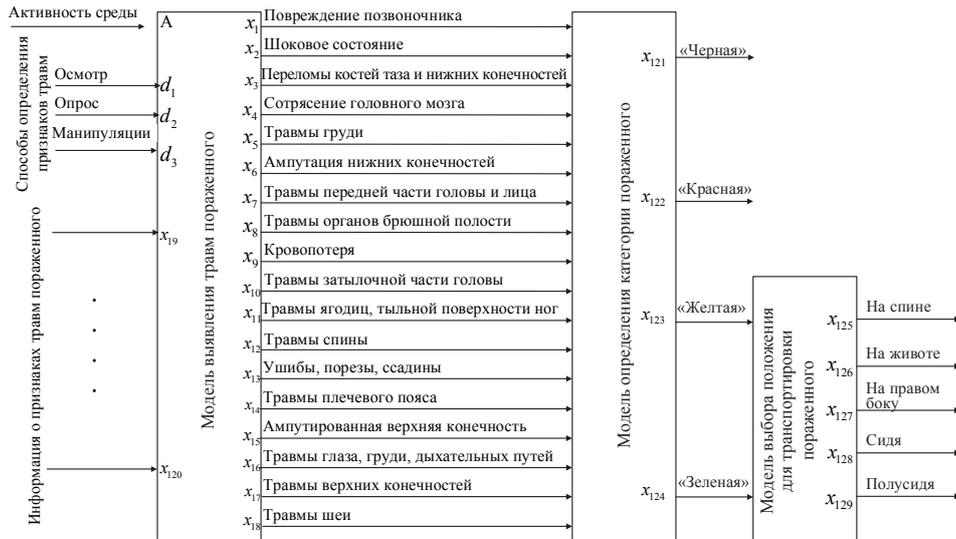


Рис. 2. Комплекс моделей поддержки принятия решений о способе спасения пораженных

Для формального описания моделей разработанного комплекса обоснован и применен аппарат байесовских сетей доверия (БСД), обеспечивающих возможность решения задач вероятностного прогнозирования [16]. Разработанная модель выявления травм у пораженного на основе БСД имеет следующий вид:

$$\langle \mathbf{T}, \mathbf{P}_{\mathbf{T}} \rangle, \quad (11)$$

где \mathbf{T} – ациклический направленный граф; $\mathbf{P}_{\mathbf{T}}$ – множество параметров, определяющих БСД [17].

Разработанная модель определения категории пораженного в виде БСД имеет следующий вид:

$$\langle \mathbf{C}, \mathbf{P}_{\mathbf{C}} \rangle, \quad (12)$$

где \mathbf{C} – ациклический направленный граф (рис. 3); $\mathbf{P}_{\mathbf{C}}$ – условные вероятности $P(\tilde{x}_i | \tilde{x}_j)$, $i = 121 \dots 124$, $j = 1 \dots 18$ в зависимости от категории пораженных и полученных ими травм.

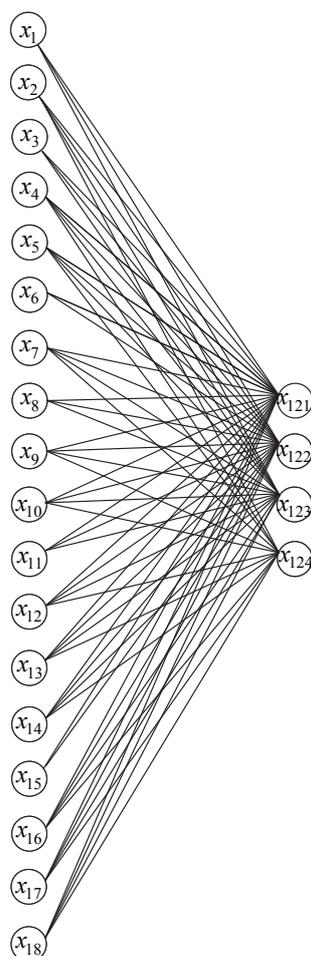


Рис. 3. Модель определения категории пораженного

По результатам моделирования процесса определения категории пораженного делается вывод о необходимости:

- 1) фиксации положения тела для проведения дальнейших экспертиз, если пораженный отнесен к категории «Черная»;
- 2) вызова специалистов для оказания первой помощи и РТС транспортировки, если пораженный отнесен к категории «Красная»;
- 3) вызова РТС транспортировки или сопровождения, если пораженный отнесен к категориям «Желтая» или «Зеленая».

Разработанная модель выбора положения для транспортировки пораженного в виде БСД имеет следующий вид:

$$\langle \mathbf{G}, \mathbf{PAR} \rangle, \quad (13)$$

где \mathbf{G} – ациклический направленный граф (рис. 4); \mathbf{PAR} – условные вероятности $P(\tilde{x}_i | \tilde{x}_j)$, $i = 121 \dots 125$, $j = 1 \dots 18$ в зависимости от положений при транспортировке.

Уточнение таблиц условных вероятностей для разработанных моделей поддержки принятия решений осуществляется на основе экспертной информации, имеющихся медицинских исследований, направленных на выявление взаимосвязей между элементами процесса диагностики травм, накопленных статистических данных. Для получения экспертной информации относительно травм, признаков травм и их взаимосвязи разработано программное средство для анкетирования специалистов в области травматологии.

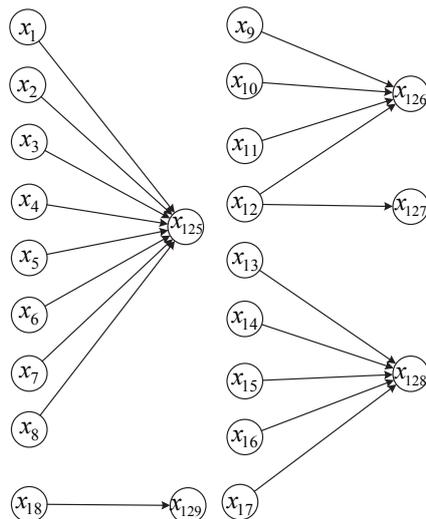


Рис. 4. Модель положения для транспортировки пораженного

Для апостериорного вывода БСД в проведенном исследовании применен алгоритм опроса, использующий представление (кластеризацию) исходной сети в виде так называемого дерева сочленений. Путем имитационного моделирования продемонстрированы результаты, свидетельствующие о том, что разработанный комплекс моделей обеспечивает возможность решения задач вероятностного прогнозирования на основе субъективных и неполных данных. Представлены двусторонние оценки для вероятности минимального числа признаков, обеспечивающих гарантированную идентификацию травмы. Получены распределения величин, представляющих долю корректно определенных положений для транспортировки по k первым признакам, ранжированным по длительности произнесения, вычислительной сложности алгоритма и времени проведения при опросе, осмотре и манипуляциях соответственно.

Применение полученных результатов моделирования и решения поставленных задач (табл. 2) требует разработки соответствующего методического обеспечения. Ниже представлены методика оптимизации структуры робототехнического средства спасения пораженных, сопровождающая решение задачи 2; методика планирования траектории движения робототехнических средств транспортировки пораженных, решающая задачу 8, и методика выбора способа спасения пораженного в результате аварии на опасном производственном объекте, обеспечивающая решение поставленных частных задач повышения эффективности спасения в комплексе.

3. МЕТОДИКИ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ О СПОСОБЕ СПАСЕНИЯ ПОРАЖЕННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ

Результаты анализа информативности признаков травм позволяют сформировать их наборы для различных условий (активности) среды, характеризующихся разными ограничениями на время $t_{\text{травма}}^{\text{П}}$ выявления травм у пораженного. Для каждого из такого набора могут быть обоснованы число и функциональный состав узлов РТС спасения, для чего в работе предложена *методика оптимизации структуры РТС спасения пораженных*.

Для описания взаимосвязей между различными вариантами построения элементов РТС предложено использовать альтернативно-графовую формализацию, в которой различные варианты построения элементов системы задаются в виде вершин альтернативного графа, а дуги отражают характер взаимосвязей между ними [18, 19].

Применение методики оптимизации структуры робототехнического средства спасения пораженных позволяет минимизировать время выявления травм у пораженного за счет сокращения числа признаков травм, сохраняя требуемую точность их определения. Ввиду сложности точного априорного определения всего спектра и характеристик мероприятий по спасению пораженных необходимо разрабатывать образцы РТС с возможностью структурной и алгоритмической реконфигурации. Такие РТС должны строиться по модульной архитектуре, предусматривающей подключение широкого спектра измерительных средств (датчиков, видеокамер, систем технического зрения и др.), а также различных исполнительных механизмов.

Полученная структура определяет облик РТС спасения пораженных и, как следствие, его массогабаритные показатели. Последние изменяются при транспортировке пораженного (реализация способа $S_i^{\text{ТРАНСПОРТИРОВКА}}$) в зону эвакуации и существенно влияют на процесс транспортировки в условиях завалов [20].

Данный факт обусловил необходимость разработки *методики планирования траектории движения РТС транспортировки пораженных*, в основу которой положены представление траектории движения в виде ориентированного ациклического графа; алгоритм нахождения кратчайших путей K между двумя заданными вершинами в ориентированном ациклическом графе; алгоритм назначения весов вершинам указанного графа с учетом габаритных размеров РТС и эвакуируемого пораженного и требований к минимизации его энергопотребления [21].

Для выбора рациональной последовательности действий, необходимых для эффективного спасения пораженных с использованием РТС, разработана *методика выбора способа спасения пораженного в результате аварии на ОПО* (рис. 5), основанная на использовании представленного выше модельно-алгоритмического и методического обеспечения [22–24].

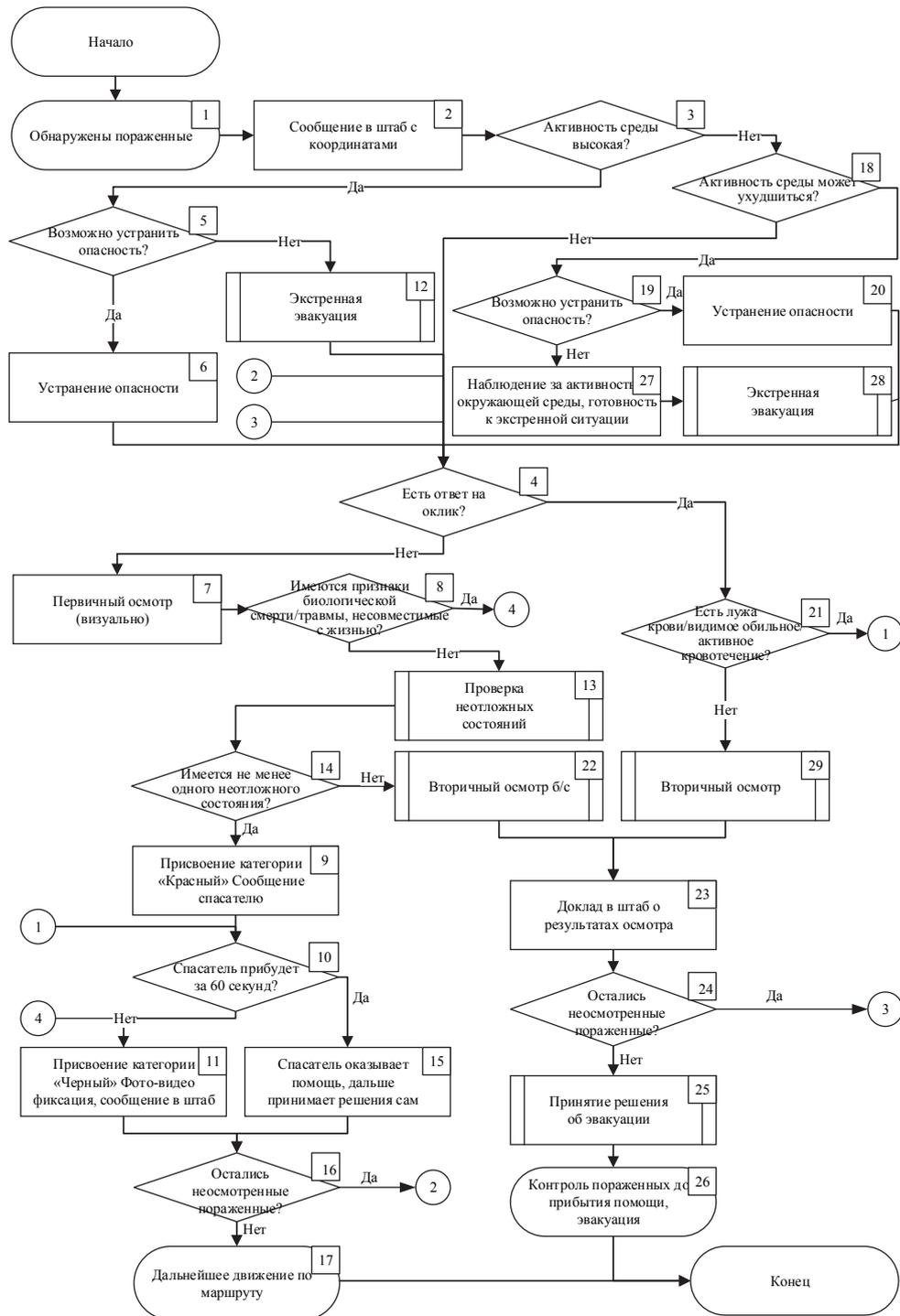


Рис. 5. Блок-схема методики выбора способа спасения пораженного

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА

Экспериментальная проверка разработанного научно-методического инструментария поддержки принятия решений о способе спасения пораженных проводилась на примере аварии на хранилище компонент ракетного топлива. В качестве исходных данных использовались следующие: $N_0 = 6328$ человек, $T_{\text{ср}} = 4$ ч; $t_{\text{обнаруж}}^{\text{ЧС}} = 3$ мин; $t_{\text{предв}}^{\text{ЧС}} = 46$ мин; $M_{\text{СПЕЦ}} = 35$; $M_{\text{РТС СПАС}} = 1...5$; $M_{\text{РТС ТРАНСП}} = 21...42$. Моделировались различные ситуации по размещению на местности пораженных с травмами различной степени тяжести [14].

Результаты моделирования показали, что применение РТС спасения и транспортировки вместо спасателей позволяет обнаружить и спасти число пораженных ($N_{\text{СП}} = 2216$), соизмеримое с результатом, достигаемым специалистами, только при $M_{\text{РТС СПАС}} = 5$ и $M_{\text{РТС ТРАНСП}} \geq 38$. Однако совместное применение сил и средств в соответствии с разработанной методикой выбора способа спасения пораженного в результате аварии на опасном производственном объекте позволяет достичь лучшего результата по сравнению с одиночной работой специалистов (спасателей) уже при $M_{\text{РТС СПАС}} = 3$ и $M_{\text{РТС ТРАНСП}} \geq 29$. Наилучший результат (при $M_{\text{РТС СПАС}} = 5$ и $M_{\text{РТС ТРАНСП}} \geq 29$) от применения методики выбора способа спасения пораженного обеспечивает спасение $N_{\text{СП}} = 4637$ человек, что в 2,5 раза превышает результат, достигаемый в результате работы только спасателей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенного имитационного моделирования свидетельствуют, что разработанный комплекс моделей обеспечивает возможность решения задач вероятностного прогнозирования, базируясь на субъективных и неполных данных о признаках травм, формируемых в результате опроса, осмотра и манипуляций с пораженным.

Разработанные методики поддержки принятия решений о способе спасения пораженных с использованием робототехнических средств позволяют минимизировать составляющие времени обнаружения и спасения пораженных.

В результате проведенной экспериментальной проверки разработанного научно-методического инструментария поддержки принятия решений о спасении пораженных установлено, что применение предложенных моделей и методик позволяет существенно (до 2,5 раза) увеличить число спасенных пораженных.

Полученные результаты свидетельствуют о значительном повышении эффективности спасения пораженных в результате аварии на ОПО с использованием РТС спасения и транспортировки.

Дальнейшие исследования направлены на разработку алгоритмов взаимодействия автоматизированных робототехнических средств с пострадавшим при осмотре и транспортировке, а также на реализацию программно-аппаратных средств бортовых сенсоров на робототехническом средстве для организации человеко-машинного взаимодействия [25–28].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мотиенко А.И., Макеев С.М., Басов О.О. Анализ и моделирование процесса выбора положения для транспортировки пораженного на основе байесовских сетей доверия // Труды СПИИРАН. – 2015. – Вып. 6 (43). – С. 135–155.
2. Предупреждение и ликвидация чрезвычайных ситуаций: учебное пособие для органов управления РСЧС / под общ. ред. Ю.Л. Воробьева. – М.: Крук, 2002. – 368 с.
3. Приказ Минздравсоцразвития РФ № 477н «Об утверждении перечня состояний, при которых оказывается первая помощь, и перечня мероприятий по оказанию первой помощи». – М., 2012. – 3 с.
4. Полный медицинский справочник фельдшера. – Доп. и актуализир. изд. бестселлера. – М.: Эксмо, 2015. – 832 с.
5. Пысла М.С. Алгоритмы первичной медицинской сортировки // Медицина катастроф. – 2014. – № 1. – С. 47–52.
6. Triage Guidelines [Electronic resource]. – 2014. – URL: <https://chemm.nlm.nih.gov/triage.htm> (accessed: 05.06.2017).
7. Nocera A., Garner A. Australian disaster triage: a colour maze in the Tower of Babel // Australian and New Zealand Journal of Surgery. – 1999. – Vol. 69, N 8. – P. 598–602.
8. Mass-casualty triage: time for an evidence-based approach / J.L. Jenkins, M.L. McCarthy, L.M. Sauer, G.B. Green, S. Stuart, T.L. Thomas, E.B. Hsu // Prehospital and Disaster Medicine. – 2008. – Vol. 1 (23). – P. 3–8.
9. Mass casualty triage: an evaluation of the data and development of a proposed national guideline / E.B. Lerner, R.B. Schwartz, P.L. Coule, E.S. Weinstein, D.C. Cone, R.C. Hunt, S.M. Sasser, J.M. Liu, N.G. Nudell, I.S. Wedmore, J. Hammond, E.M. Bulger, J.P. Salomone, T.L. Sanddal, D. Markenson, R.E. O'Connor // Disaster Medicine and Public Health Preparedness. – 2008. – Vol. 2, N S1. – P. S25–S34.
10. Мотиенко А.И., Ронжин А.Л., Павлюк Н.А. Современные разработки аварийно-спасательных роботов: возможности и принципы их применения // Научный вестник НГТУ. – 2015. – № 3 (60). – С. 147–165.
11. Возможности применения многомодальных интерфейсов на пилотируемом космическом комплексе для поддержания коммуникации космонавтов с мобильным роботом – помощником экипажа / Р.М. Юсупов, Б.И. Крючков, А.А. Карпов, А.Л. Ронжин, В.М. Усов // Пилотируемые полеты в космос. – 2013. – № 3 (8). – С. 23–34.
12. Ронжин А.Л. Топологические особенности морфофонемного способа представления словаря для распознавания русской речи // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2008. – № 9. – С. 12–19.
13. Концептуальная и формальная модели синтеза киберфизических систем и интеллектуальных пространств / А.Л. Ронжин, О.О. Басов, Б.В. Соколов, Р.М. Юсупов // Известия вузов. Приборостроение. – 2016. – № 11 (59). – С. 897–906.
14. Proactive robotic systems for effective rescuing sufferers / A. Motienko, I. Dorozhko, A. Tarasov, O. Basov // Interactive Collaborative Robotics: First International Conference, ICR 2016: Proceedings. – Cham: Springer, 2016. – P. 172–180. – (LNCS; vol. 9812.).
15. Основы моделирования и оценки эффективности действий сил РСЧС при ведении аварийно-спасательных и других неотложных работ: учебное пособие / П.А. Попов, В.С. Федорук, М.Ф. Баринин, Д.В. Мясников. – Химки: АГЗ МЧС России, 2014. – 61 с.
16. Мусина В.Ф. Байесовские сети доверия как вероятностная графическая модель для оценки медицинских рисков // Труды СПИИРАН. – 2013. – Вып. 24. – С. 135–151.

17. Учебник спасателя / С.К. Шойгу [и др.]; под общ. ред. Ю.Л. Воробьева. – 2-е изд., перераб. и доп. – Краснодар: Советская Кубань, 2002. – 528 с.
18. Мотиенко А.И., Басов О.О., Ронжин А.Л. Распределение задач между элементами робототехнической системы спасения пострадавших // Математические методы в технике и технологиях: ММТТ-29: XXIX Международная научная конференция: сборник трудов. – Саратов, 2016. – Т. 9. – С. 134–138.
19. Цвиркун А.Д. Основы синтеза структуры сложных систем. – М.: Наука, 1982.
20. Методики оценки последствий аварий на опасных производственных объектах: сборник документов. – 3-е изд., испр. и доп. – М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2010. – 208 с. – (Нормативные документы в сфере деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору. Серия 27; вып. 2.).
21. Мотиенко А.И. Планирование тактической траектории движения автоматизированных робототехнических средств при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Экономика. Информатика. – 2016. – Вып. 37, № 2 (223). – С. 139–143.
22. Уголовный кодекс Российской Федерации. Статья 125. Оставление в опасности // Собрание законодательства Российской Федерации. – 1996. – № 25. – Ст. 2954.
23. Михайлович В.А. Руководство для врачей скорой помощи. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Медицина, 1990. – 544 с.
24. Iankova A. The Glasgow coma scale clinical application in emergency departments // Emergency Nurse. – 2006. – Vol. 14, N 8. – P. 30–35.
25. Гапонов В.С., Дашевский В.П., Бизин М.М. Модернизация программно-аппаратного обеспечения модельных сервоприводов для использования в антропоморфных робототехнических комплексах // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2016. – Т. 19, № 2. – С. 41–50.
26. Ронжин А.Л., Бизин М.М., Солёный С.В. Математические модели и средства много-модального взаимодействия с робототехническими и киберфизическими системами // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ. – 2016. – № 8 (90). – С. 107–111.
27. Позиционирование мобильного робота-помощника во внутреннем рабочем пространстве на пилотируемых космических комплексах / Б.И. Крючков, В.П. Дашевский, Б.В. Соколов, В.М. Усов // Пилотируемые полеты в космос. – 2014. – № 4 (13). – С. 40–56.
28. Дашевский В.П., Бизин М.М. Обзор возможностей бортовых вычислителей на основе SMARC-модулей для робототехнических комплексов // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2015. – № 3 (37). – С. 91–96.

Мотиенко Анна Игоревна, научный сотрудник отдела аспирантуры, информационно-образовательных технологий и услуг Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации Российской академии наук. E-mail: anna.gunchenko@gmail.com

Басов Олег Олегович, кандидат технических наук, сотрудник Академии Федеральной службы охраны Российской Федерации. Имеет более 200 публикаций. E-mail: oobasov@mail.ru

Бизин Максим Михайлович, младший научный сотрудник лаборатории автономных робототехнических систем Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации Российской академии наук. E-mail: bizin@iias.spb.su

A decision support system for rescuing people injured as a result of accidents at hazardous production facilities*

A.I. MOTIENKO¹, O.O. BASOV², M.M. BIZIN³

¹ St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences, 39, 14-th Line V.O., St. Petersburg, 199178, Russia. E-mail: anna.gunchenko@gmail.com

² The Academy of Federal Security Guard Service of the Russian Federation, 35, Priborostroitel'naya Street, Orel, 302034, Russia, Ph.D. E-mail: oobasov@mail.ru

³ St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences, 39, 14-th Line V.O., St. Petersburg, 199178, Russia. E-mail: binzin@iias.spb.su

The use of robotics in the course of rescue operations at hazardous production facilities makes it possible to minimize the risk for firefighters, rescuers and other services. The use of a wide range of sensory elements in the RS allows you to expand the list of monitored parameters and to generate control actions by using predictive and proactive capabilities based on the methods and technologies of integrated modeling. To reduce the complexity of the general investigation problem, the mode of the injured recovery is decomposed into several actions and the time of the rescue procedures is divided into several components. To improve the effectiveness of rescue operations, particular problems are set and formalized according to the proposed decomposition. The solutions of the corresponding particular problems can be obtained by modeling processes of identification and triage of injuries and choosing an optimal position for transportation, as well as by modifying the solution for planning RS trajectories, which ensures transportation of the injured with due regard for the chosen position. A complex of decision support models describing the ways to rescue the injured is also presented in the paper. Bayesian Belief Networks are validated and used for their formal description. A model of the effectiveness of the rescue operation of people injured as a result of accidents at hazardous production facilities is proposed to make a decision on evacuation or further search and rescue of other injured. A technique of optimizing the structure of a robotic mean for the injured rescue, a technique of planning trajectories of rescue robots, and a technique of choosing a mode of rescuing people injured as a result of an accident at a hazardous production facility are presented. The developed decision-making techniques of the way of rescuing the injured with the use of robotic means make it possible to minimize the time components of detection and rescue of the injured. Also, the results of the experimental verification of the developed research and methodological tools to support decision-making on the ways of rescuing the injured are presented.

Keywords: transportation of the injured, rescue operation, robotic system, Bayesian Belief Network, integrated modeling, efficiency indicators, decision support system

DOI: 10.17212/1814-1196-2017-2-65-82

REFERENCES

1. Motienko A.I., Makeev S.M., Basov O.O. Analiz i modelirovanie protsessa vybora polozheniya dlya transportirovki porazhennogo na osnove baiesovskikh setei doveriya [Analysis and modeling of position choice process for transportation of the sufferer on the basis of Bayesian belief networks]. *Trudy SPIIRAN – SPPIRAS Proceedings*, 2015, iss. 6 (43), pp. 135–155.
2. Vorob'ev Yu.L., ed. *Preduprezhdenie i likvidatsiya chrezvychainykh situatsii* [Prevention and elimination of emergency situations. Moscow, Kruk Publ., 2002. 368 p.
3. *Prikaz Minzdravsotsrazvitiya RF № 477n "Ob utverzhdenii perechnya sostoyanii, pri kotor-ykh okazivaetsya pervaya pomoshch', i perechnya meropriyatii po okazaniyu pervoi pomoshchi"* [Order of the Ministry of Health and Social Development of the Russian Federation No. 477n "On ap-

* Received 24 March 2017.

proval of the list of conditions under which the first aid is provided, and the list of first aid measures"]. Moscow, 2012. 3 p.

4. *Polnyi meditsinskii spravochnik fel'dshera* [Full medical reference book of the paramedic]. Moscow, Eksmo Publ., 2015. 832 p.

5. Pysla M.S. Algoritmy pervichnoi meditsinskoj sortirovki [Algorithms of primary triage]. *Meditsina katastrof – Disaster Medicine*, 2014, no. 1, pp. 47–52.

6. *Triage Guidelines*. 2014. Available at: <https://chemm.nlm.nih.gov/triage.htm> (accessed 05.06.2017).

7. Nocera A., Garner A. Australian disaster triage: a colour maze in the Tower of Babel. *Australian and New Zealand Journal of Surgery*, 1999, vol. 69, no. 8, pp. 598–602.

8. Jenkins J.L., McCarthy M.L., Sauer L.M., Green G.B., Stuart S., Thomas T.L., Hsu E.B. Mass-casualty triage: time for an evidence-based approach. *Prehospital and Disaster Medicine*, 2008, vol. 1 (23), pp. 3–8.

9. Lerner E.B., Schwartz R.B., Coule P.L., Weinstein E.S., Cone D.C., Hunt R.C., Sasser S.M., Liu J.M., Nudell N.G., Wedmore I.S., Hammond J., Bulger E.M., Salomone J.P., Sanddal T.L., Markenson D., O'Connor R.E. Mass casualty triage: an evaluation of the data and development of a proposed national guideline. *Disaster Medicine and Public Health Preparedness*, 2008, vol. 2, no. S1, pp. S25–S34.

10. Motienko A.I., Ronzhin A.L., Pavlyuk N.A. Sovremennyye razrabotki avariino-spasatel'nykh robotov: vozmozhnosti i printsipy ikh primeneniya [Modern developments of rescue robots: possibilities and principles of their application]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2015, no. 3 (60), pp. 147–165.

11. Yusupov R.M., Kryuchkov B.I., Karpov A.A., Ronzhin A.L., Usov V.M. Vozmozhnosti primeneniya mnogomodal'nykh interfeisov na pilotiruemom kosmicheskom komplekse dlya podderzhaniya kommunikatsii kosmonavtov s mobil'nym robotom – pomoshchnikom ekipazha [Possibility of application of multimodal interfaces on a manned space complex to maintain communication between cosmonauts and a mobile robotic assistant]. *Pilotiruemye polety v kosmos – Manned Spaceflight*, 2013, no. 3 (8), pp. 23–34.

12. Ronzhin A.L. Topologicheskie osobennosti morfofonemnogo sposoba predstavleniya slovarya dlya raspoznavaniya russkoi rechi [Topological features of a morfofonemny way of submission of the dictionary for recognition of the Russian speech]. *Vestnik komp'yuternykh i informatsionnykh tekhnologii – Herald of computer and information technologies*, 2008, no. 9, pp. 12–19.

13. Ronzhin A.L., Basov O.O., Sokolov B.V., Yusupov R.M. Kontseptual'naya i formal'naya modeli sinteza kiberneticheskikh sistem i intellektual'nykh prostranstv [Conceptual and formal models of synthesis of cyber-physical systems and cyber-physical intellectual spaces]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Priborostroenie – Journal of Instrument Engineering*, 2016, no. 11 (59), pp. 897–906.

14. Motienko A., Dorozhko I., Tarasov A., Basov O. Proactive robotic systems for effective rescuing sufferers. *Interactive Collaborative Robotics: First International Conference, ICR 2016: Proceedings. LNCS*. Cham, Springer, 2016, vol. 9812, pp. 172–180.

15. Popov P.A., Fedoruk V.S., Barinov M.F., Myasnikov D.V. *Osnovy modelirovaniya i otsenki effektivnosti deistvii sil RSChS pri vedenii avariino-spasatel'nykh i drugikh neotlozhnykh rabot* [Fundamentals of modeling and evaluation of the effectiveness of the actions of the forces of the Russian unified system for preventing and eliminating emergency situations in the conduct of emergency rescue and other urgent work]. Khimki, AGZ MChS Rossii Publ., 2014. 61 p.

16. Musina V.F. Baiesovskie seti doveriya kak veroyatnostnaya graficheskaya model' dlya otsenki meditsinskikh riskov [Bayesian belief networks as probabilistic graphical model for medical risk assessment]. *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings*, 2013, vol. 24, pp. 135–151.

17. Vorob'ev Yu.L., ed. *Uchebnik spasatelya* [The textbook of the rescuer]. 2nd ed. Krasnodar, Sovetskaya Kuban' Publ., 2002. 528 p.

18. Motienko A.I., Basov O.O., Ronzhin A.L. [Distribution of tasks between the elements of robotic system of rescue of the sufferers]. *Matematicheskie metody v tekhnike i tekhnologiyakh: MMTT-29: XXIX Mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya: sbornik trudov* [Proceedings of the

International Conference Mathematical Methods in Technique and Technologies MMTT-29]. Saratov, 2016, vol. 9, pp. 134–138. (In Russian).

19. Tsvirkun A.D. *Osnovy sinteza struktury slozhnykh sistem* [Fundamentals of synthesis of the structure of complex systems]. Moscow, Nauka Publ., 1982.

20. *Metodiki otsenki posledstviy avarii na opasnykh proizvodstvennykh ob'ektakh: sbornik dokumentov* [Evaluation methods of accident consequences at hazardous industrial units: a source book]. 3rd ed., revised and enlarged. Moscow, Nauchno-tehnicheskii tsentr issledovaniy problem promyshlennoi bezopasnosti Publ., 2010. 208 p.

21. Motienko A.I. Planirovanie takticheskoi traektorii dvizheniya avtomatizirovannykh robototekhnicheskikh sredstv pri likvidatsii posledstviy chrezvychainykh situatsii [Planning tactical motion trajectories of automated robotic means during disaster relief]. *Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Ekonomika. Informatika – Belgorod State University Scientific Bulletin. Economics. Information technologies*, 2016, iss. 37, no. 2 (223), pp. 139–143.

22. Ugolovnyi kodeks Rossiiskoi Federatsii. Stat'ya 125. Ostavlenie v opasnosti [Article 125. Leaving in danger. The Criminal Code of the Russian Federation]. *Sobranie zakonodatel'stva Rossiiskoi Federatsii – Collection of the legislation of the Russian Federation*, 1996, no. 25, art. 2954.

23. Mikhailovich V.A. *Rukovodstvo dlya vrachei skoroi pomoshchi* [A manual for emergency physicians]. 2nd ed. Leningrad, Meditsina Publ., 1990. 544 p.

24. Iankova A. The Glasgow coma scale clinical application in emergency departments. *Emergency Nurse*, 2006, vol. 14, no. 8, pp. 30–35.

25. Gaponov V.S., Dashevskii V.P., Bizin M.M. Modernizatsiya programmno-apparatnogo obespecheniya model'nykh servoprivodov dlya ispol'zovaniya v antropomorfnykh robototekhnicheskikh kompleksakh [Upgrading the firmware of model servos for use in anthropomorphic robotic systems]. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki – Proceedings of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics*, 2016, vol. 19, no. 2, pp. 41–50.

26. Ronzhin A.L., Bizin M.M., Solenyj S.V. Matematicheskie modeli i sredstva mnogomodal'nogo vzaimodeistviya s robototekhnicheskimi i kiberfizicheskimi sistemami [Mathematical models and means of multimodal interaction with robotic and cyberphysical systems]. *Matematicheskie metody v tekhnike i tekhnologiyakh – MMTT – Mathematical Methods in Technique and Technologies – MMTT*, 2016, vol. 8 (90), pp. 107–111.

27. Kryuchkov B.I., Dashevsky V.P., Sokolov B.V., Usov V.M. Pozitsionirovanie mobil'nogo robota-pomoshchnika vo vnutrennem rabochem prostranstve na pilotiruemykh kosmicheskikh kompleksakh [Positioning of a mobile robotic assistant within the working spaceboard manned space complexes]. *Pilotiruemye polety v kosmos – Manned Spaceflight*, 2014, vol. 4 (13), pp. 40–56.

28. Dashevsky V.P., Bizin M.M. Obzor vozmozhnosti bortovykh vychislitelei na osnove SMARC-modulei dlya robototekhnicheskikh kompleksov [Peculiarities of development of computation unit based on SMARC modules for robotics systems]. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki – Proceedings of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics*, 2015, no. 3 (37), pp. 91–96.