

На правах рукописи



МОТИЕНКО АННА ИГОРЕВНА

**МОДЕЛИ И МЕТОДИКИ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ
О СПАСЕНИИ ПОРАЖЕННЫХ В РЕЗУЛЬТАТЕ АВАРИЙ
НА ОПАСНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТАХ**

Специальность 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2016

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном учреждении науки Санкт-Петербургском институте информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН).

Научный руководитель: кандидат технических наук
Басов Олег Олегович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Яцун Сергей Федорович,
ФГБОУ ВПО «Юго-Западный государственный университет», заведующий кафедрой
теоретической механики и мехатроники;

доктор технических наук, доцент
Рудианов Николай Александрович,
3-й Центральный научно-исследовательский
институт Министерства обороны Российской
Федерации, начальник отдела.

Ведущая организация: Государственный научный центр Российской Федерации федеральное государственное автономное научное учреждение «Центральный научно-исследовательский институт робототехники и технической кибернетики» (ЦНИИ РТК).

Защита состоится «15» декабря 2016 г. в 13-30 на заседании диссертационного совета Д.002.199.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Санкт-Петербургском институте информатики и автоматизации Российской академии наук по адресу: 199178, Россия, Санкт-Петербург, 14 линия В. О., дом 39.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Федерального государственного бюджетного учреждения науки Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации Российской академии наук.

Автореферат разослан « » _____ 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д.002.199.01

кандидат технических наук



Фаткиева Роза Равильевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 аварийно 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* (людей, 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. Значительный объем научных и экспериментальных исследований, посвященных вопросам разработки модельно-алгоритмического и методического обеспечения РТС, выполнен большим количеством авторов и научных школ. Различным аспектам проблемы управления наземными роботами посвящены работы Бурдакова С.Ф., Жихарева Д.Н., Зенкевича С.Л., Пшихопова В.Х.; разработке роботов для работы в экстремальных условиях – работы Шашок В.Н., Умнова В.Н., Beal J., Becker A., De Cubber G., Deits R., Fallon M., Hornyak T., Kelly A., Kolawole E., Kuindersma S., Lee S.K., McLurkin J., Permenter F., Stentz A., Tedrake R., Theobald D., Valenzuela A., Zhang Y., Zucker M.; мультиагентному управлению – работы Бурдуна И.Е., Городецкого В.И., Каляева Н.А., Капустяна С.Г., Лохина В.М., Тимофеева А.В., Decker K., Lesser V. Значительный вклад в изучение и совершенствование вопросов транспортировки пострадавших в ЧС внесли Arda Y., Barbarosoglu G., Campos V., Hamed M., Ozdamar L., Peeta S., Song R., Yao T. Методам определения травм пострадавших на основе медицинских изображений посвящены работы Ahonen T., Balakrishnan G., Cardoso J.F., Donnelley M.W., Durand F., James C.J., Jia Y., Jian L., Jiang Y., Jiji G.W., Guttag J., Hadid A., Hesse C.W., Hyvärinen A., Karhunen J., Lee J., Liming Z., Linda C.H., McDuff D. J., Najarian K., Oja E., Ohta Y., Pavlidis I., Picard R. W., Pietikainen M., Poh M. Z., Takano C., Verkruysse W., Wang J., Wei Z. Широкое распространение при разработке вопросов применения РТС в различных областях получили теория эффективности (Петухов Г.Б., Юсупов Р.М.) и концепция активных подвижных объектов и проактивного управления (Калинин В.Н., Охтилев М.Ю., Соколов Б.В.). Этими учеными созданы достаточные предпосылки для решения задач обеспечения функционирования РТС.

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.

Объектом исследования является процесс спасения пораженных в результате аварий на опасных производственных объектах.

Предмет исследования – модели и методики поддержки принятия решений о спасении пораженных в результате аварий на опасных производственных объектах.

Целью исследования является повышение эффективности спасения пораженных в результате аварий на опасных производственных объектах за счет разработки и применения моделей и методик поддержки принятия решений о способе их спасения с использованием робототехнических средств.

В соответствии с поставленной целью в работе решены следующие **частные задачи исследования**:

1) проведен проблемно-классификационный анализ работ по спасению пораженных в результате аварий на опасных производственных объектах;

2) разработана модель эффективности процесса спасения пораженных в результате аварий на опасных производственных объектах;

3) разработан комплекс моделей поддержки принятия решений о способе спасения пораженных;

4) разработаны методики поддержки принятия решений о способе спасения пораженных с использованием робототехнических средств;

5) осуществлены экспериментальная проверка разработанного научно-методического инструментария поддержки принятия решений о способе спасения пораженных и моделирование соответствующих процессов с оценкой их эффективности.

Научная новизна полученных в диссертационной работе результатов, выводов и рекомендаций заключается в разработке:

– *модели эффективности процесса спасения пораженных в результате аварий на опасных производственных объектах*, отличающейся применением в качестве показателя эффективности спасения пораженных темпа (интенсивности) их спасения (число спасенных за час работы) и обеспечивающей возможность расчета числа обнаруженных и спасенных пораженных в заданный момент времени;

– *моделей поддержки принятия решений о способе спасения пораженных*, позволяющих выявить травмы пораженного, его категорию в зависимости от степени тяжести травм и положение для транспортировки, основанных на байесовских сетях доверия и обеспечивающих возможность решения задач вероятностного прогнозирования, базирующихся на субъективных и неполных данных, формируемых в результате опроса, осмотра и манипуляций с пораженным;

– *методики оптимизации структуры робототехнических средств спасения пораженных*, основанной на альтернативно-графовой формализации взаимосвязей между различными вариантами построения элементов робототехнического средства и выполняемыми им функциями и позволяющей сократить время выявления травм у пораженного за счет минимизации числа выполняемых функций по определению признаков травм;

– *методики планирования траектории движения робототехнических средств транспортировки пораженных*, основанной на представлении траектории движения в виде ориентированного ациклического графа и использовании алгоритма нахождения K кратчайших путей между двумя заданными вершинами в ориентированном ациклическом графе, отличающейся процедурой назначения весов вершинам указанного графа с учетом габаритных размеров робототехнического средства транспортировки и позволяющей минимизировать время транспортировки пораженных в зону эвакуации;

– *методики выбора способа спасения пораженных в результате аварии на опасных производственных объектах*, описывающей процесс спасения пораженных с использованием робототехнических средств спасения и транспортировки и позволяющей выбрать рациональную последовательность необходимых действий, обеспечивающую повышение числа обнаруженных и спасенных пораженных.

Практическая ценность работы заключается в доведении разработанных моделей и методик поддержки принятия решений о способе спасения пораженных в результате аварий на опасных производственных объектах до конкретных технических решений и рекомендаций, предусматривающих их непосредственное применение при разработке программно-технического обеспечения робототехнических средств спасения пораженных.

Методы и средства исследования. Для выполнения исследований и решения указанных задач использовались элементы теорий эффективности, вероятности, методы статистического анализа, математического программирования, оптимизации, аппарата байесовских сетей доверия и имитационного моделирования.

Положения, выносимые на защиту:

1. Модель эффективности процесса спасения пораженных в результате аварий на опасных производственных объектах.
2. Комплекс моделей поддержки принятия решений о способе спасения пораженных.
3. Методики поддержки принятия решений о способе спасения пораженных с использованием робототехнических средств.

Обоснованность и достоверность научных положений, основных выводов и результатов диссертации обеспечивается за счет анализа состояния исследований в области разработки робототехнических средств различного назначения, согласованности теоретических выводов с результатами экспериментальной проверки моделей, а также апробацией основных теоретических положений диссертации в печатных трудах и докладах на международных и всероссийских научных конференциях.

Апробация результатов работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и получили положительную оценку на 7-й всероссийской научно-практической конференции по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности «Имитационное моделирование. Теория и практика» (Москва, 2015 г.), юбилейной международной научно-практической конференции «Транспорт России: проблемы и перспективы» (Санкт-Петербург, 2015 г.), 2-й Международной молодежной научно-технической конференции «Прогрессивные технологии и процессы» (Курск, 2015 г.), всероссийской научно-практической конференции «Проблемы создания и применения малых космических аппаратов и робототехнических средств в интересах Вооруженных сил Российской Федерации» (Санкт-Петербург, 2016 г.), первой международной научной конференции «Intelligent Information Technologies for Industry» (Ростов-на-Дону, 2016 г.), первой международной конференции «Interactive Collaborative Robotics» (Будапешт, 2016 г.).

Публикации. Основные положения диссертации опубликованы в 12 печатных работах, включая 4 публикации в рецензируемых научных изданиях из перечня Минобрнауки РФ: «Труды СПИИРАН», «Научный вестник НГТУ», «Научные ведомости БелГУ»; 2 публикации в зарубежных изданиях, входящих в систему цитирования в Web of Science/Scopus: Proceedings of the First International Scientific Conference «Intelligent Information Technologies for Industry», Proceedings of the First International Conference on Interactive Collaborative Robotics; получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Реализация результатов работы. Основные результаты диссертационной работы использованы 762 Центральной опытно-конструкторской базой Минобороны России (г. Москва) при разработке тактико-технических требований к техническим средствам медицинской эвакуации, а также в учебном процессе на кафедре автономных систем управления Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (г. Санкт-Петербург) и кафедре управления в технических системах Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, что подтверждено соответствующими актами внедрения.

Личный вклад автора. Автором лично выполнены все этапы диссертационного исследования: постановка задач, создание теоретических модельных описаний, методического и алгоритмического обеспечения, проведение экспериментов, обработка и интерпретация данных, формулировка выводов.

Структура и объем работы. Диссертация изложена на 144 страницах машинописного текста, содержит 21 иллюстрацию и 18 таблиц, состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы (180 наименований) и одного приложения, содержащего 18 иллюстраций и 2 таблицы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана общая характеристика работы, обоснована ее актуальность, проведен анализ исследуемой научной задачи и обоснован подход к ее решению, сформулированы цель и задачи диссертационного исследования, определена научная новизна и практическая ценность полученных результатов, приведены основные положения, выносимые на защиту, и сведения об апробации, публикациях и реализации результатов работы.

В первой главе определены актуальность и возможности РТС и их комплексов, а также и способы их применения для проведения аварийно-спасательных работ, оценены возможности спасения пораженных с их помощью.

В соответствии с действующими нормативными документами при ликвидации последствий ЧС создается временный штаб и составляется предварительный план мероприятий, согласно которому проводятся аварийно-спасательные работы (рис. 1).

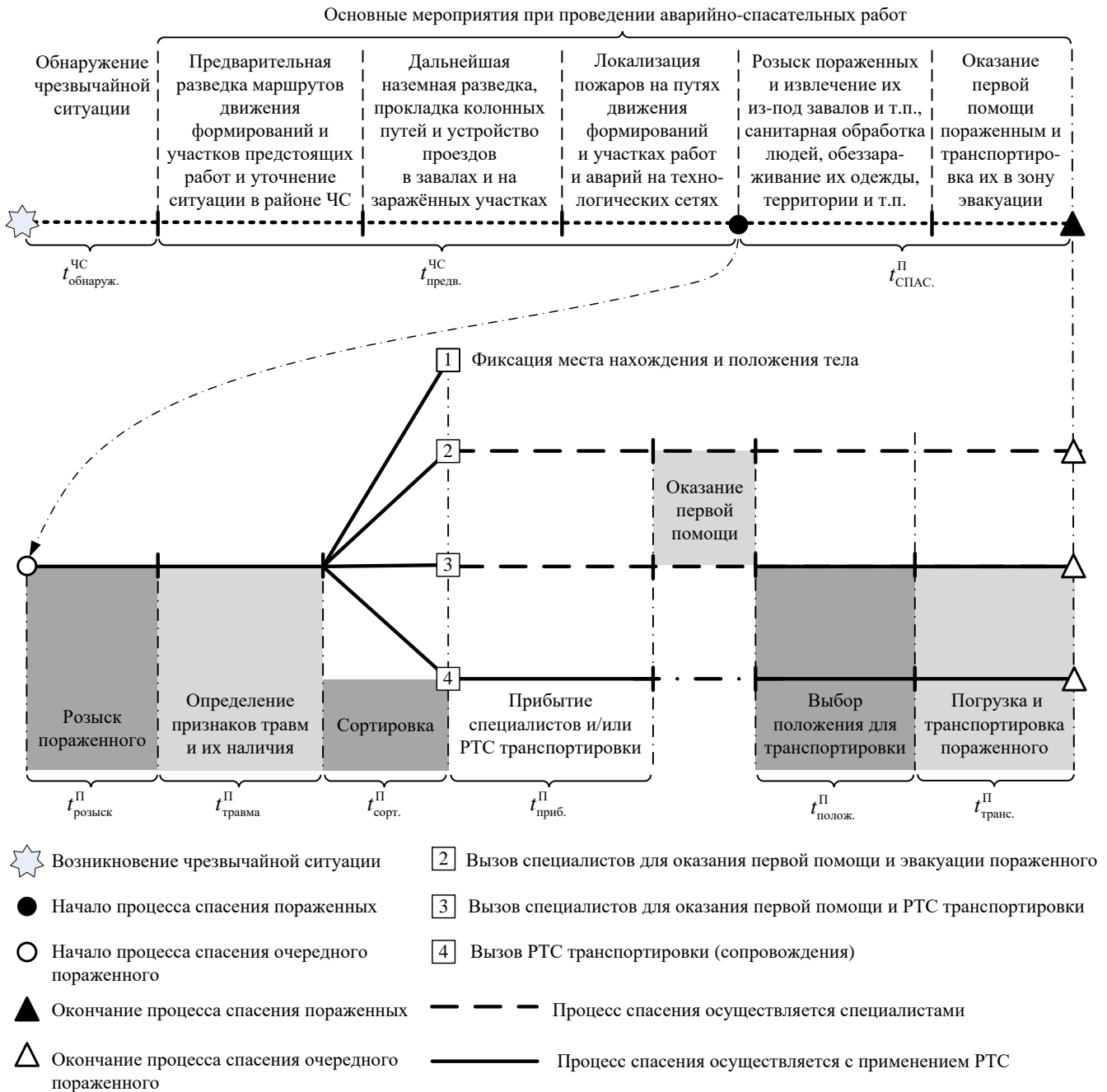


Рисунок 1 – Схема аварийно-спасательных работ на опасных производственных объектах

В настоящее время имеются прототипы и действующие образцы РТС, способные выполнять основные задачи указанных мероприятий. Однако для оказания эффективной помощи пораженным современные подходы требуют наличия у РТС не только сенсорных (датчиков температуры, давления, влажности) и специализированных (компьютерного зрения, анализа и синтеза речи и пр.) систем, но и систем поддержки принятия решений о способах спасения, вытекающих из травм, идентифицируемых у пораженных.

Проведенный анализ показал, что для указанных систем имеются частные научно-технические решения, слабо адаптированные к их реализации в робототехнических средствах, отсюда следует необходимость в разработке модельно-алгоритмического и методического обеспечения поддержки принятия решений о спасении пораженных в результате аварий на ОПО.

Во второй главе обосновано применение концепции активных подвижных объектов для решения задачи повышения эффективности спасения пораженных, предложена модель эффективности такого спасения, поставлены частные задачи оптимизации соответствующего процесса.

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

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

Учитывая существующее многообразие способов $S_i^{\text{РОЗЫСК}}$, $S_i^{\text{ТРАВМА}}$, $S_i^{\text{КАТЕГОРИЯ}}$, $S_i^{\text{РЕШЕНИЕ}}$, $S_i^{\text{ПРИБЫТИЕ}}$, $S_i^{\text{ПОМОЩЬ}}$, $S_i^{\text{ПОЛОЖЕНИЕ}}$, $S_i^{\text{ТРАНСПОРТИРОВКА}}$, 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 число пораженных в единицу времени:

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

где $M[\]$ – математическое ожидание; $N_{\text{сп}}$ – число 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.

За основу для определения эффективности работ по спасению принят известный закон гибели пораженных:

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

где α – показатель темпа гибели; $T_{\text{сп}}$ – среднее время выживания с момента возникновения ЧС до гибели пораженного, чел. Тогда в качестве показателя эффективности спасения пораженных целесообразно использовать темп (интенсивность) их спасения (число спасенных за час работы), который в том числе

зависит 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, предварающих 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:

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

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 таблице 1.

Таблица 1 – 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	$S_i^{\text{РЕШЕНИЕ}}$	$\sum_{i=1}^{N_{\text{СП}}} t_{\text{СПАС.}i}^{\text{П}} \rightarrow \min, N_{\text{СП}} \rightarrow \max$	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 избранной позы для транспортировки

В третьей главе представлен комплекс моделей поддержки принятия решений о способе спасения пораженных (рис. 2), основанный на 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.

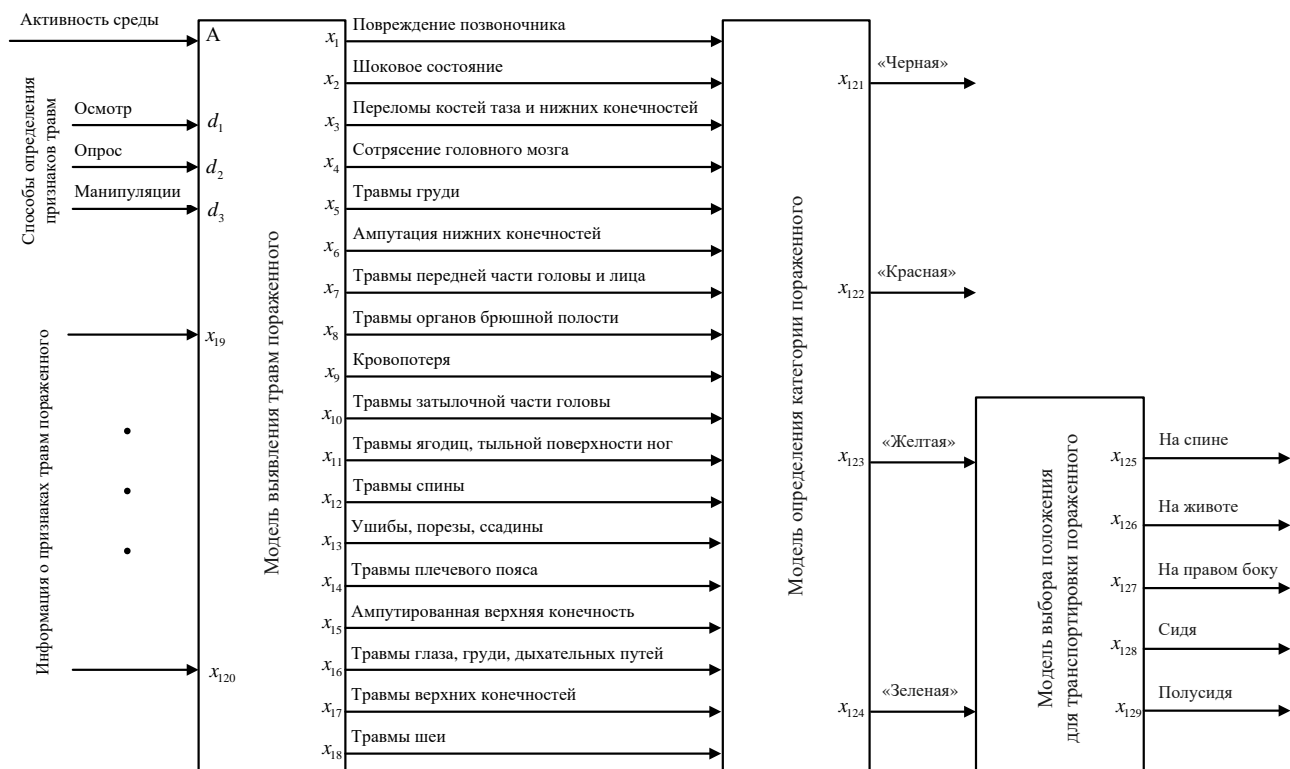


Рисунок 2 – Комплекс моделей поддержки принятия решений о способе спасения пораженных

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

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

где \mathbf{T} – ациклический направленный граф; \mathbf{P}_T – множество параметров, определяющих БСД. Вершинами графа \mathbf{T} являются:

1) дискретные переменные, обозначающие наиболее распространенные травмы – x_1, \dots, x_{18} ; признаки травм (потеря сознания, неестественное положение шеи и спины, тахикардия, головная боль, рвота, нарушение речи и т.д.) – x_{19}, \dots, x_{120} ; способы определения признаков травм (осмотр, опрос, манипуляции) – d , которые связаны с переменными x_{19}, \dots, x_{120} ; активность среды – A , от которой зависит применение способов определения травм;

2) вершина действия, обозначающая обнаружение пораженного, – O .

К параметрам \mathbf{P}_T относятся:

1) для вершины A – априорные (безусловные) вероятности $P(\tilde{A}_m)$, $m = 1 \dots 4$ того, что активность среды «высокая», «средняя», «низкая» или «отсутствует». Знак « \sim » обозначает положительное или отрицательное означивание переменной \tilde{x} ;

2) для вершин x_{19}, \dots, x_{120} – условные вероятности $P(\tilde{x}_k | \tilde{d}_n)$, $k = 19 \dots 120$; $n = 1 \dots 3$ зависимости признаков травм от способов их определения;

3) для вершин x_1, \dots, x_{18} – условные вероятности $P(\tilde{x}_j | \tilde{x}_k)$, $j = 1 \dots 18$, $k = 19 \dots 120$ зависимости травм от их признаков.

В предложенной модели выделены следующие подграфы: T_0 «Условия определения признаков травм», определяющий взаимосвязи между вершинами A , O и способами определения признаков травм d_1, \dots, d_3 ; T_1 «Повреждение позвоночника»; T_2 «Шоковое состояние»; T_3 «Переломы костей таза и нижних конечностей»; T_4 «Сотрясение головного мозга»; T_5 «Травмы груди»; T_6 «Ампутированная нижняя конечность»; T_7 «Травмы передней части головы и лица»; T_8 «Травмы органов брюшной полости»; T_9 «Кровопотеря»; T_{10} «Травмы затылочной части головы»; T_{11} «Травмы ягодиц, тыльной поверхности ног»; T_{12} «Травмы спины»; T_{13} «Ушибы, порезы, ссадины»; T_{14} «Травмы плечевого пояса»; T_{15} «Ампутированная верхняя конечность»; T_{16} «Травмы глаза, груди, дыхательных путей»; T_{17} «Травмы верхних конечностей»; T_{18} «Травмы шеи».

Для подграфа T_4 на начальном этапе формирования таблицы условных вероятностей допускается независимость появления событий $(x_2, x_{46} \dots x_{55})$ и равнозначность их вклада в формирование апостериорной вероятности события x_4 «Сотрясение головного мозга», тогда:

$$p(x_4 | \tilde{x}_2 \tilde{x}_{46} \tilde{x}_{47} \tilde{x}_{48} \tilde{x}_{49} \tilde{x}_{50} \tilde{x}_{51} \tilde{x}_{52} \tilde{x}_{53} \tilde{x}_{54} \tilde{x}_{55}) = 0,1, \quad (12)$$

если в (12) имеет место одна пропозициональная формула x_i , $i = 2, 46, 47, 48 \dots 55$;

$$p(x_4 | \tilde{x}_2 \tilde{x}_{46} \tilde{x}_{47} \tilde{x}_{48} \tilde{x}_{49} \tilde{x}_{50} \tilde{x}_{51} \tilde{x}_{52} \tilde{x}_{53} \tilde{x}_{54} \tilde{x}_{55}) = 0,2, \quad (13)$$

если в (13) имеет место две пропозициональные формулы $x_i, i = 2, 46, 47, 48 \dots 55$; и так далее, вплоть до случая:

$$P(x_4 | \tilde{x}_2 \tilde{x}_{46} \tilde{x}_{47} \tilde{x}_{48} \tilde{x}_{49} \tilde{x}_{50} \tilde{x}_{51} \tilde{x}_{52} \tilde{x}_{53} \tilde{x}_{54} \tilde{x}_{55}) = 1.$$

Аналогичный подход справедлив для всех подграфов T_1, \dots, T_{18} травм ($x_6 \dots x_{23}$).

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

$$\langle \mathbf{C}, \mathbf{P}_C \rangle, \quad (14)$$

где \mathbf{C} – ациклический направленный граф (рис. 3); \mathbf{P}_C –

условные вероятности $P(\tilde{x}_i | \tilde{x}_j), i = 121 \dots 124, j = 1 \dots 18$,

зависимости категории пораженных от полученных ими травм.

По результатам моделирования процесса определения категории пораженного делается вывод о необходимости

1) фиксации положения тела для проведения дальнейших экспертиз, если пораженный отнесен к категории «Чёрная»;

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 категории «Желтая» или «Зеленая».

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

$$\langle \mathbf{G}, \mathbf{PAR} \rangle, \quad (15)$$

где \mathbf{G} – ациклический направленный граф (рис. 4); \mathbf{PAR} –

условные вероятности $P(\tilde{x}_i | \tilde{x}_j), i = 121 \dots 125, j = 1 \dots 18$

зависимости положений для транспортировки от травм:

$$P(x_{125} | \tilde{x}_1 \tilde{x}_2 \tilde{x}_3 \tilde{x}_4 \tilde{x}_5 \tilde{x}_6 \tilde{x}_7 \tilde{x}_8) = 1,$$

если имеет место хотя бы одна пропозициональная формула $x_i, i = 1 \dots 8$;

$$P(x_{126} | \tilde{x}_9 \tilde{x}_{10} \tilde{x}_{11} \tilde{x}_{12}) = 1,$$

если имеет место хотя бы одна пропозициональная формула $x_i, i = 9 \dots 12$;

$$P(x_{126} | x_9 x_{10} x_{11} x_{12}) = 1; P(x_{126} | \bar{x}_9 \bar{x}_{10} \bar{x}_{11} x_{12}) = 0,5;$$

$$P(x_{126} | \tilde{x}_9 \tilde{x}_{10} \tilde{x}_{11} x_{12}) = 0,75,$$

при любом другом сочетании пропозициональных формул x_i и их отрицаний $\bar{x}_i (i = 9 \dots 12)$;

$$P(x_{127} | x_{12}) = 1; P(x_{127} | \bar{x}_{12}) = 0; P(x_{128} | \tilde{x}_{13} \tilde{x}_{14} \tilde{x}_{15} \tilde{x}_{16} \tilde{x}_{17}) = 1,$$

если имеет место хотя бы одна пропозициональная формула $x_i, i = 13 \dots 17$;

$$P(x_{129} | x_{18}) = 1; P(x_{129} | \bar{x}_{18}) = 0.$$

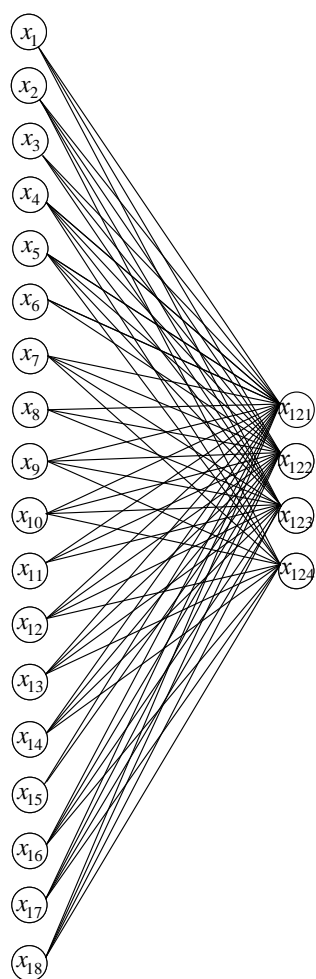


Рисунок 3 – Модель определения категории пораженного

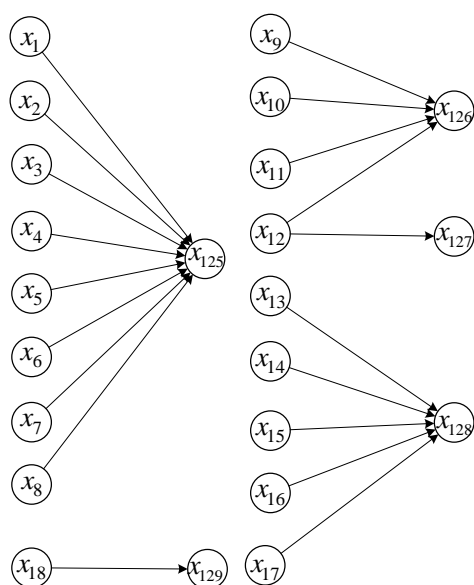


Рисунок 4 – Модель положения для транспортировки пораженного

Оптимальное положение для транспортировки выбирается следующим образом:

$$x^* = \underset{x_i \in \{x_{125}, \dots, x_{129}\}}{\text{Arg max}} \{P(x_i | \tilde{x}_1, \dots, \tilde{x}_{18})\} \quad (16)$$

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.

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.

В четвертой главе представлены методики поддержки принятия решений о способе спасения пораженных с использованием робототехнических средств, а также результаты экспериментальной проверки разработанного инструментария.

Результаты анализа информативности признаков травм, представленные в третьей главе, 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.

Задача синтеза структуры РТС при этом представлена следующим образом:

$$\begin{aligned} \text{extr} \mathfrak{R}_0 \left\{ \left(G_I^* \in G_I \right) \mathfrak{R}^* \left(G_J^* \in G_J \right) \right\}, \\ \mathfrak{R}_\eta \left\{ \left(G_I^* \in G_I \right) \mathfrak{R}^* \left(G_J^* \in G_J \right) \right\}, \quad \eta = \overline{1, \eta_0}, \mathfrak{R}^* \in \mathfrak{R}, \end{aligned} \quad (17)$$

где G_J – граф, соответствующий составу и взаимосвязям возможных узлов РТС; $G_J^* \in G_J$ – подграф, задающий один из возможных вариантов реализации узлов РТС с их взаимосвязями, при этом вершины графа G_J отождествляются с вариантами построения узлов переработки информации, возможными местами их размещения,

комплексами технических средств и т.д., а его дуги отражают взаимосвязи между узлами; G_I – граф взаимосвязей выполнения альтернативных функций системы; $G_I^* \in G_I$ – подграф, задающий один из возможных вариантов реализации функций системы, при этом вершины графа G_I отождествляются с процедурами обработки информации, задачами управления и их этапами и т.п., а дуги отражают взаимосвязи временного, логического и объемного типа; \mathfrak{R} – операция отображения графа G_I на G_J , определяющая распределение выполняемых системой функций по ее узлам; $n_\eta (\eta = \overline{1, \eta_0})$ – характеристики качества функционирования РТС.

В такой постановке задача (17) может быть решена средствами математического программирования, а методика оптимизации структуры РТС спасения пораженных представлена следующим образом:

Шаг 1.1. Формирование исходных данных: множества задач ($i = \overline{1, I}$) (этапов $m = \overline{1, m_i}$), выполняемых РТС, и их вариантов ($k = \overline{1, K}$), множества узлов системы ($j = \overline{1, J}$) и вариантов их построения ($p = \overline{1, P_j}$).

Шаг 1.2. Формирование ограничений на затраты функционирования:

$$\sum_{i, m, n, j} B_{imnj} x_{imnj} x_{i'm'n'j'} \leq B \quad (18)$$

и загрузку узлов:

$$\sum_{i, k, m, n} R_{ikmnt}^\gamma x_{ikmnt} \leq R_{jpt}^\gamma - P_{jpt}^\gamma, \quad j = \overline{1, J}, \quad \gamma = \overline{1, \gamma_0}, \quad (19)$$

где $B_{imnj} = \alpha_{imnj}$, если $imnj = i'm'n'j'$; $B_{imnj} = \beta_{imni'm'n'} \gamma_{j'j'l}$, если $imnj \neq i'm'n'j'$; α_{imnj} – затраты ресурсов на решение m -го этапа i -й задачи в j -м узле; $\beta_{imni'm'n'}$ – средний поток информации между mn -этапом i -й задачи и $m'n'$ -этапом i' -й задачи в процессе функционирования системы; $\gamma_{j'j'l}$ – затраты ресурсов на передачу единицы объема информации из узла j в узел j' , оснащенных техническими средствами l -го и l' -го типа соответственно; R_{ikmnt}^γ – количество ресурсов γ -го типа в период t , необходимое для выполнения m -го этапа i -й задачи; P_{jpt}^γ – ресурсы, необходимые для выполнения оперативных задач; x_{ik} – вариант решения задачи; x_{imn} – вариант решения этапа; x_{imj} – объем задачи; x_{jp} – вариант реализации узла; x_{imnj} – вариант решения задачи, вариант этапа и узел, в котором он выполняется; x_{ikmj} – вариант решения задачи, способ, вариант этапа и узел, в котором он выполняется.

Шаг 1.3. Постановка задачи синтеза структуры РТС спасения пораженных:

$$F_0(x_{ik}, x_{imn}, x_{imj}, x_{jp}) \rightarrow \text{opt}, \quad (20)$$

где F_0 – оптимизируемые показатели качества, например $t_{\text{травма}}^\Pi$.

Шаг 1.4. Решение задачи оптимизации структуры РТС спасения пораженных методами целочисленного программирования.

Шаг 1.5. Формирование структуры РТС спасения пораженных в результате аварий на ОПО.

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.

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 K кратчайших путей 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.

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. 8), основанная на использовании представленного выше модельно-алгоритмического и методического обеспечения.

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, $T_{\text{сп}} = 4$ 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.

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.

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

В заключении сформулированы основные результаты и выводы по работе.

В приложении представлены травмы и их признаки, взаимосвязь и признаки определения.

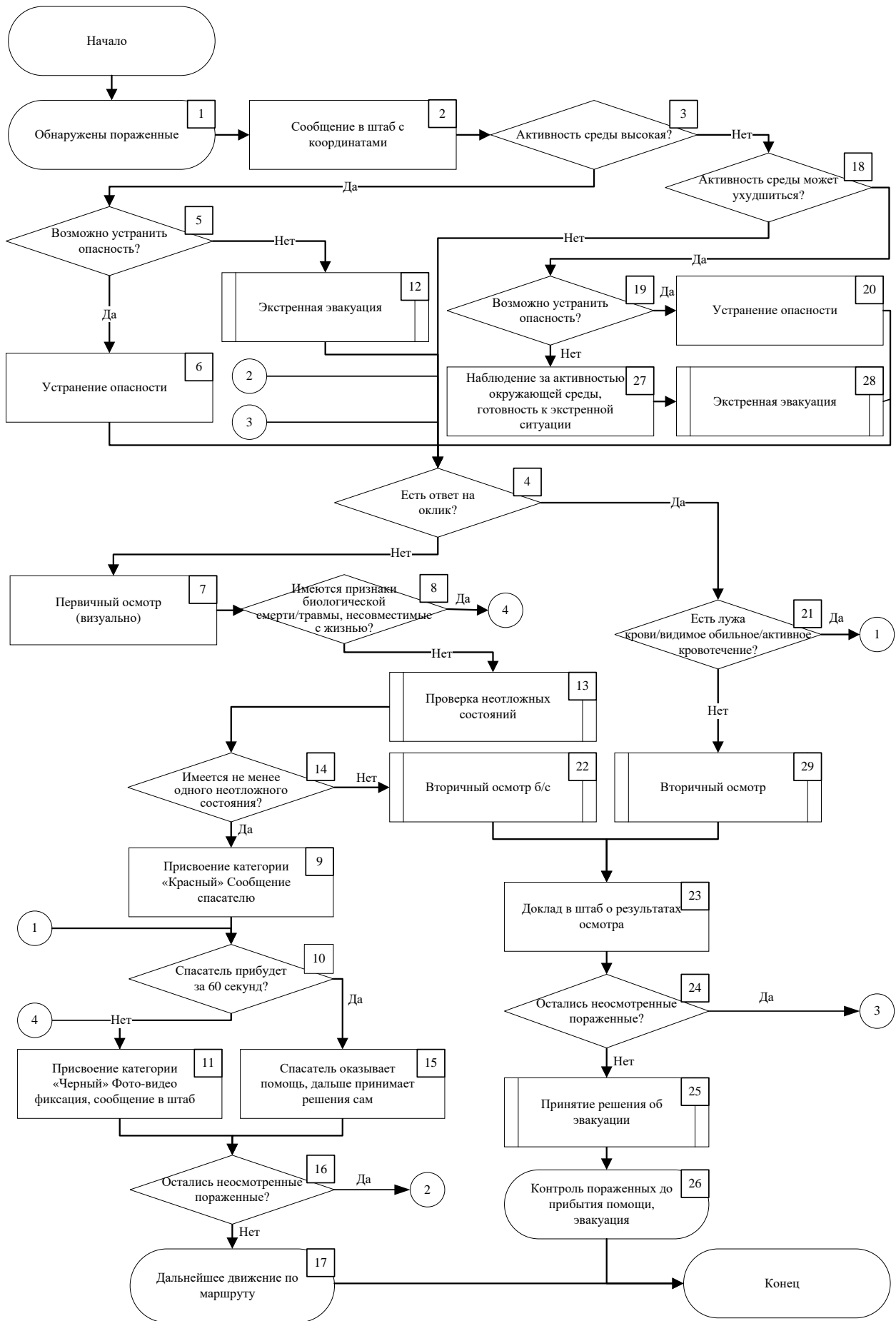


Рисунок 8 – Блок-схема методики выбора способа спасения пораженного

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена актуальная задача разработки моделей и методик поддержки принятия решений о спасении пораженных с использованием робототехнических средств, обеспечивающих повышение эффективности их спасения. На основании проведенного исследования сформулированы следующие выводы.

1. В результате проблемно-классификационного анализа работ по спасению пораженных в результате аварий на опасных производственных объектах установлено, что в настоящее время имеются прототипы и действующие образцы робототехнических средств, способных выполнять основные этапы аварийно-спасательных работ. Для спасения пораженных требуется наличие у таких средств сенсорных (датчики температуры, давления, влажности) и специализированных (компьютерного зрения, анализа и синтеза речи) систем, а также систем поддержки принятия решений о травмах, полученных пораженными, категории последних, определяющей способ их спасения, и положения для транспортировки пораженных, нуждающихся в эвакуации. Для указанных задач поддержки принятия решений имеются частные 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, позволяющего повысить эффективность спасения людей, заболевших, травмированных или раненых в результате поражающего воздействия источника техногенной ЧС.

2. Предложена модель эффективности процесса спасения пораженных в результате аварий на опасных производственных объектах, обеспечивающая возможность расчета числа обнаруженных и спасенных пораженных в заданный момент времени. Общая задача повышения эффективности процесса спасения пораженных формализована в следующем виде: необходимо найти оптимальный способ спасения (последовательность действий, связанная с розыском пораженных, определением признаков травм и их наличия, определением категории пораженного, выработкой решения относительно дальнейших действий, прибытием специалистов и/или РТС транспортировки, оказанием первой помощи на месте, выбором положения для транспортировки, погрузкой и транспортировкой пораженного в зону эвакуации), при котором достигается максимум числа спасенных пораженных за заданное время. Для снижения сложности общей задачи исследования она была декомпозирована на частные задачи повышения эффективности спасения путем разделения способа спасения пораженных на отдельные действия, а времени спасения на отдельные составляющие.

3. Предложен комплекс моделей поддержки принятия решений о способе спасения пораженных, основанных на байесовских сетях доверия, учитывающих 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. 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. Представлены результаты ранжирования указанных признаков по длительности произнесения, вычислительной сложности алгоритма и времени проведения соответственно, позволяющие синтезировать алгоритмы оценки признаков травм, состояния пораженного и оптимизировать алгоритм вероятностного вывода при ограничении времени выявления травм у пораженного.

4. Предложена методика оптимизации структуры робототехнического средства спасения пораженных, обеспечивающая возможность конфигурирования робототехнического средства, осуществляющего поиск пораженного, определение признаков полученных им травм и степени их тяжести, выбор положения для транспортировки, выработку решения относительно дальнейших действий. Оптимизация производится по критерию минимума времени выявления травм у пораженного за счет минимизации числа функций по определению признаков травм.

5. Представлена модифицированная методика планирования траектории движения робототехнических средств транспортировки пораженных, позволяющая минимизировать время транспортировки в зону эвакуации за счет минимизации проходимых им путей с учетом габаритных показателей робототехнического средства и эвакуируемого пораженного в оптимальной позе для транспортировки.

6. Предложена методика выбора способа спасения пораженного в результате аварии на опасном производственном объекте, позволяющая повысить эффективность спасения пораженных с использованием робототехнических средств спасения и транспортировки на основе применения разработанного модельно-алгоритмического и методического обеспечения. Результаты проведенных экспериментов по проверке разработанного научно-методического инструментария поддержки принятия решений о спасении пораженных показали, что применение предложенных моделей и методик позволяет существенно (до 2,5 раз) увеличить число спасенных пораженных.

Полученные результаты соответствуют пунктам «2. Формализация и постановка задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации», «3. Разработка критериев и моделей описания и оценки эффективности решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации», «4. Разработка методов и алгоритмов решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации» паспорта специальности 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в журналах, входящих в перечень ВАК:

1. Мотиенко, А.И. Анализ и моделирование процесса выбора положения для транспортировки пострадавшего на основе байесовских сетей доверия / Мотиенко А.И., Макеев С.М., Басов О.О. // Труды СПИИРАН. – 2015. – Вып. 43. – С. 135–155.

2. Мотиенко, А.И. Современные разработки аварийно-спасательных роботов: возможности и принципы их применения / Мотиенко А.И., Ронжин А.Л., Павлюк Н.А. // Научный вестник НГТУ. – 2015. – Том 60. – №3. – С. 147–165.

3. Мотиенко, А.И. Планирование тактической траектории движения автоматизированных робототехнических средств при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций / Мотиенко А.И. // Научный вестник БелГУ. – 2016. – № 2(223). – Вып. 37 – С. 139–143.

4. Мотиенко, А.И. Проактивное управление робототехническими системами спасения пострадавших / Мотиенко А.И., Тарасов А.Г., Дорожко И.В., Басов О.О. // Труды СПИИРАН. – 2016. – Вып. 46. – С. 174–195.

Статьи в зарубежных изданиях:

5. Motienko, A.I. Modeling of Injured Position During Transportation Based on Bayesian Belief Networks / Motienko A.I., Ronzhin A.L., Basov O.O., Zelezny M. // Proceedings of the First International Scientific Conference “Intelligent Information Technologies for Industry” (ITI’16). Springer International Publishing. – 2016. – pp. 81–88.

6. Motienko, A. Proactive Robotic Systems for Effective Rescuing Sufferers / A. Motienko, I. Dorozhko, A. Tarasov, O. Basov // Interactive Collaborative Robotics: First International Conference (ICR 2016). – 2016. – LNCS 9812. – P. 172–180.

Основные статьи и доклады в материалах конференций:

7. Мотиенко, А.И. Применение автоматизированных робототехнических средств транспортировки для оказания первой помощи пострадавшим / Мотиенко А.И., Басов О.О. // Сборник научных статей 2-й Международной молодежной научно-технической конференции «Прогрессивные технологии и процессы». Курск, 2015. – С. 216–220.

8. Мотиенко, А.И. Вероятностная модель положения транспортировки пострадавшего / Мотиенко А.И., Басов О.О. // Сборник трудов 7-й Всероссийской научно-практической конференции по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД-2015). – 2015. – С. 230–235.

9. Мотиенко, А.И. Обеспечение деятельности специализированных аварийно-спасательных служб при возникновении техногенных катастроф / Мотиенко А.И., Басов О.О., Павлюк Н.А. // Транспорт России: проблемы и перспективы – 2015. Материалы Юбилейной Международной научно-практической конференции. СПб.: ИПТ РАН. Санкт-Петербург, 2015. – Том 2. – С. 181–185.

10. Мотиенко, А.И. Автоматизированные робототехнические средства транспортировки раненых / Мотиенко А.И., Басов О.О., Ронжин А.Л. // Труды военно-научной конференции «Роботизация Вооруженных Сил Российской Федерации». Москва, 2016. – С. 242–248.

11. Мотиенко, А.И. Представление знаний в аварийно-спасательных робототехнических системах на основе байесовских сетей доверия / Мотиенко А.И., Басов О.О., Дорожко И.В., Тарасов А.Г. // Сборник трудов Всероссийской научно-практической конференции «Проблемы создания и применения малых космических аппаратов и робототехнических средств в интересах Вооруженных сил Российской Федерации». – 2016. – С. 469–474.

Патенты на изобретения и полезные модели, свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ:

12. Мотиенко, А.И. Анкетирование эксперта по травмам / Мотиенко А.И., Бухарин В.В. // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016619548 от 23.08.2016.