

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации
Российской академии наук
(СПИИРАН)

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 системы)

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук
Басов Олег Олегович

Санкт-Петербург – 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1. ПРОБЛЕМНО-КЛАССИФИКАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ АВАРИЙНО-СПАСАТЕЛЬНЫХ РАБОТ НА ОПАСНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТАХ	11
1.1. Анализ сущности и условий проведения аварийно-спасательных работ на опасных производственных объектах	11
1.2. Анализ возможности и способов применения существующих робототехнических средств для проведения аварийно-спасательных работ	19
1.3. Анализ научно-методического аппарата и программно-алгоритмических решений для обеспечения возможности спасения пораженных с помощью робототехнических средств	33
1.4. Выводы по первой главе.....	40
2. ПОДХОДЫ К ПОВЫШЕНИЮ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА СПАСЕНИЯ ПОРАЖЕННЫХ В РЕЗУЛЬТАТЕ АВАРИЙ НА ОПАСНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТАХ	42
2.1. Обоснование применения концепции активных подвижных объектов для решения задачи повышения эффективности спасения пораженных..	42
2.2. Модель эффективности процесса спасения пораженных в результате аварий на опасных производственных объектах	46
2.3. Постановка частных задач повышения эффективности процесса спасения пораженных	51
2.4. Выводы по второй главе.....	58
3. КОМПЛЕКС МОДЕЛЕЙ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ О СПОСОБЕ СПАСЕНИЯ ПОРАЖЕННЫХ.....	59
3.1. Формализация процесса принятия решений о способе спасения пораженного	59
3.2. Модель выявления травм у пораженного.....	62

3.3. Модель определения категории пораженного	66
3.4. Модель выбора положения для транспортировки пораженного	68
3.5 Анализ процесса принятия решений о способе спасения пораженного	71
3.6. Анализ информативности признаков травм.....	74
3.7. Выводы по третьей главе	83
4. МЕТОДИКИ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ О СПОСОБЕ СПАСЕНИЯ ПОРАЖЕННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ	85
4.1. Методика оптимизации структуры робототехнических средств спасения пораженных	85
4.2. Методика планирования траектории движения робототехнических средств транспортировки пораженных.....	91
4.3. Методика выбора способа спасения пораженного в результате аварии на опасном производственном объекте	94
4.4. Экспериментальная проверка разработанных моделей и методик поддержки принятия решений о способе спасения пораженных	103
4.5. Выводы по четвертой главе	108
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	110
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	113
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ.....	133
ОПРЕДЕЛЕНИЯ.....	134
ПРИЛОЖЕНИЕ А. ТРАВМЫ И ИХ ПРИЗНАКИ, ВЗАИМОСВЯЗЬ И СПОСОБЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ.....	136

ВВЕДЕНИЕ

На территории нашей страны функционирует более 45 тыс. опасных производственных объектов (ОПО), представляющих потенциальную опасность 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 людей, заболевших, травмированных или раненых в результате поражающего воздействия источника ЧС (согласно ГОСТ Р 22.0.02-94 – *пораженных*) направлены аварийно-спасательные работы. Последние характеризуются наличием факторов, угрожающих жизни и здоровью проводящих эти работы людей (спасателей, пожарных и др.), и 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. Большим количеством авторов и научных школ выполнен значительный объем научных и экспериментальных исследований, посвященных вопросам разработки модельно-алгоритмического и методического обеспечения РТС. 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 и видеосигнала (рентгеновских снимков, сделанных при помощи компьютерной томографии и данных, полученных при помощи ультразвуковых исследований) 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 системо-технических 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 (последовательности действий, связанной 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), позволяющего повысить эффективность спасения людей, заболевших, травмированных или раненых в результате поражающего воздействия источника техногенной ЧС. 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 поставлены и решены следующие **частные задачи исследования**:

- проведен проблемно-классификационный анализ работ по спасению пораженных в результате аварий на опасных производственных объектах;
- разработана модель эффективности процесса спасения пораженных в результате аварий на опасных производственных объектах;
- разработан комплекс моделей поддержки принятия решений о способе спасения пораженных;
- разработаны методики поддержки принятия решений о способе спасения пораженных с использованием робототехнических средств;
- осуществлены экспериментальная проверка разработанного научно-методического инструментария поддержки принятия решений о способе спасения пораженных и моделирование соответствующих процессов с оценкой их эффективности.

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.

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;

– *комплекса 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, базируясь 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 минимизировать 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 алгоритме 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.

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 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» (ИММОД-2015), (21-23 октября 2015 г., Москва), Юбилейной международной научно-практической конференции «Транспорт России: проблемы и перспективы – 2015 (2015, г. Санкт-Петербург), 2-й Международной молодежной научно-технической конференции «Прогрессивные технологии и процессы» (2015, г. Курск), Всероссийской научно-практической конференции «Проблемы создания и применения малых космических аппаратов и робототехнических средств в интересах Вооруженных сил Российской Федерации» (12 – 13 апреля 2016, г. Санкт-Петербург), First International Scientific Conference “Intelligent Information Technologies for Industry” (ИТИ’16) (May 16-21, 2016, Rostov-on-Don – Sochi, Russia).

Публикации. Основные положения диссертации опубликованы в 13 печатных работах, включая 8 публикаций в рецензируемых научных изданиях из перечня Минобрнауки РФ: «Труды СПИИРАН», «Научный вестник НГТУ», «Научные ведомости БелГУ», Вестник ТвГУ; 4 публикации в зарубежных изданиях, входящих в систему цитирования Web of Science/Scopus: Proceedings of the First International Scientific Conference «Intelligent Information Technologies for Industry», Proceedings of the 18th International Conference on Human-Computer Interaction (HCI International 2016), Proceedings of 13th International Symposium on Neural Networks (ISNN 2016), Proceedings of the First International Conference on Interactive Collaborative Robotics (ICR 2016); получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Реализация результатов работы. Основные результаты диссертационной работы использованы при разработке тактико-технических требований к техническим средствам медицинской эвакуации 762 Центральной опытно-конструкторской базой Минобороны России (г. Москва), 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.

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.

1. ПРОБЛЕМНО-КЛАССИФИКАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ АВАРИЙНО-СПАСАТЕЛЬНЫХ РАБОТ НА ОПАСНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТАХ

1.1. Анализ сущности и условий проведения аварийно-спасательных работ на опасных производственных объектах

Согласно данным мировой статистики (начиная со второй половины XX века) первое место в перечне причин смерти трудоспособного населения в возрасте до 45 лет занимают травмы. В свою очередь, на втором месте (после дорожно-транспортных происшествий) среди причин такой смертности находятся чрезвычайные ситуации. Они возникают при стихийных явлениях (землетрясениях, наводнениях, оползнях и т.п.) и техногенных авариях. Последние характерны для *опасных производственных объектов* [85], на которых:

1) получают, используются, перерабатываются, образуются, хранятся, транспортируются, уничтожаются воспламеняющиеся, окисляющие, горючие, взрывчатые, токсичные, высокотоксичные вещества, а также вещества, представляющие опасность для окружающей среды;

2) используется оборудование, работающее под избыточным давлением более 0,07 мегапаскаля пара, газа либо воды при температуре нагрева более 115 градусов Цельсия;

3) используются стационарно установленные грузоподъемные механизмы (за исключением лифтов, подъемных платформ для инвалидов), эскалаторы в метрополитенах, канатные дороги, фуникулеры;

4) получают, транспортируются, используются расплавы черных и цветных металлов, сплавы на основе этих расплавов с применением оборудования, рассчитанного на максимальное количество расплава 500 килограммов и более;

5) ведутся горные работы (за исключением добычи общераспространенных полезных ископаемых и разработки россыпных месторождений полезных

ископаемых, осуществляемых открытым способом без применения взрывных работ), работы по обогащению полезных ископаемых;

б) осуществляется хранение или переработка растительного сырья, в процессе которых образуются взрывоопасные пылевоздушные смеси, способные самовозгораться, возгораться от источника зажигания и самостоятельно гореть после его удаления, а также осуществляется хранение зерна, продуктов его переработки и комбикормового сырья, склонных к самосогреванию и самовозгоранию.

Для отнесения объектов в составе организации по определенным признакам к категории ОПО и определения его типа осуществляется их идентификация [159]. В наибольшей степени аварийность свойственна ОПО в угольной, горнорудной, химической, нефтегазовой и металлургической промышленности, на транспорте. Опасность в техногенной сфере представляют транспортные аварии, взрывы и пожары, радиационные аварии, аварии с выбросом аварийно химически опасных веществ и др.

Нарастание риска возникновения техногенных ЧС в России обусловлено тем, что:

в последние годы в наиболее ответственных отраслях ОПО имеют выработку проектного решения на уровне 50-70%;

снижен уровень профессиональной подготовки персонала промышленных предприятий, производственной и технологической дисциплины;

наблюдаются технологическая отсталость производства и низкие темпы внедрения безопасных технологий.

Показатели риска возникновения ЧС на ОПО в России превышают показатели приемлемых рисков, достигнутых в мировой практике.

На территории страны функционирует более 45 тыс. ОПО. В их числе 3 600 объектов, имеющих значительные запасы аварийно химически опасных веществ (АХОВ), свыше 8 тысяч взрыво- и пожароопасных объектов, 10 АЭС с 30 ядерными энергетическими установками, 113 исследовательских ядерных установок, 12 предприятий ядерного топливного цикла, 16 специальных

комбинатов по переработке и захоронению радиоактивных отходов. Все они представляют потенциальную опасность в случае возникновения на них аварий и катастроф, сопровождающихся выбросами АХОВ и радиоактивных веществ. Тяжесть последствий может усугубляться и тем, что на радиационно-дестабилизированных территориях проживает 10 млн. человек, а на территориях возможного химического заражения – 60 млн. человек. За год происходит около 220 тыс. пожаров, 70% которых приходится на непромышленную сферу. Ежегодно во время пожаров погибает 12-16 тыс. человек. В стране эксплуатируется более 30 тыс. водохранилищ и несколько сотен накопителей промышленных отходов. Гидротехнические сооружения на 200 водохранилищах и 56 накопителях отходов эксплуатируются без реконструкции более 50 лет и находятся в предаварийном состоянии [35].

Следует различать следующие категории людей, попавших в зону ЧС [17].

Пострадавший в ЧС – человек, пораженный либо понесший материальные убытки в результате возникновения ЧС.

Пораженный в ЧС – человек, заболевший, травмированный или раненый в результате поражающего воздействия источника ЧС

Под *источником ЧС* следует понимать опасное природное явление, аварию или опасное техногенное происшествие, широко распространенную инфекционную болезнь людей, сельскохозяйственных животных и растений, а также применение современных средств поражения, в результате чего произошла или может возникнуть ЧС. Независимо от источника технологической ЧС все они имеют практически одни и те же факторы негативного воздействия на человека и среду его обитания:

термическое воздействие (пожары в зданиях и сооружениях, пожары разлива, лесные пожары и т.п.);

барическое воздействие (воздействие ударной волны при взрыве взрывчатых веществ, газо-воздушных смесей, технологических установок и т.п.);

токсическое воздействие (выбросы АХОВ при химических авариях, выпускных газов автотранспорта, продуктов горения при пожарах и т.п.);

механическое воздействие (при поражении осколками, обрушении зданий и сооружений и т.д.);

электромагнитное воздействие (при радиационной аварии, от высоковольтных линий электропередач и работы высокочастотных приемно-передающих установок и бытовых устройств);

акустическое воздействие (от промышленных установок, реактивных самолетов, городского транспорта и т.д.);

радиационное воздействие (при радиационной аварии, рентгеновских исследованиях в медицине, приеме радоновых ванн и т.д.).

На ликвидацию ЧС направлено проведение аварийно-спасательных и других неотложных работ, являющееся одной из основных задач Единой государственной системы предупреждения и ликвидации ЧС [53].

Аварийно-спасательные и другие неотложные работы – совокупность первоочередных работ в зоне ЧС, заключающихся в спасении и оказании помощи людям, локализации и подавлении очагов поражающих воздействий, предотвращении возникновения вторичных поражающих факторов, защите и спасении материальных и культурных ценностей [6].

В работе [38] приводится классификация следующих видов аварийно-спасательных и других неотложных работ: поисково-спасательные; горноспасательные; газоспасательные; противofонтанные работы (на буровых и нефтяных скважинах); аварийно-спасательные работы, связанные с тушением пожаров; работы по ликвидации медико-санитарных последствий ЧС; другие работы, перечень которых может быть дополнен решением Правительства Российской Федерации.

Аварийно-спасательные работы проводятся в целях поиска и деблокирования пострадавших, оказания медицинской помощи пораженным и эвакуации в лечебные учреждения [68]. Для этого в соответствии с действующими нормативными документами создаются временный штаб по ликвидации и предварительный план мероприятий, который включает в себя (рис.1.1) [54]:

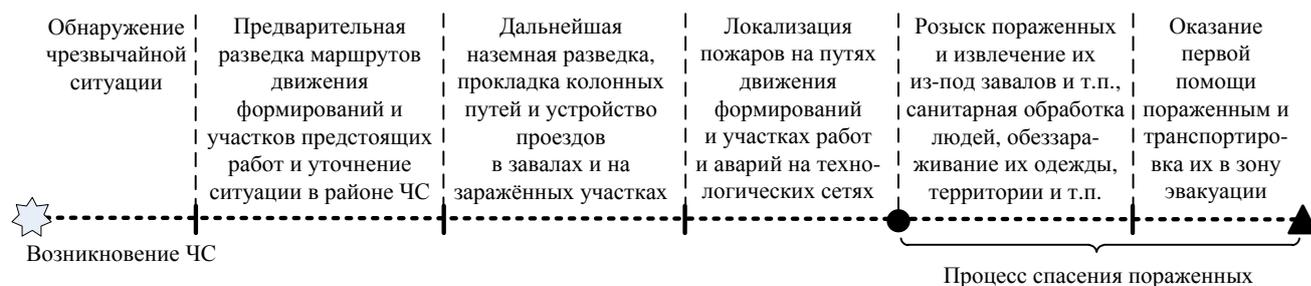


Рисунок 1.1 – Предварительный план мероприятий при проведении аварийно-спасательных работ

а) предварительную разведку маршрутов движения формирований и участков предстоящих работ и уточнение ситуации в районе ЧС;

б) дальнейшую наземную разведку, прокладку колонных путей и устройство проездов (проходов) в завалах и на заражённых участках, а также локализацию и тушение пожаров на путях движения формирований и участках работ;

в) локализацию аварий на коммунально-энергетических и технологических сетях;

г) розыск пострадавших (пораженных) и извлечение их из-под завалов, повреждённых и горящих зданий, загазованных, задымлённых и затопленных помещений, санитарная обработка людей, обеззараживание их одежды, территории, сооружений, техники, воды и продовольствия;

д) оказание первой помощи пораженным и транспортировка их в зону эвакуации с последующей передачей бригаде скорой медицинской помощи.

Последняя задача, указанная в пункте «е», вышеизложенного перечня во многом сложнее предыдущих. Перечень мероприятий по оказанию первой помощи включает [69]:

1) мероприятия по оценке обстановки и обеспечению безопасных условий для оказания первой помощи;

2) вызов скорой медицинской помощи, других специальных служб, сотрудники которых обязаны оказывать первую помощь в соответствии с федеральным законом или со специальным правилом;

- 3) определение наличия сознания у пораженного;
- 4) мероприятия по восстановлению проходимости дыхательных путей и определению признаков жизни у пораженного;
- 5) мероприятия по проведению сердечно-легочной реанимации до появления признаков жизни;
- 6) мероприятия по поддержанию проходимости дыхательных путей;
- 7) мероприятия по обзорному осмотру пораженного и временной остановке наружного кровотечения;
- 8) мероприятия по подробному осмотру пораженного в целях выявления признаков травм, отравлений и других состояний, угрожающих его жизни и здоровью, и по оказанию первой помощи в случае выявления указанных состояний;
- 9) придание пораженному оптимального положения тела;
- 10) контроль состояния пораженного (сознание, дыхание, кровообращение) и оказание психологической поддержки;
- 11) передача пораженного бригаде скорой медицинской помощи, другим специальным службам, обладающим соответствующей подготовкой, сотрудники которых обязаны оказывать первую помощь в соответствии с федеральным законом или со специальным правилом.

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. 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 [66].

В зоне ЧС обычно нет возможности проводить полноценное обследование пораженных в виду отсутствия времени, оборудования и специалистов-медиков.

Однако существуют алгоритмы, позволяющие на месте ЧС с большой долей вероятности определять наличие политравм, а главное – наблюдать за состоянием наиболее тяжело пораженных, что имеет первостепенную важность при масштабных катастрофах и других групповых несчастных случаях. Наилучшим образом для этих целей подходит «переработанная травматическая шкала» (RTS) (табл. 1.1), предложенная Н.Р. Champion [103] которая является результатом пересмотра травматической шкалы (TS). По мнению некоторых авторов [147, 168, 169, 162], обладая той же специфичностью и чувствительностью, что и шкала TS, предназначенная для сортировки раненых в полевых условиях при массовых потерях и ориентированная на оценку тяжести и состояния, шкала RTS в большей степени пригодна для повседневного практического применения.

Таблица 1.1 – Оценка тяжести состояния пораженного по травматической шкале

Сумма баллов по шкале комы Глазго	Систолическое АД, мм рт.ст.	ЧДД в минуту	Максимальный балл по травматической шкале
13-15	Больше 89	10-29	4+4+4 = 12
9-12	76-89	Больше 29	3+3+3 = 9
6-8	50-75	6-9	2+2+2 = 6
4-5	1-49	1-5	1+1+1 = 3

На основе суммы баллов по трем пунктам вероятность положительного исхода политравмы составляет:

при сумме баллов равной 12 – более 80%;

при сумме 9—12 баллов – от 40 до 80%;

при сумме 6—9 баллов – от 7 до 40%;

при сумме 3—6 баллов – менее 7%.

Показатели тяжести состояния нестабильны и могут достаточно быстро ухудшаться. Данный факт обуславливает необходимость проведения в условиях ЧС с большим числом пострадавших (пораженных) первичной медицинской сортировки, включающей в себя:

медицинское обследование или, как минимум, медицинский осмотр каждого пораженного;

определение состояния его жизненно важных органов и систем;

постановка предварительного диагноза и принятие на его основе решения, в какую сортировочную группу (категорию) включить пораженного для последующего проведения лечебно-эвакуационных мероприятий.

Основываясь на анализе наиболее известных алгоритмов первичной медицинской сортировки [73] в настоящем исследовании использована современная система сортировки, основанная на разделении всех пораженных на четыре группы, каждой из которых присвоен свой цветовой код (табл. 1.2) [164, 146, 129, 139]. По завершении процесса сортировки пораженные помечаются цветом одной из четырёх категорий сортировки, в виде специальной цветной бирки (англ. triage tag) и цветного фонарика (в тёмное время суток), либо просто цветной ленты.

Таблица 1.2 – Категории пораженных в зависимости от их состояния

Категория	Пояснение	Действие
Черная	Пораженные, у которых отсутствует дыхание и пульс, и агонизирующие	Помощь не оказывается
Красная	Тяжёлые пораженные, которые могут умереть в течение часа	Немедленное оказание помощи и транспортировка в больницу
Желтая	Тяжёлые пораженные, чья жизнь пока не находится под угрозой	Стабилизация состояния и транспортировка во вторую очередь
Зеленая	Пораженные (пострадавшие), способные передвигаться самостоятельно	Помощь оказывается в последнюю очередь. В больницу могут добраться самостоятельно

Неотложные работы в чрезвычайной ситуации – это аварийно-спасательные и аварийно-восстановительные работы, оказание экстренной медицинской помощи, проведение санитарно-эпидемиологических мероприятий и охрана общественного порядка в зоне чрезвычайной ситуации [17].

Аварийно-спасательные работы в ЧС – действия по спасению людей, материальных и культурных ценностей, защите природной среды в зоне чрезвычайных ситуаций, локализации чрезвычайных ситуаций и подавлению или доведению до минимально возможного уровня воздействия характерных для них опасных факторов [86].

Ликвидация чрезвычайных ситуаций – аварийно-спасательные и другие неотложные работы, проводимые при возникновении ЧС и направленные на спасение жизни и сохранение здоровья людей, снижение размеров ущерба окружающей природной среде и материальных потерь, а также локализацию зон чрезвычайных ситуаций, прекращение действия, характерного для опасных факторов [17].

Применение *робототехнических средств* позволяет минимизировать риск для людей, проводящих аварийно-спасательные работы на ОПО.

Задачи по автоматизации в различных областях – от военно-технической до социально-бытовой, в штатных и нештатных ситуациях – в настоящее время могут быть решены при помощи современных достижений в области робототехники. Робототехническое оборудование используется при проведении аварийно-спасательных работ, в медицине, в ходе боевых действий и антитеррористических операций, разведки, охраны, разминирования и пр., обеспечивая высокую эффективность проводимых работ и максимальную безопасность здоровью и жизни человека.

В этой связи представляет интерес анализ современного состояния РТС, предназначенных для аварийно-спасательных работ, а также анализ возможности и способов их применения при ликвидации последствий аварий на ОПО.

1.2. Анализ возможности и способов применения существующих робототехнических средств для проведения аварийно-спасательных работ

РТС способны быстро действовать в непредсказуемой и опасной среде. Их системы бесконтактных сенсоров и контактных датчиков, связи и движения

работают в самых напряженных условиях: задымленности, пыли и огня в зоне бедствия. Сейчас роботы-спасатели чаще всего применяются в ЧС геологического происхождения.

В ходе исследования были проанализированы научные работы последних пяти лет, основное внимание в которых уделено разработкам гуманоидных и социальных (групповых) роботов, предназначенных для обнаружения и спасения людей в зоне ЧС, а также для работы в условиях, опасных для здоровья человека. Далее детально рассмотрено несколько моделей и прототипов телеуправляемых и автономных робототехнических комплексов (РТК) [54].

Робот «Перевертыш». В 2012 году студентами НИ ИрГТУ [13] на базе конструкторского бюро «Импульс» в рамках Второго Международного молодежного промышленного форума «Инженеры будущего-2012» была представлена модель робота «Перевертыш». Данный робот предназначен для поиска и транспортировки людей, пострадавших в природных и техногенных катастрофах, тушения пожаров, перевозки различных грузов, выполнения строительно-монтажных работ и дистанционной диагностики параметров места ЧС. По утверждению авторов разработки, особенность данной модели заключается в том, что робот может перевернуться и выполнять свои функции в таком положении, а также перемещаться по различным типам ландшафта. Также по утверждению разработчиков, модель робота может быть оснащена различным сменным оборудованием – грузовыми захватами, дисковыми пилами, средствами тушения очагов пожара и т.д.

Робот потенциально будет способен перемещаться со скоростью 12 км/ч в любом положении и выполнять разведку местности, его грузоподъемность составит 100 кг. При этом, по утверждению разработчиков, максимальный преодолеваемый уклон – 50-60°, тогда как у аналогов он составляет – до 30°.

Проект ICARUS. Проект ICARUS ориентирован на развитии беспилотных технологий поиска и спасения для обнаружения, локализации и спасения людей. Дистанционно управляемые аппараты поиска и спасения выступают в качестве

первых разведчиков территории, наряду с другими участниками, для обеспечения безопасности человеческого персонала.

Основная цель проекта ICARUS – применение инновационных технологий для повышения эффективности управления ликвидацией последствий катастрофы и, таким образом, для уменьшения риска причинения вреда и последствий этого вреда для граждан [108].

Участвующая в проекте ICARUS бельгийская команда скорой помощи и поддержки (B-FAST) сформулировала свои требования о необходимости двух типов автоматизированных платформ в операциях по поиску и спасению:

- малое беспилотное наземное транспортное средство, способное проникать в разрушенные здания для поиска пострадавших;

- большое беспилотное наземное транспортное средство, которое может быть использовано в качестве мобильной базы, оснащенной широкими возможностями зондирования, передачи собранных данных операторам для повышения их ситуационной осведомленности. Важнейшим требованием является то, чтобы это транспортное средство могло передвигаться по пересеченной местности. Также большое беспилотное наземное транспортное средство служит базовой платформой для малого беспилотного наземного транспортного средства, а также для беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), что позволит исследовать большие площади в короткие сроки.

Управление роботами для поиска и спасения может быть организовано как индивидуальное, так и совместное, при этом они должны выполнять высокоуровневые команды, получаемые от базовой станции, и ориентироваться в автономном и полуавтономном режиме.

Роботы должны быть связаны с базовой станцией и друг с другом с помощью беспроводной самоорганизующейся когнитивной сети узлов мобильной связи, которая адаптируется к местности. Они должны быть оснащены датчиками, которые обнаруживают присутствие человека, а также будут оснащены широким набором датчиков других типов. На базовой станции данные обрабатываются и

сопоставляются с географической информацией, тем самым, повышая ситуационную осведомленность персонала, ведущего работу на месте.

Использование таких (полу)автономных наземных транспортных средств для поисково-спасательных операций будет иметь ряд преимуществ: исследование и сбор данных без риска для жизни людей; раннее обнаружение опасности; динамическое планирование траектории движения. Перечисленные преимущества достигаются за счет комплексного применения в проекте ICARUS большого и малого беспилотных наземных транспортных средств совместно с БПЛА, а также внедрения в РТК различных типов бесконтактных сенсоров. Кроме того, полуавтоматическая работа, на основе удаленной поддержки опытного спасателя позволяет расширить область решаемых задач и эффективность таких комплексов.

Большое беспилотное наземное транспортное средство будет обладать возможностью преодолевать серьезные препятствия и большие расстояния за сравнительно короткое время. Планируется, что максимальная скорость составит 25 км/ч. Таким образом, малое транспортное средство, может быть доставлено очень быстро и близко к потенциальному местонахождению жертв. Благодаря небольшому размеру и весу, оно может быть использовано для изучения узких мест (например, проходов между обломками рухнувшего здания), не травмировав людей и не нанося дальнейшего ущерба зданию.

Мощный манипулятор, установленный на большом беспилотном наземном транспортном средстве, может быть использован оператором для удаления больших препятствий, которые могут блокировать путь транспортному средству, а также для подъема предметов, если пораженный погребен под ними. Манипулятор будет спроектирован в виде 6-осевой руки, которая сможет поднимать до 250 кг. Таким образом, удаленное присутствие (теле-присутствие) оператора не ограничивается получением информации от датчиков или манипулированием мелкими предметами, как в обычных подходах, а расширено до перемещения крупных объектов. Предполагается использование интуитивно

понятного пользовательского интерфейса с применением экзоскелета со встроенной обратной связью, что позволит легко управлять манипулятором.

Малое беспилотное наземное транспортное средство состоит из робота Вэнгуарда, названного в честь разработчика – Аллена Вэнгуарда. Эта роботизированная система будет оснащена силовой установкой, позволяющей ему маневрировать в очень неструктурированных средах, таких как разрушенные здания.

Из-за ограничений по размеру и весу, малое беспилотное наземное транспортное средство не может быть оснащено ни сложными датчиками, ни мощным бортовым компьютером. Поэтому его автономные возможности будут ограничены простейшими задачами. На малом беспилотном наземном транспортном средстве будет установлена видеокамера, поэтому телеоператор сможет получить визуальную информацию о месте катастрофы.

Таким образом, проект ICARUS предлагает несколько новых решений в области беспилотных наземных транспортных средств для поисково-спасательных операций.

Робот-санитар BEAR (Battlefield Extraction-Assist Robot). Разработанный американской компанией Vecna Technologies Cambridge Research Laboratory, робот предназначен для выполнения аварийно-спасательных работ на поле боя, а также при ликвидации последствий землетрясений или других чрезвычайных ситуаций [163]. Машина собственными силами может эвакуировать человека. Первые модели были построены в 2004 году. Рост робота составляет 1,8 метров. Максимальный переносимый вес – 270 кг. Сохранять равновесие и не ронять при этом свой груз роботу позволяет система гироскопов и двигателей, управляемых компьютером.

Первые версии BEAR дистанционно управлялись оператором, который мог видеть и слышать все, что происходит в пространстве вокруг робота, на основе встроенной системы аудиовизуальных сенсоров. Разработки в области искусственного интеллекта BEAR дали роботу возможность обрабатывать многомодальные команды, данные оператором, такие как «Иди туда» или

«Подбери ту коробку». Если по каким-то причинам робот не в состоянии выполнить команду оператора, то он запрограммирован так, чтобы попросить оператора о помощи для выполнения задачи.

Робот может также дистанционно управляться солдатом через устройство, известное как перчатка iGlove, разработанная компанией AnthroTronix, которая позволяет солдату с помощью простых жестов рукой, командовать BEAR. Такой аппарат дистанционного управления роботом может крепиться к карабину М-4 так, чтобы солдаты могли продолжать управлять BEAR, не выпуская свое оружие.

Робот BEAR оснащен гидравлическим приводом, который дает ему возможность поднять до 270 кг. Гидравлический привод управляется клапанами, контролирующими давление в гидравлических цилиндрах, и выключается, когда роботу нужно двигаться на гусеничном ходу. Гусеничные движители BEAR имеют электрический привод. Аккумуляторная батарея снабжает их энергией на срок до одного часа. Дальнейшее усовершенствование аккумуляторного блока должно удвоить емкость батареи и дать возможность BEAR вдвое увеличить возможное время езды на гусеничном ходу.

Текущая версия робота оснащена ИК-портом, приборами ночного видения и оптическими камерами, а также микрофоном. В дальнейшем планируется включение датчиков давления и тактильных сенсоров (Touch sensors) в руки робота, а также химических и биологических сенсоров обнаружения человека.

Руки робота очень сильные, однако они также могут совершать достаточно точные движения, чтобы взять куриное яйцо, не раздавив и не разбив его. Технология динамического балансирования дает ему возможность сохранять равновесие в любом положении, даже неся тяжелые объекты.

Последняя представленная версия 7.2 была во многом улучшена по сравнению с первоначальной: новый робот обладает взрывозащищенными и огнестойкими протекторами и батареями. Во многом улучшена маневренность – обновлена гусеничная база с системой динамического баланса для повышения мобильности, а также усилена прочность BEAR – стальная рама в 4 раза прочнее, чем ее алюминиевая предшественница. Робот в состоянии поднять до 270 кг,

тогда как предыдущие версии были способны поднять вес в 180 кг. Кроме того, гидравлические трубопроводы и элементы электропитания усилены и защищены от внешнего воздействия стальным каркасом.

Робот BEAR был протестирован военными США. В 2010 году солдаты работали с ним для разработки тактики его использования, а также проверили его эффективность в боевых условиях. В ходе дальнейших усовершенствований будет произведена замена стальной рамы робота BEAR на титановую. Характерными изменениями в модели следующего поколения BEAR (версия 8) станет существенное уменьшение веса, а также увеличение количества сенсоров различных типов и расширения диапазона выполняемых им задач. Разработчики Vecna работают над улучшением способности BEAR обрабатывать высокоуровневые команды, над улучшением его навигационной системы и его взаимодействия с окружающей средой [163].

Рассмотрим области применения и типы задач, решаемых этим роботом. Одной из задач робота BEAR является вынос раненого человека из опасной окружающей среды в место, где медик без риска для жизни может оценить тяжесть полученных повреждений тела. Размеры, оснащение и характеристики робота, в том числе небольшая ширина, позволяют выполнять задачи как вне, так и внутри помещений, например, проходить через двери и подниматься по лестнице.

Другое применение BEAR: поиск и спасение; транспортировка поставок; устранение препятствий; подъем тяжелых предметов; обработка опасных материалов; разведка; обследование мин и самодельных взрывных устройств. В мирное время робот BEAR предназначен для спасения людей: в шахте; в районах, загрязненных биологическими, ядерными или химическими отходами; в небезопасном здании после землетрясения, пожара, оползней или взрыва.

У робота может быть промышленное и коммерческое применение, такое как подъем и безопасное перемещение тяжелого инвентаря. В здравоохранении BEAR может безопасно переносить тяжелых пациентов в больницах, помогать людям с ограниченными возможностями и пожилым людям.

Робот-спасатель SHIMP. Центр робототехники при Университете Карнеги—Меллона, штат Пенсильвания, разрабатывает робота-спасателя SHIMP (CMU Highly Intelligent Mobile Platform) с повышенной устойчивостью для выполнения сложных задач в опасных для человека условиях окружающей среды [159].

SHIMP выполнен в гуманоидном форм-факторе. Его высота составляет 1,6 метра, масса – 181 килограмм. Робот оснащён руками с отставленными «большими пальцами». Всего на руках у SHIMP по три пальца, при помощи которых он может вращать руль автомобиля и использовать инструмент. Руки и ноги робота также оснащены гусеницами с резиновым покрытием, с помощью которых он и передвигается, как правило, с использованием для стабильности всех четырех конечностей. При необходимости SHIMP в состоянии двигаться лишь на двух конечностях. Также отмечено, что вместо того, чтобы создавать машину, которой бы нужно было тщательно сбалансировать себя, перед тем как перешагнуть мусор (обломки), необходим робот, который способен опуститься на гусеницы и переехать этот мусор. Строение, сила и ловкость робота позволяют ему эффективно работать в таких сложных условиях. Путем поддержания статической, а не динамической устойчивости робота, устраняется необходимость комплексного контроля его положения.

SHIMP генерирует полную трехмерную модель окружающего пространства, используя различные датчики, встроенные в его голову, и передает эту модель человеку-оператору для получения без задержек ситуационной осведомленности последнего.

Он способен преодолевать сложные препятствия, карабкаться по вертикальным стенам, а также по приставной и пожарной лестнице, цепляясь за перекладины крюками. Развиваемый манипуляторами крутящий момент достаточно велик, чтобы робот смог самостоятельно закрыть вентиль, не поддающийся усилиям одного человека.

SHIMP запрограммирован таким образом, что может без особых проблем перемещаться самостоятельно, сохраняя равновесие и избегая столкновений с

другими объектами. В случае особой необходимости управление роботом может перехватывать оператор.

Робот HUBO. Человекоподобный робот с открытой платформой, HUBO, разрабатывается совместными усилиями нескольких групп [179]. Помимо KAIST, в его создании принимают участие многочисленные коллективы исследователей из США. Свой вклад внесли частный Университет Дрекселя, общественный Университет Пердью, Технологический институт Джорджии, университеты штатов Делавэр, Огайо, Индиана и Колумбийский университет. Создаваемая для конкурса, проводимого агентством передовых оборонных исследовательских проектов США (Defense Advanced Research Projects Agency – DARPA), модель получила приставку в названии – DRC (DARPA Robotics Challenge).

В представленном разработчиками деморолике робот способен пользоваться различной техникой, подручными инструментами, оценивать обстановку и расчищать себе путь. Для повышения устойчивости робот может временно отказаться от прямоходящего режима и перейти на ходьбу на четвереньках. Для этого тыльная сторона дистальной части манипулятора сделана широкой и пружинящей. Робот также должен быть способен подниматься по лестнице [179].

Аппаратная платформа DRC-HUBO базируется на переработанной модели HUBO2+ – человекоподобного робота, разработанного фирмой KAIST и Rainbow, Inc. Разработанная система позволяет трем операторам сообща управлять 32 степенями свободы робота в различных сложных мобильных манипуляционных задачах, используя один унифицированный подход [180]. Конструкция рук робота была сделана более подвижной, что требуется для управления транспортным средством с помощью этого робота.

Важным моментом является способ дистанционного управления роботом. Робот HUBO точно копирует любые движения, выполняемые оператором на другом аналогичном роботе.

Робот Atlas. Atlas – робот-гуманоид, разрабатываемый компанией Boston Dynamics при финансировании агентства DARPA. Робот высотой 1,8 м

предназначен для выполнения разнообразных поисковых и аварийно-спасательных работ, и был представлен общественности 11 июля 2013 года.

Разработка робота Atlas ведется с целью обеспечения помощи аварийно-спасательным службам в поисково-спасательных операциях, а также для выполнения таких задач как отключение систем блокирования клапанов безопасности, открывание дверей и эксплуатация оборудования, работающего в условиях, опасных для здоровья человека [133].

Робот базируется на ранее разработанной компанией модели человекоподобного робота PETMAN и имеет туловище, голову и четыре конечности с гидравлическими приводами. Вес робота Atlas составляет 150 кг. Вся совокупность его движений производится с помощью 28 приводов. Робот имеет подсветку голубыми светодиодами. Atlas оснащен двумя системами технического зрения – лазерным панорамным локатором (лидаром) и стерео видеокамерами, которые контролируются бортовым компьютером [124].

Atlas способен перемещаться по пересеченной местности и подниматься самостоятельно, используя свои руки и ноги, хотя прототип 2013 года был подключен к внешнему источнику питания, чтобы поддерживать стабильность. В условиях лабораторных испытаний к роботу подходит несколько кабелей и шлангов. По кабелям подается электроэнергия и команды от компьютера, а по шлангам доставляется жидкость для работы гидравлики. В октябре 2013 года Boston Dynamics представили видео, на котором Atlas смог выдержать возмущающее воздействие внешнего объекта (удар массивного отклоненного маятника – гири на подвесе), балансируя на одной ноге, и остаться в вертикальном положении.

В январе 2015 года была представлена обновленная модель робота [165]. Модернизированный Atlas был обновлен практически полностью (на 75%) – от оригинального дизайна остались только голени и ступни. Использовались более легкие материалы, чтобы встроить тяжелую аккумуляторную батарею и новую насосную систему, при этом лишь незначительно увеличив массу робота.

Высота обновленного Atlas составляет 1,88 м (6'2"), а вес 156,5 кг (245 фунтов). Наибольшие изменения претерпели источник питания и насос. Теперь робот сможет передвигаться, не полагаясь на трос с проводами, и оснащен 3,7 кВт литий-ионным аккумулятором с возможностью работы в течение одного часа при выполнении задач смешанного типа, включающих ходьбу, стояние, использование различных инструментов и другие. Эти нововведения позволяют управлять насосом переменного давления, который позволяет увеличить коэффициент полезного действия искусственных гидравлических мышц робота. Другие основные обновления направлены на повышение эффективности, ловкости, устойчивости и включают в себя [135, 113]:

регулируемое положение плеч и рук, что позволяет увеличить рабочее пространство перед роботом и дает ему возможность видеть свои руки в движении, обеспечивая тем самым дополнительную обратную связь от оптического датчика к оператору;

новые предплечья оснащены электрическим приводом, что увеличит силу, ловкость и диапазон изменения прилагаемой силы;

добавление дополнительной степени свободы в запястье означает, что робот будет в состоянии повернуть ручку двери просто, вращая ее запястьем;

три встроенных бортовых компьютера используются для постановки и планирования задач, также встроенный в голову беспроводной маршрутизатор дает доступ к различным коммуникациям;

модернизированные приводы в бедрах, коленях и спине дают роботу большую силу [134];

предусмотрена возможность удаленного отключения робота в целях безопасности.

На что способен новый прототип, выяснится в ходе конкурса DARPA Robotics Challenge (DRC), который проводится ежегодно. Робот будет поставляться с «эмулятором батареи» - временно установленным тренировочным инструментом, который имитирует работу реального аккумулятора. Это позволит переключать режимы между постоянным напряжением при обычной практике, и

дозировано изменяемым, чтобы смоделировать фактический срок службы батареи. Во время испытания будут имитироваться помехи беспроводной связи – это придаст обстановке, в которой действует робот, больше сходства с реальностью и поможет проверить способность таких машин действовать хотя бы отчасти автономно.

Роботы спасатели и «роевой подход». Применение роевых принципов в робототехнике представляет собой новый подход к координации множества простых в своем устройстве роботов. Предполагается, что желаемое коллективное поведение возникает из взаимодействия роботов между собой и их взаимодействия с окружающей средой.

Относительно простые правила индивидуального поведения могут создавать сложное организованное поведение всего роя. Ключевым моментом является взаимодействие между членами группы, которое создает систему постоянной обратной связи. Поведение роя включает постоянную смену участников, взаимодействующих друг с другом, а также поведение всей группы в целом.

В отличие от просто распределенных робототехнических систем роевая робототехника подразумевает *большое* количество роботов, взаимодействующих с использованием только локальной связи. Такая локальная связь может быть создана, например, на базе беспроводных систем передачи данных в радиочастотном или инфракрасном диапазоне.

В Массачусетском Технологическом институте (MIT) ведутся разработки собственных технологий для роевых комплексов [98]. На данном этапе экспериментальных исследований была решена задача реконфигурации построения роботов. В начале эксперимента роботам необходимо было сбиться в беспорядочную толпу, а потом образовать четкое кольцо. Кроме того, роботы решали задачу перемещения на место подзарядки при низком уровне заряда их блоков питания [95, 138].

В качестве примеров применения роя роботов является спасение людей. Роботы, используемые для спасения при землетрясениях, могут быть трех

вариантов: тысячи разведчиков размером с насекомое могут проникнуть под обломки и найти выживших, несколько десятков малых роботов могут подобраться к месту и решить проблему расчистки и выноса обломков, и несколько больших роботов-подъемников и роботов-носильщиков будут непосредственно осуществлять операцию спасения.

В результате анализа статей, опубликованных в отечественных журналах и трудах конференций, выявлено, что РТС, способных решать полный комплекс задач по ликвидации ЧС, сформулированный выше (п. 1.1), на данный момент в России не разработано.

В ноябре 2014 года на заседании Коллегии МЧС России [27] были рассмотрены вопросы переоснащения подразделений МЧС России современными техническими средствами и техникой до 2017 года, а также использования в пожарно-спасательных подразделениях РТК, беспилотных летательных аппаратов и дальнейшего развития робототехники и технологий ее применения. На данный момент в подразделениях МЧС России на вооружении находятся наземные, подводные и воздушные робототехнические комплексы различной номенклатуры и целевого предназначения [14]. Так в Ногинском спасательном центре для разминирования используется высокотехнологический робототехнический комплекс MV-4 (многофункциональный механический комплекс по разминированию противопехотных мин). В отрядах «Госакваспас» и «Центроспас» проводятся работы с использованием подводных робототехнических комплексов. Также в подразделениях МЧС России применяются беспилотные летательные аппараты (БПЛА), с входящими в них аппаратами самолетного, вертолетного и мультикоптерного типа.

Следовательно, в настоящее время предварительную разведку маршрутов движения формирований и участков предстоящих работ и уточнение ситуации в районе ЧС можно осуществлять на базе отечественной техники с помощью различного класса БПЛА отечественного производства [9, 12, 8]. Для дальнейшей наземной разведки и прокладки колонных путей, устройства проездов (проходов) в завалах и на заражённых участках, а также локализации и тушения пожаров на

путях движения формирований и участках работ в район ЧС могут отправляться беспилотные гусеничные платформы типа роботов ICARUS, снабженные необходимыми манипуляторами и инструментом, которые производят анализ радиационного и химического загрязнения и задымления воздуха на местности, тушат очаги возгорания и расчищают путь для продвижения других видов аварийной техники. Для локализации аварий на коммунально-энергетических и технологических сетях совместно с роботами типа ICARUS могут направляться роботы типа SHIMP, обладающие способностью пролезать через завалы и люки, карабкаться по пожарным лестницам, открывать замки и двери, закрывать предохранительные клапаны и заслонки, проводить ремонт и восстановление повреждённых защитных сооружений, а также обеззараживание очагов поражения. Для розыска пораженных и извлечения их из-под завалов, повреждённых и горящих зданий, загазованных, задымлённых и затопленных помещений, санитарной обработки людей, обеззараживания их одежды, территории, сооружений, техники, воды и продовольствия могут направляться роботы типа Atlas, HUBO и BEAR. Для оказания первой помощи пораженным и транспортировки их в зону эвакуации (передаче бригадам скорой помощи) могут быть использованы роботы типа HUBO и BEAR [53].

Для определения признаков жизни (наличия сознания) и осмотра пораженного требуется наличие у указанных РТС соответствующих датчиков (температуры, давления, влажности) и систем (компьютерного зрения, анализа и синтеза речи для опроса пораженного и др.), номенклатура и конфигурация которых должна определяться с учетом массогабаритных и энергетических характеристик робота. Для определения категории пораженного (в зависимости от степени тяжести полученных травм) и оптимального положения для его транспортировки необходим соответствующий научно-методический инструментарий, позволяющий принять указанные решения в условиях неполных данных относительно признаков травм, состояния пораженного и симптомов заболевания. Ниже представлен обзор способов и средств решения указанных научных задач.

1.3. Анализ научно-методического аппарата и программно-алгоритмических решений для обеспечения возможности спасения пораженных с помощью робототехнических средств

В [127] представлены методы определения переломов костей, на основе анализа данных, полученных за счет применения технологий: рентгеновских снимков, компьютерной томографии, ультразвукового исследования (УЗИ). Исходя из условий проведения анализа костей с использованием магнитного резонанса, соответствующие методы обработки данных на данном этапе исследований не рассматривались. Основной задачей данных методов является определение травм пораженных на основе медицинских изображений с минимальными затратами на привлечение экспертов.

В [131] описан метод оценки расположения кости на снимке на основе применения модели активных контуров с глобальными константами, широко использующийся для сегментации объектов на изображении в различных задачах [40, 153]. В [132] представлен метод определения границ и мест переломов большой берцовой кости на основе морфологических операций, отличающийся применением статистических моментов высокого порядка в циклической сегментации исходного изображения. Для определения переломов длинных костей в [110] применяется метод нелинейной анизотропной диффузии для сглаживания изображения и модифицированные преобразования Хаафа с автоматическим определением пиков. Для оценки расположения костей и распознавания мест переломов в области бедра в [171] используется модель интегральной проекции по вертикали, примененная к заранее сегментированным областям костей, и метод аппроксимации кривых проекции. Для анализа изображений, содержащих снимок тазовой кости, в [157] применен метод дискретных преобразований Вельвета совместно с морфологическими операциями, обеспечивающий сегментацию снимка и выделения границ кости. Для выделения признаков и распознавания переломов в [1] использованы локальные бинарные шаблоны, обеспечивающие фрагментацию изображения на

области соседних пикселей и их анализ. В [141] для сегментации рентгеновских снимков выполняется процедура расчета гистограмм распределения цветов. После чего полученная гистограмма разделяется на три подпространства пикселей на основе алгоритма нечеткой логики. По окончании сегментации выполняется фильтрация областей кожи, а также принадлежащих заднему фону, для определения областей переломов.

В [174] представлен метод определения переломов в области тазовой кости, в котором для сегментации данных применен алгоритм активных моделей форм. Анализ полученных после сегментации областей на наличие неоднородностей и разрывов выполняется при помощи алгоритма двумерных стационарных преобразований Вельвета [94]. Для анализа снимков тазовой кости также применяется двухэтапный метод идентификации переломов [105]. Рассматриваемый метод для локализации потенциального региона перелома использует стратегию от грубой к тонкой сегментации [93]. Далее в найденных областях выполняется расчет средней интенсивности, а также суммы средних значений кривых для впадин в кости. После этого для более точного определения границ перелома выполняется моделирование анализируемой области в виде взвешенного графа, а перелом моделируется, как минимальная глубина в данном графе. Для подтверждения результатов на втором этапе выполняется моделирование перелома в виде впадины, на основе средних значений и кривизны Гаусса (полной кривизны (Gaussian curvature)). Кроме того, на данных этапах [105] могут быть применены методы статистической корреляции и зеркальной симметрии человека на первом этапе для выявления потенциальных областей [107]. Для распознавания мест переломов применяются случайные поля Маркова (Markov Random Field) [140] с оценкой максимальных апостериорных вероятностей (Maximum a Posterior probability) [120]. Для выявления волновых переломов костей, которые на изображении являются местами разрыва однородных областей, в [106] применяется алгоритм Эдмондса-Карпа [178] для анализа взвешенного ориентированного графа, построенного на основе геометрии

нижней челюсти человека, а также некоторых априорных данных о переломах в рассматриваемой кости.

В [121] используется метод логарифмических фильтров Габора, примененных к трехмерным изображениям ультразвукового сканирования для выделения рубчатых признаков, которые появляются вокруг мягких тканей и стыках кости при переломах. Анализ выделенных признаков выполняется при помощи оценки симметрии локальных фаз.

Для решения проблем были разработаны технологии и методы бесконтактного анализа на основе обработки изображений. В [114] представлен метод анализа признаков лица человека по видеоданным, записанным с инфракрасной термографической камеры (тепловизора [20]). В [160, 166] приведены методы фотоплетизмограммы периферического пульса (ФПП) с использованием цифровой видеокамеры. Однако недостатком данных технологий является низкий уровень защищенности от воздействия внешней среды, а также необходимостью внедрения сложных технологий анализа изображений для устранения помех, возникающих, например, вследствие движений человека в процессе съемки. Одной из технологий устранения шума физиологических сигналов является слепое разделение источников (BSS) на основе метода анализа независимых компонент [125].

В [152] для измерения пульса человека анализировался видеосигнал, каждый кадр которого содержал изображение лица человека. На предварительной стадии обработки каждый кадр видеоряда анализируется методом определения наличия лица на изображении. В случае положительного результата, выполняется процедура кадрирования области лица на изображении. После этого полученный фрагмент разделялся на три цветовых канала – красный, синий и зеленый соответственно. Далее составляется график интенсивности по всему пространству каждого канала изображения. Полученные графики независимо нормализуются по двум метрикам – среднему значению интенсивности μ_i и стандартному отклонению σ_i . Полученные нормализованные графики анализируются при помощи метода независимых компонент, а также объединенной диагональной

аппроксимации собственных матриц (JADE) [102] для статистически независимой аппроксимации. В работе [96] на данном этапе применяется метод анализа главных компонент. На последнем этапе для получения энергетического спектра применяется быстрое преобразование Фурье.

Для оценки работы предложенного метода [152], выполнялось сравнение результатов с данными, полученными при помощи технологии ФПГ. Одной из метрик сравнения является среднеквадратичное отклонение (RMSE), значение которой не превышало 5 от эталона, полученного при помощи ФПГ. На основе результатов, представленных в [152], можно сделать вывод, что разработка и применение технологий бесконтактного измерения пульса человека является актуальной задачей.

В [152] представлен бесконтактный метод автоматического расчета пульса человека на основе обработки видео данных, записанных при помощи веб-камеры с разрешающей способностью 1.3 Мпикселя. Разработка такого способа измерения пульса обосновывается проблемами, возникающими при использовании стандартных технологий. Например, в ходе применения электрокардиограммы у пациента может возникнуть дискомфорт из-за необходимости прикрепления датчиков на кожу. Кроме того, аппаратные средства для выполнения процедуры требуют определенных условий эксплуатации. Другим примером контактного измерения пульса является применение технологии фотоплетизмограммы периферического пульса (ФПГ) [137].

Прибор спироартериокардиоритмограф (САКР) [65] состоит из персонального компьютера, микропроцессорного электронно-пневматического следящего блока, компрессора, пальцевой манжеты с оптическим датчиком, блока ЭКГ и высокочувствительного ультразвукового спирометра с цифровой обработкой сигналов, разработан для оценки функционального состояния сердечно-сосудистой системы организма.

В таблицах 1.3-1.5 представлены результаты анализа подходов к сортировке (определению категории) и транспортировке пораженных.

Таблица 1.3 – Подходы на основе проектирования сети и маршрутизации транспортных средств (ТС)

Основной компонент	Целевая функция	Автор	Ограничения		
			Мощность	Предел	Другое
Стоимость	Транспортные расходы	Hamedi et al. [122]	-	Поток, время, прибытие и место назначения	-
		Taniguchi et al. [161]	-	Время между поставками, неудовлетворенный спрос	-
		Ben-Tal et al. [100]	ТС, связь	-	Общий поток
		Viswanath and Peeta [167]	-	Общая охваченная площадь, стоимость	Поток
	Стоимость выбранных ресурсов	Barbarosoğlu et al. [97]	ТС	Пилот, продолжительность	
Время	Время прохождения	Yuan and Wang, [177]	-	-	Возможный путь без кругового движения
		Feng and Wen [117]	Связь	Транспортные расходы, время на маршруте	Транспортный поток, управление движением
		Barbarosoğlu [97]	-	Время, расстояние, пересадка	-
	Время погрузки, разгрузки	Barbarosoğlu et al. [97]	-	Время, расстояние, пересадка	-
	Время эвакуации	Campos et al. [101]	-	Количество укрытий и путей	-

Окончание таблицы 1.3

Основной компонент	Целевая функция	Автор	Ограничения		
			Мощность	Предел	Другое
Расстояние	Расстояние	Shen et al. [156]	-	Спрос, время прохождения	-
		Feng and Wen [116]	-	Узел, время, поврежденный узел	-
Количество	Неудовлетворенный спрос	Yi and Özdamar, (2007) [11]	Транспортное средство	Спрос, количество транспортных средств	Сбалансированный материальный поток, тип транспортного средства
	Необходимое количество аварийных единиц техники	Yi and Özdamar, (2007) [11]	Транспортное средство	Спрос, количество транспортных средств	Сбалансированный материальный поток, тип транспортного средства
	Общий удовлетворенный спрос	Viswanath and Peeta [167]	-	Общая охваченная площадь, стоимость	Поток
	Общее число спасенных жизней, риск	Feng and Wen [117]	-	Узел, время, поврежденный узел	-
	Количество ожидающих пораженных	Yi and Özdamar [176]	ТС	Спрос, количество ТС	Сбалансированный материальный поток, тип ТС
		Feng and Wen [116]	-	Общее количество выездов	Транспортные притоки
	Объем перевозок	Feng and Wen [117]	Связь	Транспортные расходы, время на маршруте	Транспортный поток, показатель управления движением
	Мощность	Campos et al. [101]	-	Количество укрытий и путей	-

Таблица 1.4 – Подходы на основе определения местоположения

Основной компонент	Целевая функция	Автор	Ограничения		
			Мощность	Предел	Другое
Время	Время транспортировки	Edrissi et al. [112]	-	Предложение, спрос, бюджет (Стоимость)	-
		Yazici and Ozbay, [175]	ТС, канал (линия) связи, объект	Количество ТС	Поток
	Время распределения ресурсов	Fiedrich et al. [118]	-	Ограничение ресурсов из-за локальных условий	Доступные ресурсы

Таблица 1.5 – Интегрированные подходы

Основной компонент	Целевая функция	Автор	Ограничения		
			Мощность	Предел	Другое
Время	Время транспортировки	Wilson et al. [173]	Объект	Время выполнения задачи	Местоположение
		Ozdamar [148]		Спрос, предметы потребления, совокупное предложение	Материальный поток
		Horner and Widener, [123]		Необходимость помощи, уровень обслуживания	
		Song et al. [158]	ТС	Время обслуживания ТС	Ограничения непрерывности маршрута
	Время эвакуации	Song et al. [158]	ТС	Время обслуживания ТС	Ограничения непрерывности маршрута
Расстояние	Расстояние	Song et al. [158]	ТС	Время обслуживания ТС	Ограничения непрерывности маршрута
Количество	Общее число спасенных жизней	Wilson et al. [173]	Объект	Время выполнения задачи	Местоположение

Анализ многочисленных источников [97, 100, 101, 112, 116, 117, 118, 122, 123, 148, 156, 158, 161, 167, 173, 175, 176, 177] показал, что для научных задач поддержки принятия решений о спасении пораженных имеются частные решения, в большинстве случаев слабо адаптированных к их реализации в РТС, полностью отсутствуют системотехнические решения в области поддержки принятия решения о способах спасения пораженных с использованием автоматизированных (автоматических) технических средств.

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.

1.4. Выводы по первой главе

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. Однако 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 положении для транспортировки пораженных, нуждающихся в эвакуации.

Проведенный анализ показал, что для указанных задач 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. ПОДХОДЫ К ПОВЫШЕНИЮ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА СПАСЕНИЯ ПОРАЖЕННЫХ В РЕЗУЛЬТАТЕ АВАРИЙ НА ОПАСНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТАХ

2.1. Обоснование применения концепции активных подвижных объектов для решения задачи повышения эффективности спасения пораженных

Все существующие и перспективные РТС могут рассматриваться как те или иные разновидности активных подвижных объектов (АПО) [30].

Концепция АПО [31, 28] была предложена в середине 70-х годов прошлого столетия и в последующем дополнена концепцией системного моделирования [3, 74, 78, 77] указанных объектов. Анализ показывает, что данные концепции могут быть проинтерпретированы в рамках широко используемого в искусственном интеллекте мультиагентного подхода к управлению рассматриваемыми классами объектов [3, 74]. При этом под АПО, в общем случае, понимается сложная мобильная система, предназначенная для информационного, энергетического или/и вещественного взаимодействия с окружающей физической средой (АПО 1 рода) или/и с другими подобными системами (АПО 2 рода). Функционирование АПО складывается из четырех составляющих: перемещение основания АПО в пространстве (механическое движение), изменение состояния бортового ресурса, изменение состояния размещенных на его борту приборов и, наконец, самое главное – осуществление взаимодействия АПО со средой или другими АПО – это целевая задача и основной атрибут АПО (рис. 2.1).

Это свидетельствует о том, что с системно-кибернетической точки зрения АПО представляет собой сложную неоднородную динамическую систему. Изложенная трактовка функционирования АПО выделяет его как специфический объект, задачи управления которым принципиально отличаются от традиционных задач управления движением. В данном случае главную роль играет управление процессами взаимодействия, остальные функции АПО (движение, работа бортовой аппаратуры, расход ресурса) являются вспомогательными, обеспечивающими

решение главной задачи. В прикладных задачах в роли объекта управления может выступать как отдельный АПО, так и системы АПО (однородных или разнородных). Последний случай характерен для исследуемой задачи транспортировки пораженного. Соответствующую систему (робототехнический комплекс) можно рассматривать как некоторый обобщенный АПО, структура которого по-прежнему включает в свой состав четыре подсистемы, функционирование которых в этом случае соответствующим образом усложняется.

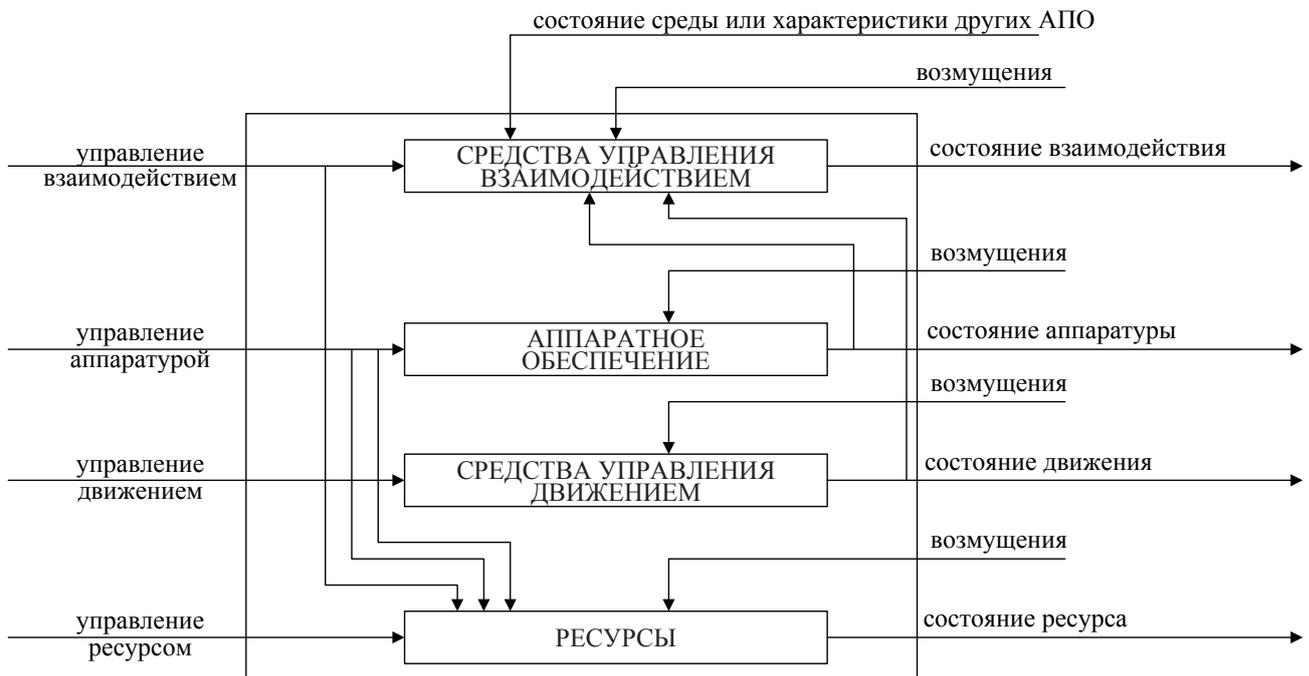


Рисунок 2.1 – Общая структурная схема АПО

В дальнейшем для определённости будем предполагать, что перед рассматриваемой в данной работе системой АПО – робототехнический комплекс (РТК)– стоит двойственная задача:

1) создание в заданных областях физического пространства таких условий («информационных полей»), при которых каждое РТС, находящееся в указанных областях, может определять своё местоположение, обмениваться информацией друг с другом, определять и оценивать состояние пораженного в результате ЧС;

2) создание и поддержание в пространстве такой структуры РТС, которая позволит за заданное (либо минимальное) время осуществлять непосредственное вещественное либо энергетическое взаимодействие с пораженным, в ходе которого будет выполняться целевая задача, стоящая перед РТК.

Следует подчеркнуть, что задача создания вышеперечисленных условий может ставиться как для всего пространства (глобально), так и для какой-либо его части (локально), на всём заданном интервале времени (непрерывно), либо в какие-то дискретные моменты времени, интервалы времени (дискретно). При этом может дополнительно задаваться набор количественных параметров, характеризующих те или иные условия (информационные поля). Решение вышеперечисленных целевых задач может быть достигнуто различными способами. В дальнейшем *под способом применения РТС* будем понимать заранее установленный и согласованный порядок действий робототехнического комплекса, направленный на безусловное выполнение поставленных целевых задач по транспортировке пораженных.

Таким образом, в рассматриваемом случае способ применения робототехнического комплекса будет состоять в заранее разработанной последовательности действий, связанной с перемещением и взаимодействием РТС между собой, при которой обеспечиваются заданные характеристики «информационного поля» [143].

При выполнении аварийно-спасательных работ, связанных со спасением людей из указанной зоны, РТС реализуется следующая последовательность действий (рис. 2.2).

1. Обследование зоны ЧС на предмет розыска пораженных.

Зона ЧС характеризуется возникновением опасных с точки зрения воздействия на людей и окружающую среду факторов. Она содержит участки среды, доступ к которым человека либо затруднен, либо связан с риском для его жизни. Зачастую данные условия связаны с присутствием в зоне объектов, столкновение с которыми может привести к возникновению потенциально опасных ситуаций: взрывов, утечек ядовитых или радиоактивных веществ. Кроме

того, подобные среды содержат участки с различными свойствами подстилающих поверхностей, в том числе труднопреодолимые или непреодолимые для РТС.

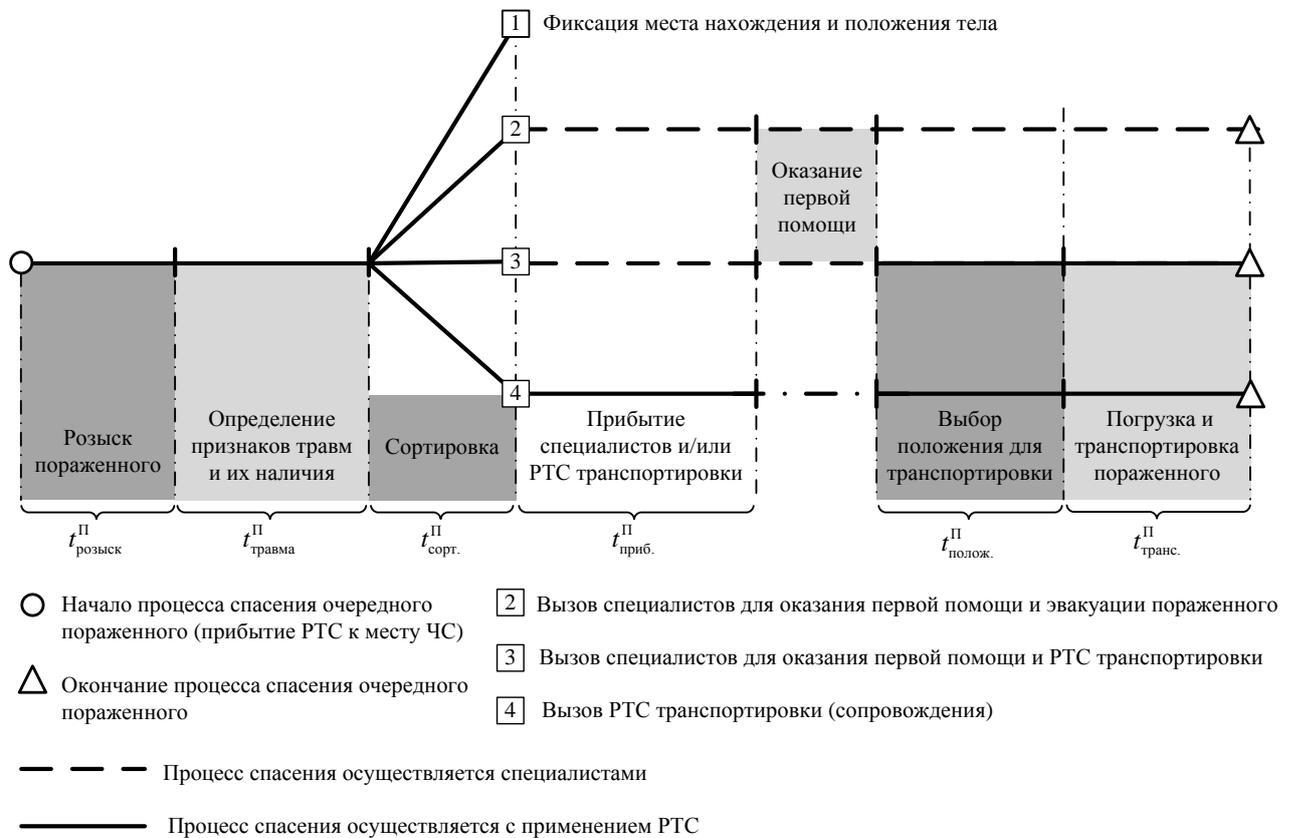


Рисунок 2.2 – Схема процесса спасения пораженных в результате аварий на опасных производственных объектах

2. В случае обнаружения пораженного необходимо оценить его текущее состояние, спрогнозировать изменение состояния с учетом времени на оценку текущего состояния и эвакуацию из опасной зоны и выработать решение на проведение эвакуации или дальнейший поиск других пораженных.

3. На основе полученных оценок признаков травм необходимо осуществить определение категории пораженного в зависимости от степени тяжести полученных им травм, а по результатам сортировки осуществить вызов специалистов и/или РТС.

4. Для пораженных, эвакуация которых возможна с использованием РТС, выбрать оптимальное положение для транспортировки пораженного и осуществить его транспортировку за пределы зоны ЧС (зоны поражения).

Таким образом, указанная последовательность действий (рис. 2.2), связанная 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 $S^{\text{ТРАНСПОРТИРОВКА}}$, определяет способ спасения пораженных с использованием РТС:

$$S = \{S^{\text{РОЗЫСК}}, S^{\text{ТРАВМА}}, S^{\text{КАТЕГОРИЯ}}, S^{\text{РЕШЕНИЕ}}, S^{\text{ПРИБЫТИЕ}}, S^{\text{ПОМОЩЬ}}, S^{\text{ПОЛОЖЕНИЕ}}, S^{\text{ТРАНСПОРТИРОВКА}}\}. \quad (2.1)$$

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 (2.1), который обеспечивал бы максимум эффективности процесса спасения.

2.2. Модель эффективности процесса спасения пораженных в результате аварий на опасных производственных объектах

С точки зрения системного подхода, эффективность рассматривается как обобщенное свойство системы, характеризующая степень или полноту достижения цели ее функционирования. Основным требованием при выборе показателя эффективности A_0 является его соответствие цели операции, которая отображается требуемым результатом $Y^{\text{ТР}}$.

Кроме того, показатель эффективности должен удовлетворять следующим требованиям [37]:

- содержательности (физический, экономический или иной смысл);
- интерпретируемости (истолкованием полученных математических зависимостей и результатов применительно к рассматриваемой конкретной области);
- измеримости;
- соответствия системе предпочтений лица, принимающего решение.

Можно выявить два типа основных показателей эффективности спасения пораженных [64].

Первый тип зависимости эффективности (\mathcal{E}) от допущенного ущерба (Y_D) характеризуется наличием порогового ущерба (Y^*) (рис. 2.3, а). Если величина допущенного ущерба превосходит величину порогового ущерба, то цель применения РТС можно считать не достигнутой, если же не превосходит – цель применения РТС достигнута. Наиболее емким показателем эффективности в этом случае является вероятность $\mathcal{E} = P(Y_D \leq Y^*)$ того, что в результате применения РТС будет допущен ущерб не больше порогового, т.е. вероятность достижения поставленной цели.

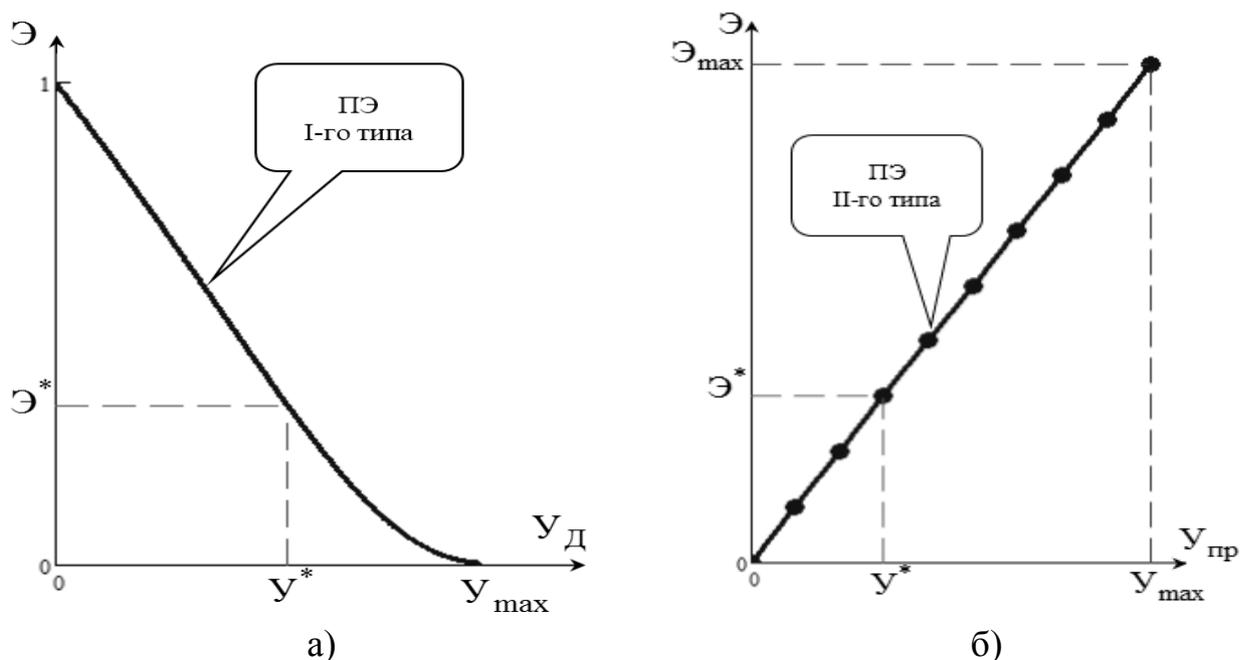


Рисунок 2.3 – Гипотетические графики зависимости показателя эффективности от: а) допущенного и б) предотвращенного ущерба

Второй тип зависимости эффективности от предотвращенного ущерба (рис. 2.3, б) имеет место, когда целью применения РТС является максимальное сокращение возможного числа пораженных. Показателем эффективности при этом является математическое ожидание предотвращенного ущерба – $\mathcal{E} = M(Y_{\text{пр}})$.

Главной целью спасения пораженных является обнаружение максимального числа живых пораженных и их эвакуация из опасной зоны. В соответствии с этой целью показателем эффективности будет математическое ожидание числа обнаруженных и спасенных пораженных ($N_{\text{сп}}$) – $\mathcal{E} = M(N_{\text{сп}})$.

В качестве критерия эффективности спасения пораженных $K_{\text{сп}}$ может быть принят критерий оптимальности [45], в соответствии с которым необходимо обнаружить и спасти максимальное число пораженных в единицу времени:

$$K_{\text{сп}} = \frac{M[N_{\text{сп}}]}{T_{\text{п}}} = \frac{M[N_0 - N - N_{\text{нсп}}]}{T_{\text{п}}} \rightarrow \max, \quad (2.2)$$

где $M[]$ – математическое ожидание; $T_{\text{п}}$ – 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 примем известный закон гибели пораженных:

$$N = N_0 e^{-\alpha T_{\text{п}}}, \quad (2.3)$$

где α — показатель темпа гибели:

$$\alpha = \frac{1}{T_{\text{сп}}}, \quad (2.4)$$

где $T_{\text{ср}}$ – среднее время выживания с момента возникновения ЧС до гибели пораженного, ч.

Из формулы (2.3) видно, что чем быстрее будет оказана помощь пораженным, тем больше число спасенных. Опыт показывает, что сокращение времени начала спасательных работ в завалах зданий (сооружений) с 6 часов до 1 часа уменьшает общие потери на 30÷40%, а повышение темпа работ в два раза также увеличивает число спасенных на 30÷40% [67]. Ключевым параметром эффективности спасения пораженных является среднее время $T_{\text{ср}}$ (2.4) выживания с момента возникновения ЧС до гибели пораженного. Данный параметр является переменной величиной, зависящей от вида ЧС, степени поражения пострадавших (при условии неоказания помощи) и правильности оказания помощи. Для его определения может быть использована одна из известных *методик оценки последствий ЧС, например, аварий на опасных объектах* [41].

Таким образом, 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. Транспортировка пораженных, отнесенных к категории «Черная» (табл. 1.1) нецелесообразна. Транспортировка пораженных категории «Красная» возможна только с привлечением специалистов. Правильное положение транспортировки пораженного, отнесенного к категории «Зеленая» или «Желтая» позволит повысить выживаемость пораженного за счет сокращения времени действия агрессивной среды, а неправильное положение транспортировки пораженного уменьшит среднее время выживания, тем самым, увеличив показатель темпа гибели. Учитывая данные обстоятельства, показатель темпа гибели определим следующим образом:

$$\alpha = \frac{K_{\text{кат}}^{\text{П}} \cdot K_{\text{пол}}^{\text{П}}}{T_{\text{ср}}}, \quad (2.5)$$

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

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

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

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

$$T_{\Pi} = t_{\text{обнаруж.}}^{\text{ЧС}} + t_{\text{предв.}}^{\text{ЧС}} + t_{\text{СПАС.}}^{\Pi}, \quad (2.6)$$

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

Очевидно, что время $t_{\text{СПАС.}}^{\Pi}$ проведения поиска и спасения пораженных зависит от способа спасения S_i (2.1), тогда 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

$$K_{\text{сп}}(S_0) = \max_i K_{\text{сп}i}(S_i), \quad (2.7)$$

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

$$t_{\text{СПАС.}i}^{\text{П}}(S_i) \leq T_{\text{СПАС}}^{\text{ЗАД}}, \quad (2.8)$$

число применяемых РТС поиска и спасения пораженных

$$M_{\text{РТС СПАС.}i}(S_i) \leq M_{\text{РТС СПАС.}}^{\text{ДОП.}}, \quad (2.9)$$

число специалистов (спасателей), способных оказать первую помощь

$$M_{\text{СПЕЦ.}i}(S_i) \leq M_{\text{СПЕЦ.}}^{\text{ДОП.}}, \quad (2.10)$$

число применяемых РТС транспортировки пораженных

$$M_{\text{РТС ТРАНСП.}i}(S_i) \leq M_{\text{РТС ТРАНСП.}}^{\text{ДОП.}}, \quad (2.11)$$

Решение задачи (2.7) предусматривает генерацию альтернативных способов спасения, удовлетворяющих условиям (2.8)-(2.11), и оценку их эффективности.

2.3. Постановка частных задач повышения эффективности процесса спасения пораженных

Значительному снижению сложности решаемой задачи (2.7) способствует принятая декомпозиция способа спасения поражённых на отдельные действия¹ (2.1), а времени $t_{\text{СПАС.}}^{\text{П}}$ на отдельные составляющие. Так (рис. 2.2) время $t_{\text{СПАС.}}^{\text{П}}$ проведения поиска и спасения пораженного складывается из времени $t_{\text{розыск}}^{\text{П}}$ розыска пораженного, времени $t_{\text{травма}}^{\text{П}}$ определения признаков травм и их наличия, времени $t_{\text{сорт.}}^{\text{П}}$ сортировки, времени $t_{\text{приб.}}^{\text{П}}$ прибытия специалистов и/или РТС транспортировки, времени $t_{\text{полож.}}^{\text{П}}$ определения положения для транспортировки пораженного, времени $t_{\text{трансп}}^{\text{П}}$ погрузки и транспортировки пораженного:

¹ Учитывая сложность данных действий и возможность реализации по отдельности в последующем будем также применять к ним понятие «способ»

$$t_{\text{СПАС.}}^{\text{П}} = t_{\text{розыск}}^{\text{П}} + t_{\text{травма}}^{\text{П}} + t_{\text{сорт.}}^{\text{П}} + t_{\text{приб.}}^{\text{П}} + t_{\text{полож.}}^{\text{П}} + t_{\text{трансп.}}^{\text{П}} \cdot \quad (2.12)$$

Тогда повышение эффективности процесса спасения пораженных в результате аварий на ОПО может быть достигнуто путем минимизации времени $\sum_{i=1}^{N_{\text{СП}}} t_{\text{СПАС.}i}^{\text{П}}$ спасения пораженных. Очевидно, что указанные составляющие времени проведения поиска и спасения пораженных зависят от способов $S^{\text{РОЗЫСК}}$ розыска пораженных, способов $S^{\text{ТРАВМА}}$ определения признаков травм и их наличия, способов $S^{\text{КАТЕГОРИЯ}}$ определения категории пораженного, способов $S^{\text{РЕШЕНИЕ}}$ выработки решения относительно дальнейших действий, способов $S^{\text{ПРИБЫТИЕ}}$ прибытия специалистов и/или РТС транспортировки, способов $S^{\text{ПОМОЩЬ}}$ оказания первой помощи, способов $S^{\text{ПОЛОЖЕНИЕ}}$ выбора положения для транспортировки, способов $S^{\text{ТРАНСПОРТИРОВКА}}$ погрузки и транспортировки пораженного в зону эвакуации.

Установленные зависимости между ними, а также формальная постановка частных задач повышения эффективности процесса спасения пораженных на их основе представлены ниже (табл. 2.1). Методы и алгоритмы решения задач планирования траекторий движения РТС (задачи № 1 и 5) при заданной геометрии окружающего пространства известны [59, 26, 104, 57, 72, 111, 119]. Традиционно траектория движения наземного РТС строится в два этапа: сначала находится глобальная траектория по картографическим данным [76], которая затем в процессе движения периодически уточняется по данным подсистемы компьютерного зрения [59]. Такому подходу свойственны противоречия и недостатки, обусловленные существенным отличием масштабов представления информации на этих двух этапах [1].

В [104] представлен новый метод локального планирования пути при навигации робота, основанный на теории опорных векторов и использующий последовательные позиции траектории глобального пути. Полученная в результате применения подхода локальная карта проходимости используется для

построения безопасной и оптимальной траектории движения интеллектуального мобильного робота с помощью нейронной сети формально-логического типа.

Необходимость поиска глобального пути актуализирует задачу по разработке методики транспортировки пораженного с учетом габаритных размеров и требований к минимизации энергопотребления автоматизированных робототехнических средств [51, 50]. Применение указанных параметров, кроме того, расширяет область известных знаний о параметрах, используемых в логистике, а учет препятствий (завалов) при построении глобального пути (путей) позволяет устранить недостаток свободного от коллизий метода движения робота к человеку, изложенного в [145]. Способствует этому применение метода статистической идентификации объектов с использованием параметрического обучения, позволяющего компенсировать искажение изображений [4].

Использование БПЛА для предварительной разведки маршрутов движения [2, 11] позволяет с одной стороны оперативно уточнять картографические данные, а с другой – с учетом этой информации планировать, как на первом, так и на втором этапах, оптимальные траектории движения, повышая тем самым эффективность использования АРТС при решении задач по ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. При этом возможен вариант трехэтапного планирования траекторий движения АРТС с использованием картографических данных (глобальная траектория), данных с БПЛА (тактическая траектория) и данных бортовой подсистемы компьютерного зрения АРТС (локальная траектория). В данном случае тактическая траектория, построенная по данным с БПЛА, представляет собой скрытую траекторию, проходящую по складкам местности.

Указанные решения могут быть модифицированы на случай транспортировки пораженного в зону эвакуации (задача № 8). Соответствующая модификация должна обеспечивать возможность безопасной транспортировки в зону эвакуации с учетом оптимального положения пораженного.

Таблица 2.1 – Частные задачи повышения эффективности процесса спасения пораженных

№ задачи	Способ	Частный критерий	Формальное описание частной задачи и способа ее решения
1	$S_i^{\text{РОЗЫСК}}$	$t_{\text{розыск}}^{\text{П}} \rightarrow \min$	Минимизация времени розыска пораженного за счет повышения достоверности распознавания пораженных и минимизации путей следования до них РТС спасения пораженных
2	$S_i^{\text{ТРАВМА}}$	$t_{\text{травма}}^{\text{П}} \rightarrow \min,$	Минимизация времени выявления травм у пораженного за счет минимизации числа признаков травм при сохранении требуемой точности определения
3	$S_i^{\text{КАТЕГОРИЯ}}$	$K_{\text{кат}}^{\text{П}} \rightarrow 1,$ $t_{\text{сорт.}}^{\text{П}} \rightarrow \min$	Минимизация времени сортировки пораженных для рационального планирования применения сил и средств оказания первой помощи и эвакуации пораженных
4	$S_i^{\text{РЕШЕНИЕ}}$	$\sum_{i=1}^{N_{\text{СП}}} t_{\text{СПАС.}i}^{\text{П}} \rightarrow \min,$ $N_{\text{СП}} \rightarrow \max$	Оптимальный выбор действий в отношении различных категорий пораженных с целью увеличения числа спасенных при минимальном времени спасения
5	$S_i^{\text{ПРИБЫТИЕ}}$	$t_{\text{приб.}}^{\text{П}} \rightarrow \min$	Минимизация времени специалистов и/или РТС транспортировки за счет минимизации проходимых ими путей
6	$S_i^{\text{ПОМОЩЬ}}$	$N_{\text{нсп}} \rightarrow \min$	Минимизация числа обнаруженных и неспасенных пораженных
7	$S_i^{\text{ПОЛОЖЕНИЕ}}$	$K_{\text{пол}}^{\text{П}} \rightarrow 1,$ $t_{\text{полож.}}^{\text{П}} \rightarrow \min$	Выбор оптимальной позы для транспортировки пораженного при минимизации времени ее определения
8	$S_i^{\text{ТРАНСПОРТИРОВКА}}$	$t_{\text{трансп}}^{\text{П}} \rightarrow \min$	Минимизация времени погрузки и транспортировки пораженных за счет минимизации проходимых ими путей с учетом габаритных показателей РТС и транспортируемого пораженного

Для повышения вероятности обнаружения пораженных (пострадавших) в [55] предложена методика комплексирования систем наблюдения, основанная на

выделении сегментов изображений с заданным тепловым контрастом в инфракрасном изображении и наложение этих сегментов на телевизионное изображение в виде пульсирующего яркостного пятна на соответствующем фрагменте последнего.

Имеющиеся результаты [55, 71, 32, 62] позволяют сделать вывод, что задача обследования зоны ЧС на предмет розыска пораженных с использованием РТС имеет эффективные решение, поэтому в настоящем исследовании может быть вынесена в ограничения.

Задача № 6, связанная с оказанием первой помощи, при современном уровне развития техники не может быть решена с использованием РТС, поэтому ее решение также выходит за рамки настоящего исследования.

Минимизация времени выявления травм у пораженного (задача № 2) при сохранении требуемой точности определения их признаков возможно лишь на основе моделирования процессов определения категории пораженного (задача № 3) и выбора оптимального положения для транспортировки (задача № 7).

Частная задача № 4 при существующих ограничениях (2.8)-(2.10) представляет собой задачу о назначениях и заключается в том, что имеются:

- 1) $N_{\text{обн}}^{\text{крас.}}$ обнаруженных пораженных, отнесенных к категории «Красная», которые могут быть спасены $M_{\text{СПЕЦ}}^{\text{крас.}}$ специалистами;
 - 2) $N_{\text{обн}}^{\text{желт.}}$ обнаруженных пораженных, отнесенных к категории «Желтая», которые могут быть спасены $M_{\text{СПЕЦ}}^{\text{желт.}}$ специалистами и $M_{\text{РТС СПАС.}}^{\text{желт.}}$ РТС транспортировки;
 - 3) $N_{\text{обн}}^{\text{зел.}}$ обнаруженных пораженных, отнесенных к категории «Зеленая», которые могут быть спасены (транспортированы) с помощью $M_{\text{РТС СПАС.}}^{\text{зел.}}$ РТС транспортировки;
- при этом назначение некоторого i -го специалиста (РТС транспортировки) для спасения (эвакуации) j -го пораженного связано с расходами равными

$$c_{ij} = t_{\text{розыск } i}^{\text{П}} + t_{\text{травма } i}^{\text{П}} + t_{\text{сорг. } i}^{\text{П}} + t_{\text{приб. } i}^{\text{П}} + t_{\text{полож. } i}^{\text{П}} + t_{\text{трансп. } i}^{\text{П}}. \quad (2.13)$$

Необходимо так распределить средства спасения (специалисты и/или РТС транспортировки) за обнаруженными пораженными, чтобы суммарные расходы были минимальны.

В этих условиях решение можно описать векторами \mathbf{X} и \mathbf{Y} с компонентами $x_{ij} \in \{0,1\}$ и $y_{ij} \in \{0,1\}$ соответственно, которые принимают значение 1 или 0 в зависимости от того, назначается i -й кандидат (специалисты и/или РТС транспортировки) за j -м пораженным, или нет. Математическая модель такой задачи имеет вид:

$$\sum_{i=1}^{M_{\text{СПЕЦ.}}^{\text{крас.}}} \sum_{j=1}^{N_{\text{обн}}^{\text{крас.}}} c_{ij} x_{ij} + \sum_{i=1}^{M_{\text{СПЕЦ.}}^{\text{желт.}}} \sum_{j=1}^{N_{\text{обн}}^{\text{желт.}}} c_{ij} x_{ij} \rightarrow \min, \quad (2.14)$$

$$\sum_{i=1}^{M_{\text{РТС ТРАНСП.}}^{\text{желт.}}} \sum_{j=1}^{N_{\text{обн}}^{\text{желт.}}} c_{ij} y_{ij} + \sum_{i=1}^{M_{\text{РТС ТРАНСП.}}^{\text{зел.}}} \sum_{j=1}^{N_{\text{обн}}^{\text{зел.}}} c_{ij} y_{ij} \rightarrow \min, \quad (2.15)$$

при ограничениях:

$$\sum_{i=1}^{M_{\text{СПЕЦ.}}^{\text{крас.}}} x_{ij} = 1, j = 1, \dots, N_{\text{обн}}^{\text{крас.}}; \quad \sum_{j=1}^{N_{\text{обн}}^{\text{крас.}}} x_{ij} = 1, i = 1, \dots, M_{\text{СПЕЦ.}}^{\text{крас.}}; \quad (2.16)$$

$$\sum_{i=1}^{M_{\text{СПЕЦ.}}^{\text{желт.}}} x_{ij} = 1, j = 1, \dots, N_{\text{обн}}^{\text{желт.}}; \quad \sum_{j=1}^{N_{\text{обн}}^{\text{желт.}}} x_{ij} = 1, i = 1, \dots, M_{\text{СПЕЦ.}}^{\text{желт.}}; \quad (2.17)$$

$$\sum_{i=1}^{M_{\text{РТС ТРАНСП.}}^{\text{желт.}}} y_{ij} = 1, j = 1, \dots, N_{\text{обн}}^{\text{желт.}}; \quad \sum_{j=1}^{N_{\text{обн}}^{\text{желт.}}} y_{ij} = 1, i = 1, \dots, M_{\text{РТС ТРАНСП.}}^{\text{желт.}}; \quad (2.18)$$

$$\sum_{i=1}^{M_{\text{РТС ТРАНСП.}}^{\text{зел.}}} y_{ij} = 1, j = 1, \dots, N_{\text{обн}}^{\text{зел.}}; \quad \sum_{j=1}^{N_{\text{обн}}^{\text{зел.}}} y_{ij} = 1, i = 1, \dots, M_{\text{РТС ТРАНСП.}}^{\text{зел.}}; \quad (2.19)$$

$$M_{\text{РТС ТРАНСП.}}^{\text{желт.}} = M_{\text{СПЕЦ.}}^{\text{желт.}} \quad (2.20)$$

$$M_{\text{РТС ТРАНСП.}}^{\text{желт.}} + M_{\text{РТС ТРАНСП.}}^{\text{зел.}} \leq M_{\text{РТС ТРАНСП.}}^{\text{ДОП.}} \quad (2.21)$$

$$M_{\text{СПЕЦ.}}^{\text{крас.}} + M_{\text{СПЕЦ.}}^{\text{желт.}} \leq M_{\text{СПЕЦ.}}^{\text{ДОП.}}, \quad (2.22)$$

Такая задача относится к классу задач линейного дискретного программирования, ее решение может быть получено на основе симплекс-метода.

В силу введенных выше ограничений проводимого исследования в дальнейшем будем считать:

1) заданным способ $S_i^{\text{РОЗЫСК}}$ розыска пораженного и, как следствие, $t_{\text{розыск}}^{\text{П}} = \text{const}$;

2) заданным способ $S_i^{\text{ПРИБЫТИЕ}}$ прибытия специалистов и/или РТС транспортировки к очередному пораженному и, как следствие, $t_{\text{приб.}}^{\text{П}} = \text{const}$;

3) заданными РТС поиска и спасения пораженных и их транспортировки в количестве $M_{\text{РТС СПАС.}}^{\text{ДОП.}}$ и $M_{\text{РТС ТРАНСП.}}^{\text{ДОП.}}$ соответственно. При этом подразумевается возможность применения только тех РТС и их подсистем (сенсорной, компьютерного зрения, анализа и синтеза речи и др.), которые либо уже используются, либо прошли полные лабораторные испытания [154, 155].

Тогда оптимальное решение задачи (2.15) при ограничениях (2.18)-(2.21) будет получено после решения задач № 2, 3 и 7 (табл. 2.1), основанного на моделировании процессов выявления травм у пораженного, его сортировки и выбора оптимальной позы для транспортировки, и задачи № 8, обеспечивающего транспортировку пораженного с учетом избранной позы для транспортировки (соответствующих габаритных показателей РТС и эвакуируемого пораженного).

2.4. Выводы по второй главе

В соответствии с принятой концепцией активного подвижного объекта способ применения робототехнического комплекса будет состоять в заранее разработанной последовательности действий, определяющей способ спасения пораженного и соответствующей основным этапам процесса спасения пораженного в результате аварий на опасном производственном объекте: розыск пораженных, определение признаков травм и их наличия, определение категории пораженного, выработка решения относительно дальнейших действий, прибытие специалистов и/или РТС транспортировки, оказание первой помощи на месте, выбор положения для транспортировки, погрузка и транспортировка пораженного в зону эвакуации.

Для выработки решения на проведение эвакуации или дальнейший поиск других пораженных предложена модель эффективности процесса спасения пораженных в результате аварий на опасных производственных объектах. Общая задача повышения эффективности процесса спасения пораженных в результате аварий на опасных производственных объектах формализована в следующем виде: необходимо найти оптимальный способ спасения, при котором достигается максимум числа спасенных пораженных за заданное время.

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 пораженного, его сортировки и выбора оптимальной позы для транспортировки, а также модификации решения по планированию траекторий движения РТС, обеспечивающего транспортировку пораженного с учетом избранной позы для транспортировки.

3. КОМПЛЕКС МОДЕЛЕЙ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ О СПОСОБЕ СПАСЕНИЯ ПОРАЖЕННЫХ

3.1. Формализация процесса принятия решений о способе спасения пораженного

Процессы определения категории пораженного (первичной сортировки) и положения для его транспортировки являются трудноформализуемыми, при разработке соответствующей модели могут быть использованы: деревья решений, метод анализа иерархий, продукционная модель представления знаний, нечеткие когнитивные модели, нейронные сети, байесовский вывод, а также байесовские сети доверия (БСД).

Недостатком *метода деревьев решений* является то, что они хорошо подходят для задач с небольшим числом возможных результатов, но неприменимы к наборам данных, где число возможных исходов достаточно велико [44]. *Метод анализа иерархий* основан на критерии отбора экспертов, поэтому нуждается в использовании дополнительных процедур с соответствующими алгоритмами, требующими специального изучения [83]. Существенным недостатком *продукционной модели* является то, что при накоплении достаточно большого числа (порядка нескольких сотен) продукций они начинают противоречить друг другу. Указанный недостаток делает невозможным применение продукционной модели в процессе функционирования сложной слабоформализуемой системы [70]. К недостаткам *когнитивного моделирования* следует отнести невозможность доказательства адекватности разработанной модели [36]. Значительную сложность применения *искусственных нейронных сетей* представляет выбор их архитектуры для решаемой задачи и низкая скорость процесса обучения [5].

Относительно свободным от указанных недостатков при решении задачи моделирования процесса выбора положения для транспортировки пораженного является байесовский подход, основанный на принципе максимального

использования имеющейся априорной информации, ее непрерывного пересмотра и переоценки с учетом получаемых выборочных данных об исследуемом явлении или процессе. Так как байесовский метод основан на наблюдениях, то с его помощью можно последовательно вычислить вероятность истинной гипотезы. При этом новые наблюдения или решения применяются для модификации априорных вероятностей, которые, в свою очередь, необходимы для вычисления апостериорных вероятностей гипотез. Кроме того, в отсутствие эмпирических данных рассматриваемый метод обеспечивает использование субъективных вероятностных оценок для априорных гипотез [56].

Байесовский вывод может быть развит на сети (графы), в которых узлы (вершины) представлены случайными переменными (наблюдениями или состояниями) различных типов, а связи между ними (ребра) показывают их вероятностные зависимости. Преимуществами байесовских сетей доверия (БСД) над остальными методами являются способность моделировать сложные зависимости между узлами и возможность простого интегрирования изменяющейся во времени разнородной информации [151].

БСД используются для рассуждений в условиях неопределенности и все чаще применяются в диагностике заболеваний, выборе оптимального курса лечения пациента, предсказании исхода заболевания, построении моделей заболеваний в клинической эпидемиологии [170]. Данный научно-методический аппарат позволяет комбинировать имеющиеся статистические данные о характеристиках здоровья пациентов в дополнение к экспертной информации, которую предоставляют врачи-специалисты. Кроме того, БСД (по сравнению с другими методами) позволяют моделировать возможность возникновения нескольких заболеваний, а ее элементы имеют достаточно простую интерпретацию [136]. Важным достоинством моделей, опирающихся на принципы искусственного интеллекта, является возможность автоматического обучения структуры модели, то есть даже если первоначальная структура модели была неполной, то имеется возможность улучшить модель при помощи поступающих данных [172].

БСД обычно представляются графически в виде направленного ациклического графа и таблиц условных вероятностей для узлов графа, соответствующих определенным переменным [130]. Процесс работы с ними заключается в выполнении двух основных операций: обучения (формирования таблиц условных вероятностей) БСД на основе имеющихся данных о переменных сети [99, 109] и непосредственного использования БСД для вычисления различных вероятностей, связанных с переменными сети.

Учитывая взаимосвязь 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, комплекс моделей поддержки принятия решений о способе спасения пораженных может быть представлен следующим образом (рис. 3.1). Модели предложенного комплекса, построенные на основе БСД, рассмотрены ниже [144, 47, 49, 52, 53].

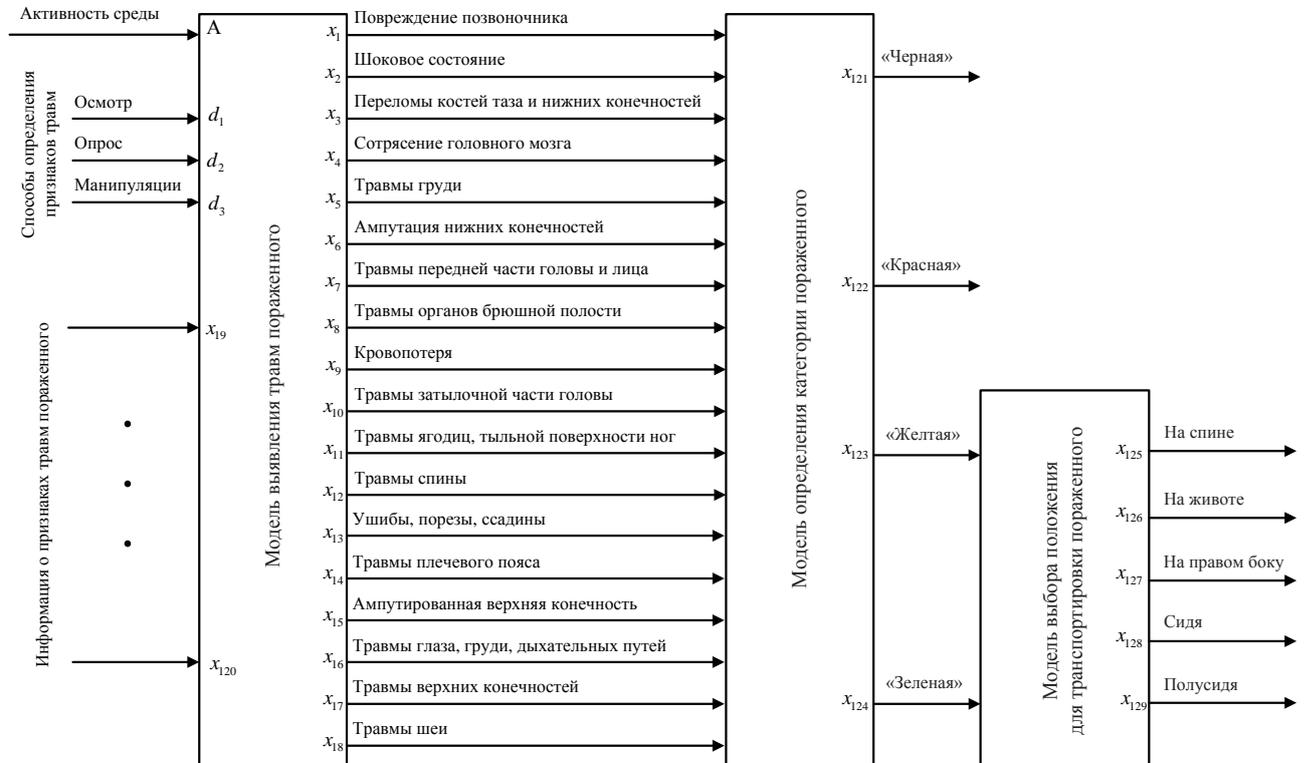


Рисунок 3.1 – Структура комплекса моделей поддержки принятия решений о способе спасения пораженных

3.2. Модель выявления травм у пораженного

Разработанная модель выявления травм у пораженного на основе БСД имеет следующий вид [49, 52]:

$$\langle \mathbf{T}, \mathbf{P}_T \rangle, \quad (3.1)$$

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

Вершинами графа \mathbf{T} являются следующие:

1. Дискретные переменные, обозначающие:

наиболее распространенные травмы (табл. А.1) – x_1, \dots, x_{18} [7, 22, 75, 90];

признаки травм (табл. А.2) – x_{19}, \dots, x_{120} ;

способы определения признаков травм (осмотр, опрос, манипуляции) – d , которые связаны с переменными x_{19}, \dots, x_{120} . При этом, если признак травмы не обнаруживается одним из способов определения травм, то связь между ними отсутствует, например, признак травмы «Шум в ушах» не имеет связи с «Осмотром» и «Манипуляциями»;

активность среды – A («высокая», «средняя», «низкая», «отсутствует»), от которой зависит применение способов определения травм. Информация об активности среды может быть введена в РТС либо уточнена роботом с помощью имеющихся у него датчиков шума, газа и т.д.;

2. Вершина действия, обозначающая обнаружение (необнаружение) пораженного, – O .

Параметрами сети \mathbf{P}_T являются:

1. Для вершины A , не имеющей родительских переменных, априорные вероятности (безусловные вероятности) того, что активность среды: «высокая», «средняя», «низкая», «отсутствует» – $P(\tilde{A}_m)$, $m = 1 \dots 4$. Знак « \sim » обозначает положительное или отрицательное означивание переменной \bar{x} [82].

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

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

В предложенной модели можно выделить следующие подграфы:

подграф T_0 «Условия определения признаков травм» (рис. 3.2), определяющий взаимосвязи между вершинами A , O и способами определения признаков травм d_1, \dots, d_3 ;

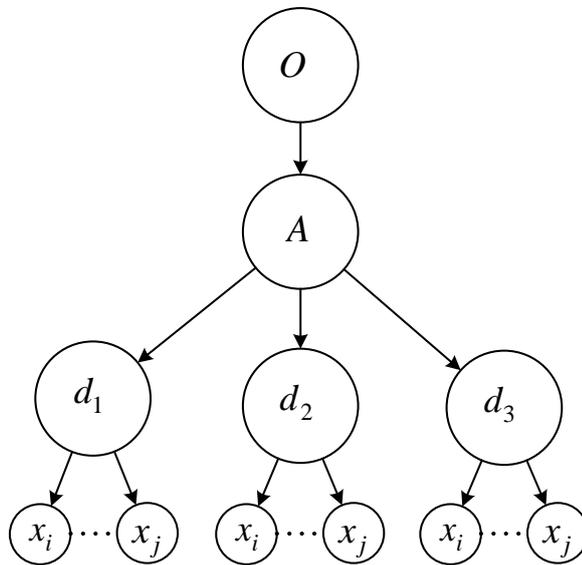


Рис. 3.2. Подграф T_0 «Условия определения признаков травм»

подграф T_1 «Повреждение позвоночника» (рис. А.1) с таблицей условных вероятностей $P(x_1 | \tilde{x}_{19} \tilde{x}_{20} \tilde{x}_{21} \tilde{x}_{22} \tilde{x}_{23} \tilde{x}_{24} \tilde{x}_{25})$;

подграф T_2 «Шоковое состояние» (рис А.2) с таблицей условных вероятностей $P(x_2 | \tilde{x}_{23} \tilde{x}_{26} \tilde{x}_{27} \tilde{x}_{28} \tilde{x}_{29} \tilde{x}_{30} \tilde{x}_{31} \tilde{x}_{32} \tilde{x}_{33})$;

подграф T_3 «Переломы костей таза и нижних конечностей» (рис. А.3) с таблицей условных вероятностей $P(x_3 | \tilde{x}_{21} \tilde{x}_{23} \tilde{x}_{30} \tilde{x}_{34} \tilde{x}_{35} \tilde{x}_{36} \tilde{x}_{37} \tilde{x}_{38} \tilde{x}_{39} \tilde{x}_{40} \tilde{x}_{41} \tilde{x}_{42} \tilde{x}_{43} \tilde{x}_{44} \tilde{x}_{45})$;

подграф T_4 «Сотрясение головного мозга» (рис. А.4) с таблицей условных вероятностей $P(x_4 | \tilde{x}_2 \tilde{x}_{46} \tilde{x}_{47} \tilde{x}_{48} \tilde{x}_{49} \tilde{x}_{50} \tilde{x}_{51} \tilde{x}_{52} \tilde{x}_{53} \tilde{x}_{54} \tilde{x}_{55})$;

подграф T_5 «Травмы груди» (рис. А.5) с таблицей условных вероятностей $P(x_5 | \tilde{x}_{23} \tilde{x}_{33} \tilde{x}_{56} \tilde{x}_{57} \tilde{x}_{58} \tilde{x}_{59} \tilde{x}_{60} \tilde{x}_{61} \tilde{x}_{62} \tilde{x}_{63} \tilde{x}_{64} \tilde{x}_{65} \tilde{x}_{66} \tilde{x}_{67} \tilde{x}_{68})$;

подграф T_6 «Ампутированная нижняя конечность» (рис. А.6) с таблицей условных вероятностей $P(x_6 | \tilde{x}_{69})$;

подграф T_7 «Травмы передней части головы и лица» (рис. А.7) с таблицей условных вероятностей $P(x_7 | \tilde{x}_{37} \tilde{x}_{38} \tilde{x}_{40} \tilde{x}_{41} \tilde{x}_{44} \tilde{x}_{70} \tilde{x}_{71} \tilde{x}_{72} \tilde{x}_{73} \tilde{x}_{74})$;

подграф T_8 «Травмы органов брюшной полости» (рис. А.8) с таблицей условных вероятностей $P(x_8 | \tilde{x}_2 \tilde{x}_{23} \tilde{x}_{28} \tilde{x}_{29} \tilde{x}_{32} \tilde{x}_{33} \tilde{x}_{37} \tilde{x}_{46} \tilde{x}_{71} \tilde{x}_{75} \tilde{x}_{76} \tilde{x}_{77} \tilde{x}_{78} \tilde{x}_{79} \tilde{x}_{80} \tilde{x}_{81} \tilde{x}_{82} \tilde{x}_{83} \tilde{x}_{84})$;

подграф T_9 «Кровопотеря» (рис. А.9) с таблицей условных вероятностей $P(x_9 | \tilde{x}_2 \tilde{x}_{48} \tilde{x}_{55} \tilde{x}_{78} \tilde{x}_{85} \tilde{x}_{86} \tilde{x}_{87})$;

подграф T_{10} «Травмы затылочной части головы» (рис. А.10) с таблицей условных вероятностей $P(x_{10} | \tilde{x}_4 \tilde{x}_{80} \tilde{x}_{88} \tilde{x}_{89} \tilde{x}_{90} \tilde{x}_{91} \tilde{x}_{92} \tilde{x}_{93} \tilde{x}_{94} \tilde{x}_{95} \tilde{x}_{96} \tilde{x}_{97})$;

подграф T_{11} «Травмы ягодиц, тыльной поверхности ног» (рис. А.11) с таблицей условных вероятностей $P(x_{11} | \tilde{x}_3 \tilde{x}_{37} \tilde{x}_{38} \tilde{x}_{40} \tilde{x}_{71} \tilde{x}_{98} \tilde{x}_{99})$;

подграф T_{12} «Травмы спины» (рис. А.12) с таблицей условных вероятностей $P(x_{12} | \tilde{x}_1 \tilde{x}_{37} \tilde{x}_{38} \tilde{x}_{99} \tilde{x}_{100})$;

подграф T_{13} «Ушибы, порезы, ссадины» (рис. А.13) с таблицей условных вероятностей $P(x_{13} | \tilde{x}_{37} \tilde{x}_{40} \tilde{x}_{71} \tilde{x}_{83} \tilde{x}_{98})$;

подграф T_{14} «Травмы плечевого пояса» (рис. А.14) с таблицей условных вероятностей $P(x_{14} | \tilde{x}_{38} \tilde{x}_{40} \tilde{x}_{41} \tilde{x}_{44} \tilde{x}_{81} \tilde{x}_{83} \tilde{x}_{101} \tilde{x}_{102} \tilde{x}_{103} \tilde{x}_{104})$;

подграф T_{15} «Ампутированная верхняя конечность» (рис. А.15) с таблицей условных вероятностей $P(x_{15} | \tilde{x}_{105})$;

подграф T_{16} «Травмы глаза, груди, дыхательных путей» (рис. А.16) с таблицей условных вероятностей $P(x_{16} | \tilde{x}_5 \tilde{x}_{28} \tilde{x}_{37} \tilde{x}_{40} \tilde{x}_{41} \tilde{x}_{72} \tilde{x}_{106} \tilde{x}_{107} \tilde{x}_{108} \tilde{x}_{109} \tilde{x}_{110})$;

подграф T_{17} «Травмы верхних конечностей» (рис. А.17) с таблицей условных вероятностей $P(x_{17} | \tilde{x}_{44} \tilde{x}_{111} \tilde{x}_{112} \tilde{x}_{113} \tilde{x}_{114} \tilde{x}_{115} \tilde{x}_{116})$;

подграф T_{18} «Травмы шеи» (рис. А.18) с таблицей условных вероятностей $P(x_{18} | \tilde{x}_{21} \tilde{x}_{38} \tilde{x}_{40} \tilde{x}_{99} \tilde{x}_{117} \tilde{x}_{118} \tilde{x}_{119} \tilde{x}_{120})$.

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:

$$P(x_4 | \tilde{x}_2 \tilde{x}_{46} \tilde{x}_{47} \tilde{x}_{48} \tilde{x}_{49} \tilde{x}_{50} \tilde{x}_{51} \tilde{x}_{52} \tilde{x}_{53} \tilde{x}_{54} \tilde{x}_{55}) = 0,1, \quad (3.2)$$

если в (3.2) имеет место одна пропозициональная формула $x_i, i = 2, 46, 47, 48 \dots 55$;

$$P(x_4 | \tilde{x}_2 \tilde{x}_{46} \tilde{x}_{47} \tilde{x}_{48} \tilde{x}_{49} \tilde{x}_{50} \tilde{x}_{51} \tilde{x}_{52} \tilde{x}_{53} \tilde{x}_{54} \tilde{x}_{55}) = 0,2, \quad (3.3)$$

если в (3.3) имеет место две пропозициональных 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 $(x_6 \dots x_{23})$. Уточнение таблиц условных вероятностей для них осуществляется на основе экспертной информации, имеющихся медицинских исследований, направленных на выявление подобных взаимосвязей между элементами процесса диагностики травм, накопленных статистических данных.

Для получения экспертной информации относительно травм, признаков травм и их взаимосвязи в рамках проводимого исследования разработано программное средство, позволяющее формировать опросные листы. С использованием последних проведено анкетирование специалистов в области травматологии [48].

3.3. Модель определения категории пораженного

Разработанная модель (рис. 3.3) определения категории пораженного в виде БСД имеет следующий вид:

$$\langle \mathbf{C}, \mathbf{P}_C \rangle \quad (3.4)$$

где \mathbf{C} – ациклический направленный граф; \mathbf{P}_C – множество параметров, определяющих БСД.

Вершинами графа \mathbf{C} являются дискретные переменные, обозначающие:

категории пораженных (табл. 3.1) – x_{121}, \dots, x_{124} ;

наиболее распространенные травмы (табл. А.1) – x_1, \dots, x_{18} ;

Параметрами сети \mathbf{P}_C являются условные вероятности зависимости категории пораженных от травм – $P(\tilde{x}_i | \tilde{x}_j)$, $i = 121 \dots 124$, $j = 1 \dots 18$.

Таблица 3.1 – Категории пораженных

Показатель	Наименование
x_{121}	Черная
x_{122}	Красная
x_{123}	Желтая
x_{124}	Зеленая

В предложенной модели можно выделить следующие подграфы:

подграф C_1 «Чёрная» с таблицей условных вероятностей $P(x_{121} | \tilde{x}_1 \tilde{x}_2 \tilde{x}_3 \tilde{x}_4 \tilde{x}_5 \tilde{x}_6 \tilde{x}_7 \tilde{x}_8 \tilde{x}_9 \tilde{x}_{10} \tilde{x}_{11} \tilde{x}_{12} \tilde{x}_{13} \tilde{x}_{14} \tilde{x}_{15} \tilde{x}_{16} \tilde{x}_{17} \tilde{x}_{18})$;

подграф C_2 «Красная» с таблицей условных вероятностей $P(x_{122} | \tilde{x}_1 \tilde{x}_2 \tilde{x}_3 \tilde{x}_4 \tilde{x}_5 \tilde{x}_6 \tilde{x}_7 \tilde{x}_8 \tilde{x}_9 \tilde{x}_{10} \tilde{x}_{11} \tilde{x}_{12} \tilde{x}_{13} \tilde{x}_{14} \tilde{x}_{15} \tilde{x}_{16} \tilde{x}_{17} \tilde{x}_{18})$;

подграф C_3 «Жёлтая» с таблицей условных вероятностей $P(x_{123} | \tilde{x}_1 \tilde{x}_2 \tilde{x}_3 \tilde{x}_4 \tilde{x}_5 \tilde{x}_6 \tilde{x}_7 \tilde{x}_8 \tilde{x}_9 \tilde{x}_{10} \tilde{x}_{11} \tilde{x}_{12} \tilde{x}_{13} \tilde{x}_{14} \tilde{x}_{15} \tilde{x}_{16} \tilde{x}_{17} \tilde{x}_{18})$;

подграф C_4 «Зеленая» с таблицей условных вероятностей $P(x_{124} | \tilde{x}_1 \tilde{x}_2 \tilde{x}_3 \tilde{x}_4 \tilde{x}_5 \tilde{x}_6 \tilde{x}_7 \tilde{x}_8 \tilde{x}_9 \tilde{x}_{10} \tilde{x}_{11} \tilde{x}_{12} \tilde{x}_{13} \tilde{x}_{14} \tilde{x}_{15} \tilde{x}_{16} \tilde{x}_{17} \tilde{x}_{18})$.

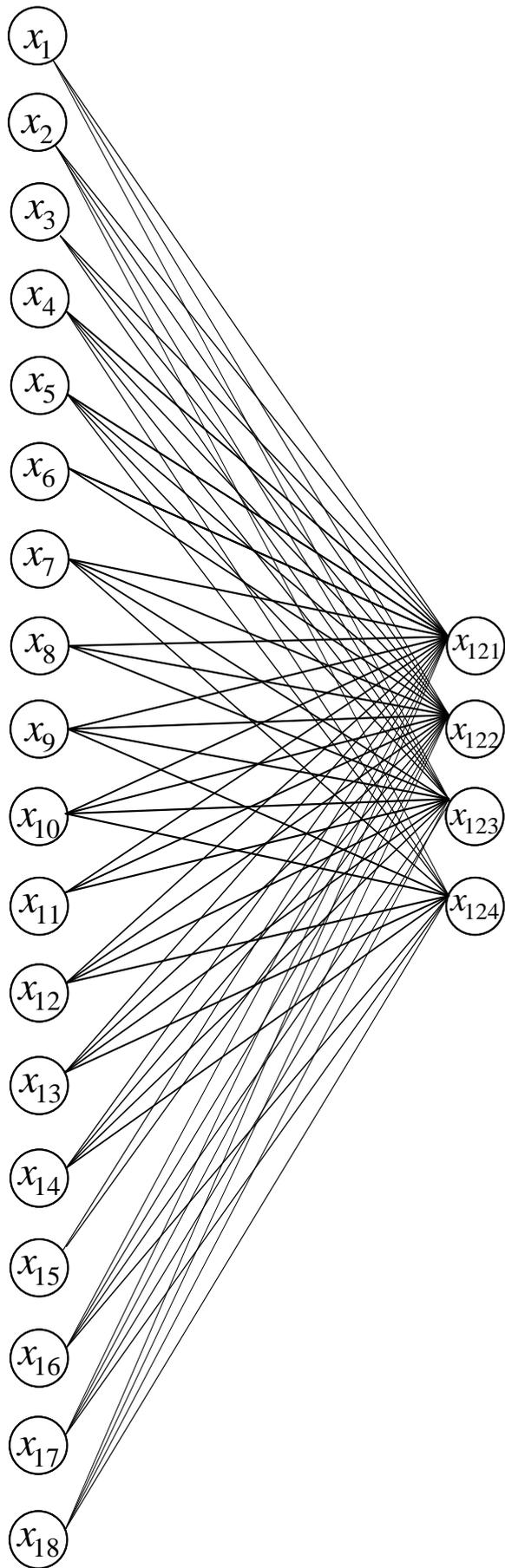


Рис. 3.3. Модель определения категории пораженного

Для подграфа C_1 на начальном этапе формирования таблицы условных вероятностей события $(x_1, x_2, \dots, x_{18})$ являются неравновероятностными, при этом вклад каждого события в формирование апостериорной вероятности события x_{121} «Чёрная» также не равнозначен. Уточнение таблиц условных вероятностей для них осуществляется на основе экспертной информации, имеющих медицинских исследований, направленных на выявление подобных взаимосвязей между элементами процесса диагностики травм, накопленных статистических данных.

Аналогичный подход справедлив для всех подграфов C_1, \dots, C_4 категорий пораженных $(x_{121}, \dots, x_{124})$.

По результатам моделирования на основе полученных данных для конкретного пораженного, мы сможем сделать вывод о необходимости:

- 1) зафиксировать, где и как лежит тело для дальнейших экспертиз, если пораженный попал в категорию «Чёрная»;
- 2) вызвать специалистов для оказания первой помощи и роботов для эвакуации (транспортировки), если пораженный попал в категорию «Красная»;
- 3) вызвать роботов для транспортировки или сопровождения, если пораженный попал в категорию «Желтая» или «Зеленая».

3.4. Модель выбора положения для транспортировки пораженного

Разработанная модель (рис. 3.4) выбора положения для транспортировки пораженного в виде БСД имеет следующий вид:

$$\langle \mathbf{G}, \mathbf{PAR} \rangle \quad (3.5)$$

где \mathbf{G} – ациклический направленный граф; \mathbf{PAR} – множество параметров, определяющих БСД.

Вершинами графа \mathbf{G} являются дискретные переменные, обозначающие: позы для транспортировки (табл. 3.2) – x_{125}, \dots, x_{129} ;

травмы (табл. А.1) – x_1, \dots, x_{18} , соответствующие категориям «Желтая» и «Зеленая» (табл. 3.1).

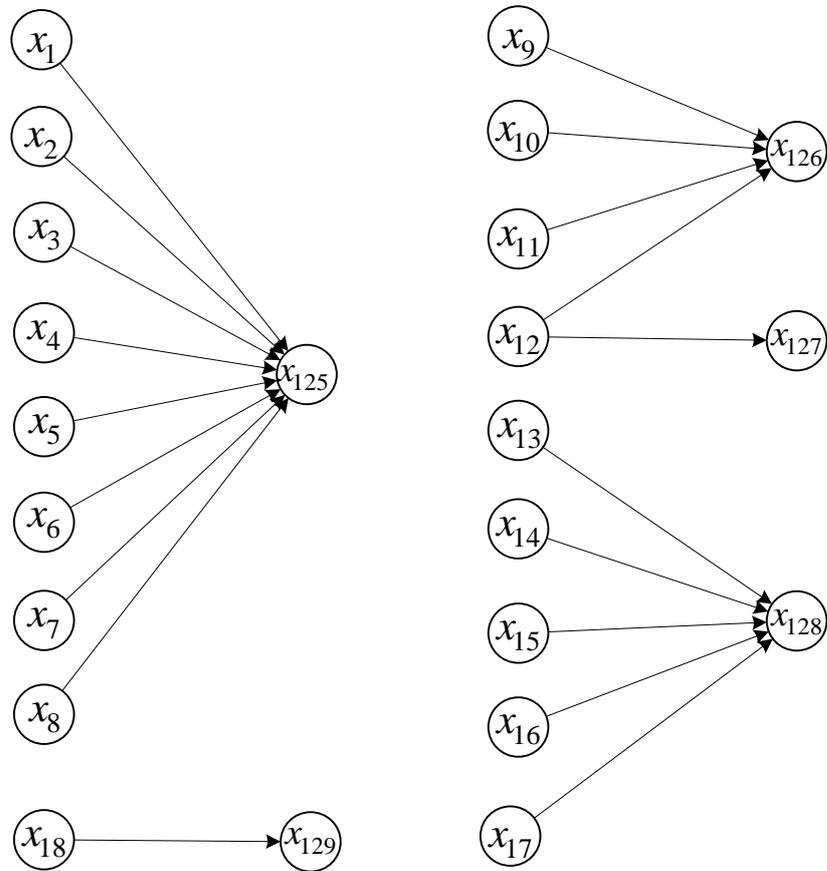


Рис. 3.4. Модель положения для транспортировки пораженного

Таблица 3.2 – Оптимальные позы для транспортировки пораженных

Показатель	Наименование
x_{125}	На спине
x_{126}	На животе (с валиком под грудью и головой)
x_{127}	На правом боку
x_{128}	Сидя (с поднятой вверх рукой при ампутации)
x_{129}	Полусидячее положение со склоненной на грудь головой

Параметрами сети **PAR** являются [47] условные вероятности зависимости положений для транспортировки от травм (табл. 3.3) – $P(\tilde{x}_i | \tilde{x}_j)$, $i = 121 \dots 125$, $j = 1 \dots 18$.

Таблица 3.3 – Оптимальные позы транспортировки пораженных в зависимости от травмы

Вид травмы	Поза
Сотрясение головного мозга	На спине
Травмы передней части головы и лица	
Повреждение позвоночника	
Переломы костей таза и нижних конечностей	
Шоковое состояние	
Травмы органов брюшной полости	
Травмы груди	
Острые хирургические заболевания	
Ампутация нижних конечностей	На спине, с валиком под травмированной ногой
Кровопотеря	На животе с валиком под грудью и головой
Травмы спины	На животе или правом боку
Травмы затылочной части головы	На животе
Травмы спины, ягодиц, тыльной поверхности ног	
Травмы шеи	Полусидячее положение со склоненной на грудь головой
Ампутированная верхняя конечность	Сидя с поднятой вверх рукой
Травмы глаза, груди, дыхательных путей	Сидя
Травмы верхних конечностей	
Ушибы, порезы, ссадины	
Травмы плечевого пояса	

Для графа G таблица условных вероятностей имеет вид:

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

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

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

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

$$P(x_{126} | x_9 x_{10} x_{11} x_{12}) = 1; \quad P(x_{126} | \bar{x}_9 \bar{x}_{10} \bar{x}_{11} x_{12}) = 0,5; \quad P(x_{126} | \tilde{x}_9 \tilde{x}_{10} \tilde{x}_{11} x_{12}) = 0,75,$$

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

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

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

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

3.5 Анализ процесса принятия решений о способе спасения пораженного

Главное назначение БСД – апостериорный вывод. Суть апостериорного вывода заключается в следующем: при поступлении свидетельства (новой информации) необходимо приравнять к нулю несовместимые со свидетельством вероятности исходов и нормировать оставшиеся вероятности, учитывая априорные данные с тем, чтобы вероятности оставшихся исходов в сумме снова давали единицу [130, 150]. Априорные данные пересчитываются, в результате получается апостериорная оценка, которая, в свою очередь, будет являться априорной информацией в случае поступления новых свидетельств. Апостериорный вывод в БСД основан на процедуре опроса БСД. Под опросом БСД понимается вычисление безусловного распределения переменной на основе условных распределений БСД и поступивших данных (свидетельств).

В проведенном исследовании применен алгоритм опроса БСД, использующий представление (кластеризацию) исходной сети в виде так называемого дерева сочленений (junction tree). Такой подход позволяет перейти от опроса сети общего вида к работе с древовидным графом, что существенно сокращает время вычислений, избавляя от необходимости во многих промежуточных расчетах. Данный алгоритм имеет ряд преимуществ:

1) использование дерева сочленений возможно для сетей любой топологической сложности, что делает этот алгоритм универсальным и применимым к очень широкому кругу задач;

2) в отличие от стохастических алгоритмов опроса дерево сочленений позволяет получить точные, а не приближенные значения требуемых вероятностей, при этом алгоритм обладает достаточно высокой скоростью работы.

Во всех популярных программах работы с БСД именно алгоритм дерева сочленений (в той или иной реализации) является основным алгоритмом опроса. Кроме того, для ряда задач, предполагающих работу с БСД и требующих точных результатов при сложной топологии сети, не существует приемлемого пути опроса, не использующего представления сети в виде дерева сочленений [39].

На рисунке 3.5 представлен начальный момент времени (пораженный не обнаружен), когда РТС действий (осмотра, опроса, манипуляций) не производит. Предполагается, что пораженный где-то находится и у него присутствует весь набор признаков травм, положение для транспортировки при этом не выбирается.

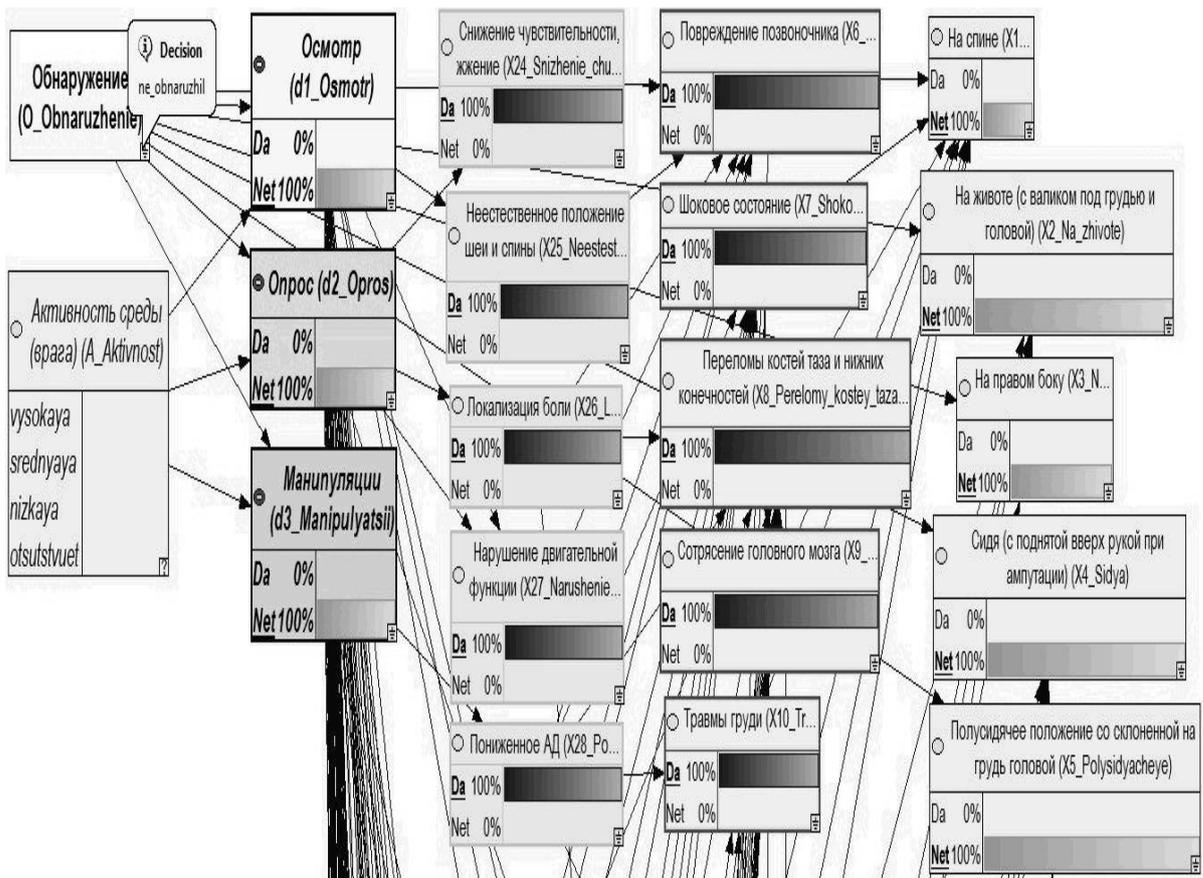


Рисунок 3.5 – Фрагмент БСД, когда пораженный не обнаружен

На рисунке 3.6 представлен результат апостериорного вывода в БСД при поступлении информации о том, что пораженный обнаружен, активность среды — «средняя» (проводится только «Осмотр» и «Опрос»), а также информации о пораженном (табл. 3.4).

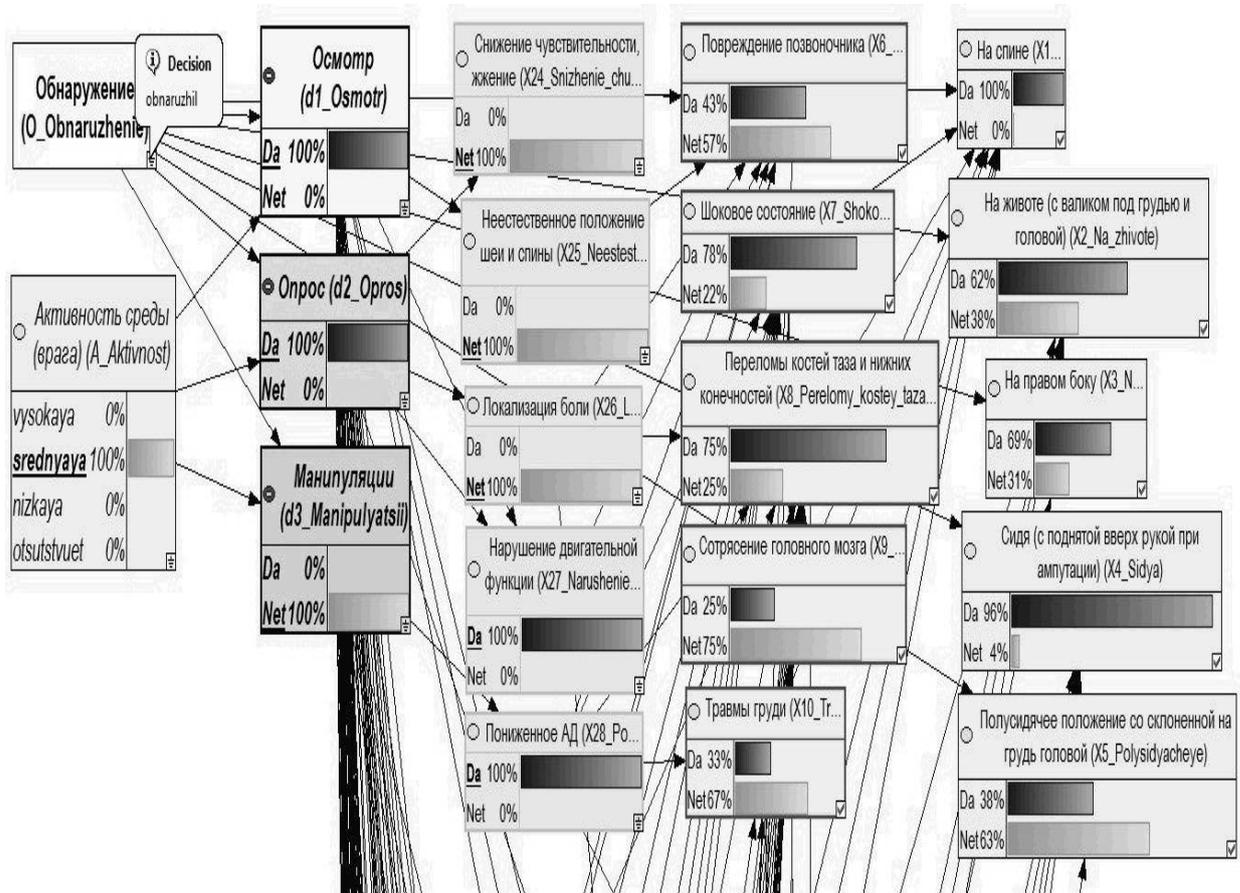


Рисунок 3.6 – Фрагмент БСД при поступлении информации

Если пораженный обнаружен, то проводится действие «Осмотр», а в зависимости от активности среды — «Опрос» и «Манипуляции», в результате которых могут быть исключены определенные признаки травм, а следовательно, уменьшены вероятности связанных с ними травм, что влияет на выбор положения для транспортировки.

Оптимальное положение для транспортировки выбирается следующим образом:

$$x^* = \underset{x_i \in \{x_{125}, \dots, x_{129}\}}{\text{Arg max}} \{P(x_i | \tilde{x}_1, \dots, \tilde{x}_{18})\} \quad (3.6)$$

Результаты моделирования свидетельствуют, что разработанная БСД обеспечивает возможность решения задач вероятностного прогнозирования, базируясь на субъективных и неполных данных. Первые из них формируются в результате опроса пораженного, вторые – на основе систем компьютерного зрения (осмотр) и датчиков различного назначения (манипуляции), устанавливаемых на РТС.

Таблица 3.4 – Поступившая информация о пораженном

Усл. обозн.	Наличие						
A	средняя	x_{57}	Нет	x_{99}	Нет	x_{53}	Нет
d_1	Да	x_{59}	Нет	x_{101}	Нет	x_{54}	Нет
d_2	Да	x_{63}	Нет	x_{102}	Нет	x_{55}	Нет
d_3	Нет	x_{65}	Нет	x_{103}	Да	x_{56}	Нет
		x_{67}	Нет	x_{104}	Да	x_{58}	Нет
x_{25}	Нет	x_{71}	Нет	x_{106}	Нет	x_{64}	Нет
x_{30}	Да	x_{72}	Нет	x_{107}	Нет	x_{66}	Нет
x_{31}	Да	x_{73}	Да	x_{109}	Нет	x_{68}	Нет
x_{37}	Да	x_{74}	Нет	x_{110}	Нет	x_{77}	Нет
x_{38}	Да	x_{75}	Нет	x_{111}	Нет	x_{83}	Нет
x_{39}	Да	x_{76}	Да	x_{112}	Нет	x_{90}	Нет
x_{40}	Нет	x_{78}	Нет	x_{117}	Нет	x_{92}	Нет
x_{42}	Да	x_{79}	Нет	x_{118}	Нет	x_{97}	Нет
x_{43}	Да	x_{81}	Нет	x_{120}	Нет	x_{100}	Нет
x_{45}	Да	x_{82}	Нет	x_{121}	Нет	x_{108}	Нет
x_{46}	Да	x_{85}	Нет	x_{122}	Нет	x_{115}	Нет
x_{47}	Нет	x_{86}	Нет	x_{123}	Нет	x_{119}	Нет
x_{48}	Нет	x_{87}	Да	x_{124}	Нет	x_{27}	Да
x_{49}	Да	x_{89}	Да	x_{125}	Нет	x_{41}	Да
x_{50}	Да	x_{94}	Нет	x_{26}	Нет	x_{44}	Да
x_{51}	Да	x_{95}	Нет	x_{29}	Нет	x_{88}	Нет
x_{52}	Да	x_{96}	Нет	x_{36}	Нет	x_{93}	Нет

3.6. Анализ информативности признаков травм

В виду ограниченного числа соответствующих признаков для опроса пораженного предлагается использовать предметно-ориентированный синтез речи

на основе записанных заранее фраз (табл. 3.5) [79]. Их общая длительность при произнесении с разделительными паузами составила:

$$\sum_{1}^{24} t_{+pause} = 59,84 \text{ с,}$$

без них (непрерывно произносимая речь):

$$\sum_{1}^{24} t_{-pause} = 43,52 \text{ с.}$$

Таблица 3.5 – Перечень фраз, синтезируемых для опроса пораженного

№	Усл. обозн.	Фраза	t_{-pause}	t_{+pause}
1	x_{24}	Пошевелите пальцами, руками и ногами	2,930	3,520
2	x_{26}	Где болит?	0,879	1,680
3	x_{27}	Приподнимите и пошевелите руками и ногами	3,000	3,760
4	x_{29}	Есть ли онемение и где?	2,007	2,800
5	x_{36}	Назовите свое имя и сегодняшнюю дату	2,941	3,760
6	x_{41}	Пошевелите ногами	1,359	2,160
7	x_{44}	Приподнимите ноги	1,557	2,320
8	x_{53}	Голова кружится?	1,501	2,400
9	x_{54}	Вас тошнит?	1,039	2,000
10	x_{55}	Есть ли слабость?	1,215	1,920
11	x_{56}	Вас раздражает свет или звук?	2,421	3,120
12	x_{58}	Голова болит?	1,103	1,920
13	x_{60}	Есть ли шум в ушах?	1,506	2,720
14	x_{64}	Есть боль в области сердца?	1,856	2,560
15	x_{66}	Усиливается ли боль при кашле?	1,881	2,880
16	x_{68}	Есть ли боль в груди?	1,364	2,080
17	x_{77}	Видите как всегда? Есть ли изменения зрения?	3,343	4,400
18	x_{83}	Испытываете жажду?	1,379	2,080
19	x_{90}	Клонит ли ко сну?	1,148	1,920
20	x_{92}	Есть ли круги перед глазами?	1,694	2,800
21	x_{100}	Что произошло?	1,200	2,160
22	x_{108}	Пошевелите ногами и руками	2,437	3,200
23	x_{115}	Больно ли дышать?	1,297	2,400
24	x_{119}	Есть ли боли в руках в покое?	2,030	2,800

Для обоснования возможности выделения признаков травм по результатам осмотра рассмотрены (см. п. 1.3) методы и способы определения и распознавания

травм у людей на основе анализа цифровых данных, полученных за счет применения технологий рентгеновских снимков, ультразвуковых и инфракрасных изображений, а также фотографий и видеоданных, сделанных стандартными фото- и видеосредствами.

Представленные данные свидетельствуют о возможности определения признаков травм на основе существующих методов и методик. Очевидно, что данный научно-методический инструментарий требует существенного развития, особенно применительно к его реализации в РТС. Однако такая задача выходит за рамки настоящего исследования.

Перечень средств для осуществления манипуляций и соответствующие временные затраты представлены в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Характеристики манипуляций, производимых для определения признаков травм

№	Усл. обозн.	Наименование манипуляции	Средства проведения	Среднее время проведения, с
1	x_{28}	Измерение артериального давления	Манометр (САКР)	60
2	x_{98}			
3	x_{34}	Измерение пульса	Веб-камера	30
4	x_{35}	Измерение частоты сердечных сокращений	Датчики на сердце	60
5	x_{91}			
6	x_{33}	Измерение частоты дыхания	Микрофон	60
7	x_{113}			60
8	x_{61}			20
9	x_{114}			60
10	x_{116}	Определение хруста		15
11	x_{84}	Измерение температуры	Датчик температуры	2-3 (max 30)
12	x_{37}	Измерение влажности	Датчик влажности	20
13	x_{70}	Определение одностороннего дыхания	Веб-камера (по движению грудной клетки (ассиметрия) + аускультация)	30
14	x_{62}			Определение парадоксального дыхания

Представленные данные по ресурсоемкости (времени, вычислительной сложности) определения признаков травм (табл. 4.1, 4.2) дают возможность модифицировать разработанную модель выбора положения для транспортировки пораженного следующим образом:

установить, какие свидетельства являются наиболее важными по степени влияния на решение, составить их список и ранжировать по степени важности;

выявить переменные x_i ($i = 19...120$), не дающие оснований для выводов;

создать упорядоченный список шагов, наиболее эффективно приводящих к ясному решению относительно положения для транспортировки (например, список вопросов, которые должны быть заданы пораженному при анализе ситуации, перечень и последовательность применения датчиков и т.п.).

Реализация указанных возможностей основана на оценке информативности признаков травм. Основными подходами к отбору информативных признаков являются:

1) подход на основе дискретных методов поиска в обучающей выборке информативной зоны [23, 24];

2) подход на основе методов кластеризации [42, 25, 81, 16];

3) подход на основе предположения о нормальности распределений объектов в кластерах [142, 149, 15, 91]; на основе теоретико-информационного понятия энтропии [34, 63]; на основе непараметрических оценок плотности [61].

Рассмотрим подход к оценке точности определения оптимального положения для транспортировки пораженного (3.4) как функции «качества» набора признаков [33]. Основу данного подхода к оценке качества процедуры выбора положения составляет заданная информация о частотах встречаемости признаков травм (оценках вероятностей проявления признака) для каждого из классов (травм).

Получим двусторонние оценки для вероятности минимального числа признаков, обеспечивающих гарантированный уровень качества процедуры выбора, при этом будем использовать вероятностную модель пересечения случайным процессом определенного уровня.

Пусть $\xi_i = \xi(x_i), i = 1 \dots 5 \quad i = 125 \dots 129$ – случайная величина, означающая число корректно определенных положений для транспортировки на основе признака $x_{k+18}, k = 1 \dots 102$.

Случайная величина $\Phi_k = \sum_{i=1}^k \xi_i / 5k$ представляет собой долю корректно определенных положений для транспортировки по k первым признакам, ранжированным каким-либо образом, и является числовой интерпретацией меры надежности определения положения, или качества работы процедуры выбора [16, 15].

Определим момент остановки случайного процесса Φ_k [58, 89] следующим образом:

$$\tau = \inf \{k \geq 1 : \Phi_k > q_0\}$$

где q_0 – заданный уровень надежности (качества) процедуры (алгоритма) выбора положения для транспортировки пораженного.

Поставим задачу оценить вероятностное распределение $R_k = P(\tau > k)$ величины τ , или минимально необходимого числа информативных признаков, обеспечивающее заданный уровень надежности выбора положения для транспортировки, если известно вероятностное распределение признаков. Знание распределения величины τ , являющейся пороговым значением качества процедуры выбора, позволит оценить требуемое количество признаков травм для достижения заданного уровня качества процедуры определения оптимального положения для транспортировки.

Обозначим

$$\eta_i(k) = P(\xi_i = k) = \sum_{(j_1, \dots, j_k) \in J_k} \prod_{l=1}^k p_{j_l i} \prod_{t \in \{1, \dots, m\} \setminus J_k} (1 - p_{ti}),$$

$$v_i = E \xi_i = \sum_{k=1}^m k \cdot \eta_i(k), \quad \sigma_i^2 = D \xi_i = \sum_{k=0}^m (k - v_i)^2 \cdot \eta_i(k).$$

Тогда на основе теоремы, сформулированной в [33], можно утверждать, что если признак x_{k+18} , $k=1...102$ определяет положение x_i , $i=1...5$ $i=125...129$ с вероятностью P_{ik} и справедливо условие

$$\kappa|5q_0 - v_i| < \varepsilon_c \sigma_i^2 L_i^{-1},$$

где κ – некоторая положительная величина ($0 < \kappa < 1$), $\varepsilon_c = \ln c \cdot c^{-1}/2$; тогда имеют место оценки для надежности выбора положения для транспортировки $R_k = P(\tau > k)$:

$$R_k = c_1 \exp \left\{ -c_2 (5q_0)^{-2} \left[\sum_{j=1}^k \sigma_j^2 c^{-1/2} \right] + c_3 \sum_{i=1}^k v_i \right\}, \quad (3.7)$$

$$R_k = \exp \left\{ -c_4 \left[\alpha^2 + (5q_0)^{-2} c \sum_{j=1}^k \sigma_j^2 \right] - c_5 \sum_{i=1}^k v_i \right\}, \quad (3.8)$$

где $v_i = (5q_0 - v_i) / \sigma_i^2$, величины $c_i, i=1...5$, не зависят от k и являются известными функциями от величин (α, p, q, c) :

$$c_1 = (5/2\alpha)^{1/2p}, \quad c_2 = \pi^2 (1 - 3\alpha^{1/2}) c^{-1/2} / (8p), \quad c_3 = (q-1)c^2,$$

$$c_4 = \pi^2 p (1 + 15\alpha^{3/4}) / 8, \quad c_5 = c^2 \frac{q+1}{q-1}, \quad \alpha \leq 1/16, \quad 1/p + 1/q = 1, \quad p > 1, c > 1.$$

При неизвестном вероятностном распределении признаков получить распределение Φ_k позволяет имитационное моделирование разработанной БСД. Для его проведения признаки травм, определяемые в результате опроса, осмотра и манипуляций (табл. 3.5, 3.6), были предварительно ранжированы по длительности произнесения, вычислительной сложности алгоритма и времени проведения соответственно. Результаты ранжирования представлены ниже (табл. 3.7-3.9).

Таблица 3.7 – Признаки травм, получаемые в результате опроса, ранжированные по убыванию длительности произнесения фраз

k_1	1	2	3	4	5	6	7	8
Усл. обозн.	x_{77}	x_{27}	x_{36}	x_{24}	x_{108}	x_{56}	x_{119}	x_{29}
k_1	9	10	11	12	13	14	15	16
Усл. обозн.	x_{66}	x_{64}	x_{92}	x_{44}	x_{60}	x_{53}	x_{83}	x_{68}
k_1	17	18	19	20	21	22	23	24
Усл. обозн.	x_{41}	x_{115}	x_{55}	x_{100}	x_{90}	x_{58}	x_{54}	x_{26}

Таблица 3.8 – Признаки травм, получаемые в результате осмотра, ранжированные по убыванию вычислительной сложности алгоритмов их выделения

k_2	1	2	3	4	5	6	7	8
Усл. обозн.	x_{89}	x_{57}	x_{93}	x_{63}	x_{32}	x_{96}	x_{71}	x_{67}
k_2	9	10	11	12	13	14	15	16
Усл. обозн.	x_{99}	x_{46}	x_{94}	x_{88}	x_{72}	x_{82}	x_{123}	x_{31}
k_2	17	18	19	20	21	22	23	24
Усл. обозн.	x_{30}	x_{124}	x_{125}	x_{107}	x_{73}	x_{102}	x_{48}	x_{47}
k_2	25	26	27	28	29	30	31	32
Усл. обозн.	x_{121}	x_{122}	x_{120}	x_{81}	x_{78}	x_{50}	x_{25}	x_{101}
k_2	33	34	35	36	37	38	39	40
Усл. обозн.	x_{95}	x_{45}	x_{39}	x_{40}	x_{42}	x_{59}	x_{69}	x_{104}
k_2	41	42	43	44	45	46	47	48
Усл. обозн.	x_{103}	x_{76}	x_{65}	x_{87}	x_{79}	x_{117}	x_{109}	x_{106}
k_2	49	50	51	52	53	54	55	56
Усл. обозн.	x_{85}	x_{75}	x_{49}	x_{118}	x_{112}	x_{111}	x_{51}	x_{86}
k_2	57	58	59	60	61			
Усл. обозн.	x_{74}	x_{52}	x_{43}	x_{110}	x_{38}			

Таблица 3.9 – Признаки травм, получаемые в результате манипуляций, ранжированные по времени проведения

k_3	1	2	3	4	5	6	7	8
Усл. обозн.	x_{114}	x_{113}	x_{33}	x_{91}	x_{35}	x_{98}	x_{28}	x_{34}
k_3	9	10	11	12	13	14		
Усл. обозн.	x_{62}	x_{70}	x_{61}	x_{37}	x_{116}	x_{84}		

С учетом введенных обозначений: k_1 – индекс ранжированных признаков, получаемых в результате опроса; k_2 – индекс ранжированных признаков, получаемых в результате осмотра; k_3 – индекс ранжированных признаков, получаемых в результате манипуляций, в среде моделирования GeNIe получены следующие зависимости (рис. 3.7-3.9).

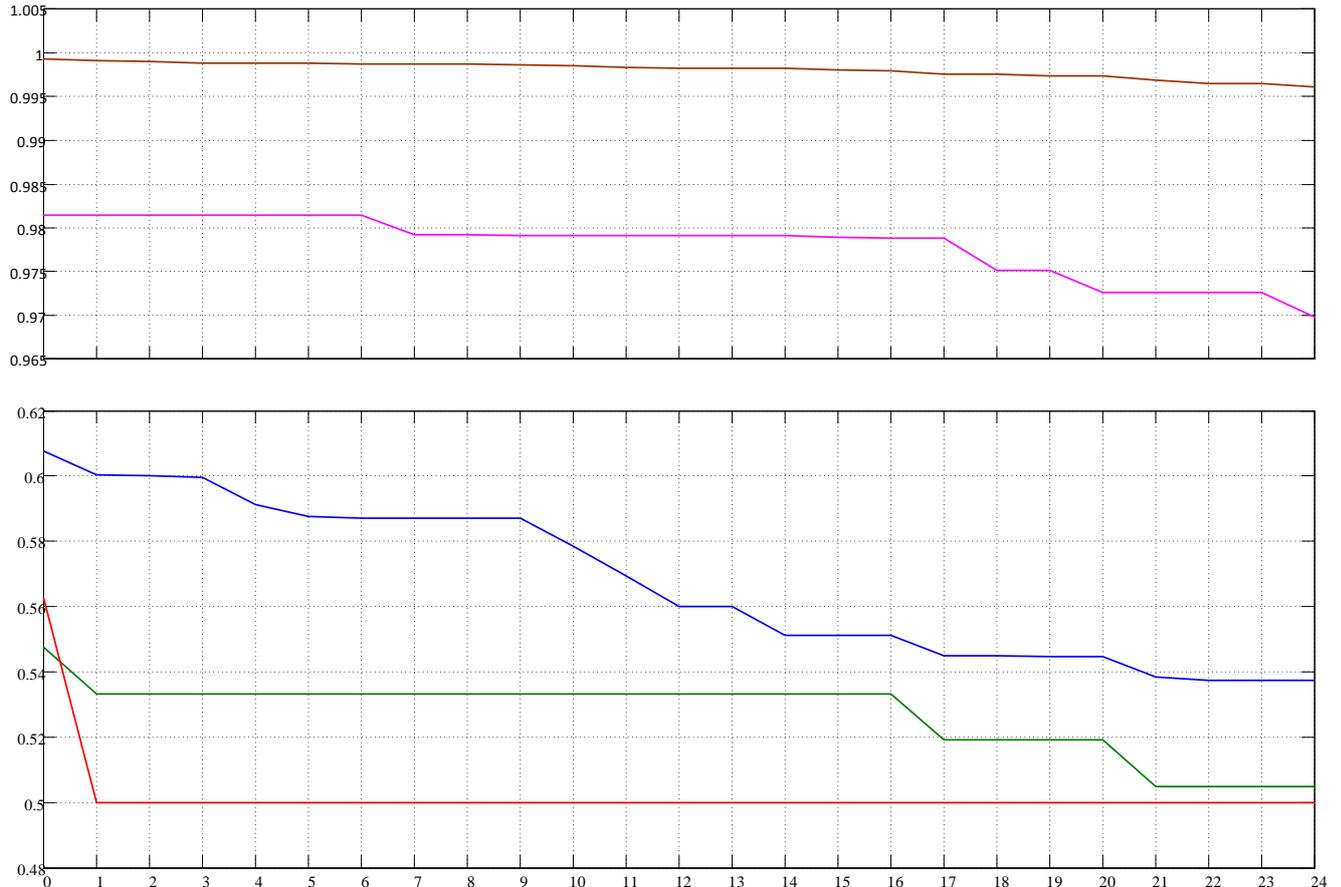


Рисунок 3.7 – Вероятность определения положений для транспортировки по k_1 первым признакам

Исключение некоторых признаков из рассмотрения не влияет на определенные положения для транспортировки, для таких случаев характерно постоянство графика вероятности положения на некоторых участках. Например, положение x_{129} «Полусидячее положение со склоненной на грудь головой»

зависит от x_{18} «Травмы шеи», которая при опросе проверяется только признаком x_{26} «Локализация боли» вопросом «Где болит?».

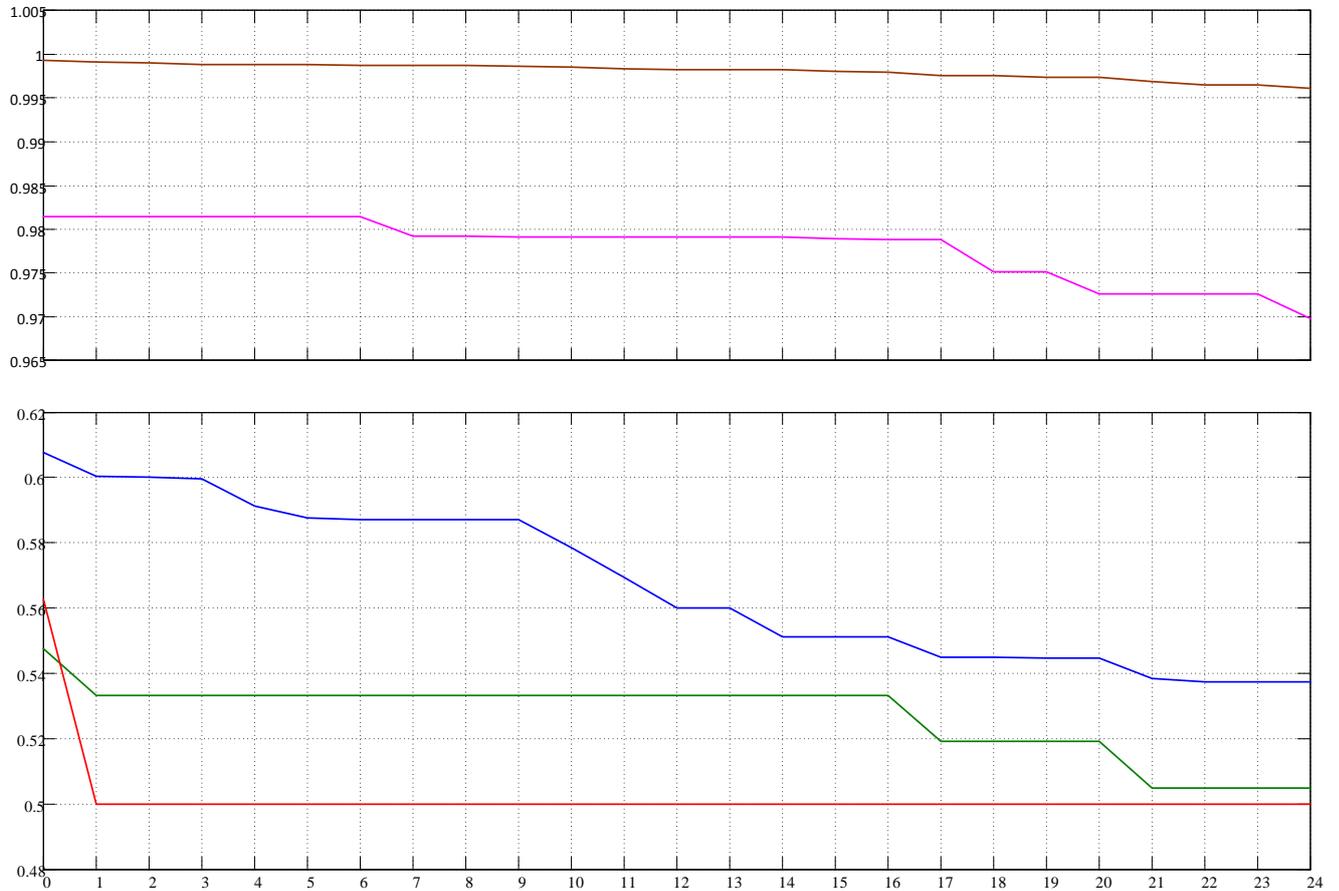


Рисунок 3.8 – Вероятность определения положений для транспортировки по k_2 первым признакам

Так как в начальный момент времени предполагается, что у пораженного присутствует весь набор признаков травм (нельзя пренебречь никакой травмой), то пораженного необходимо транспортировать в любом случае, причем в любом положении. Применение проверок различных признаков в той или иной степени влияет на вероятности положений для транспортировки.

Представленные результаты позволяют синтезировать алгоритмы оценки признаков травм, состояния пораженного и оптимизировать алгоритм

вероятностного вывода при ограничении времени $t_{\text{травма}}^{\text{П}}$ выявления травм у пораженного.

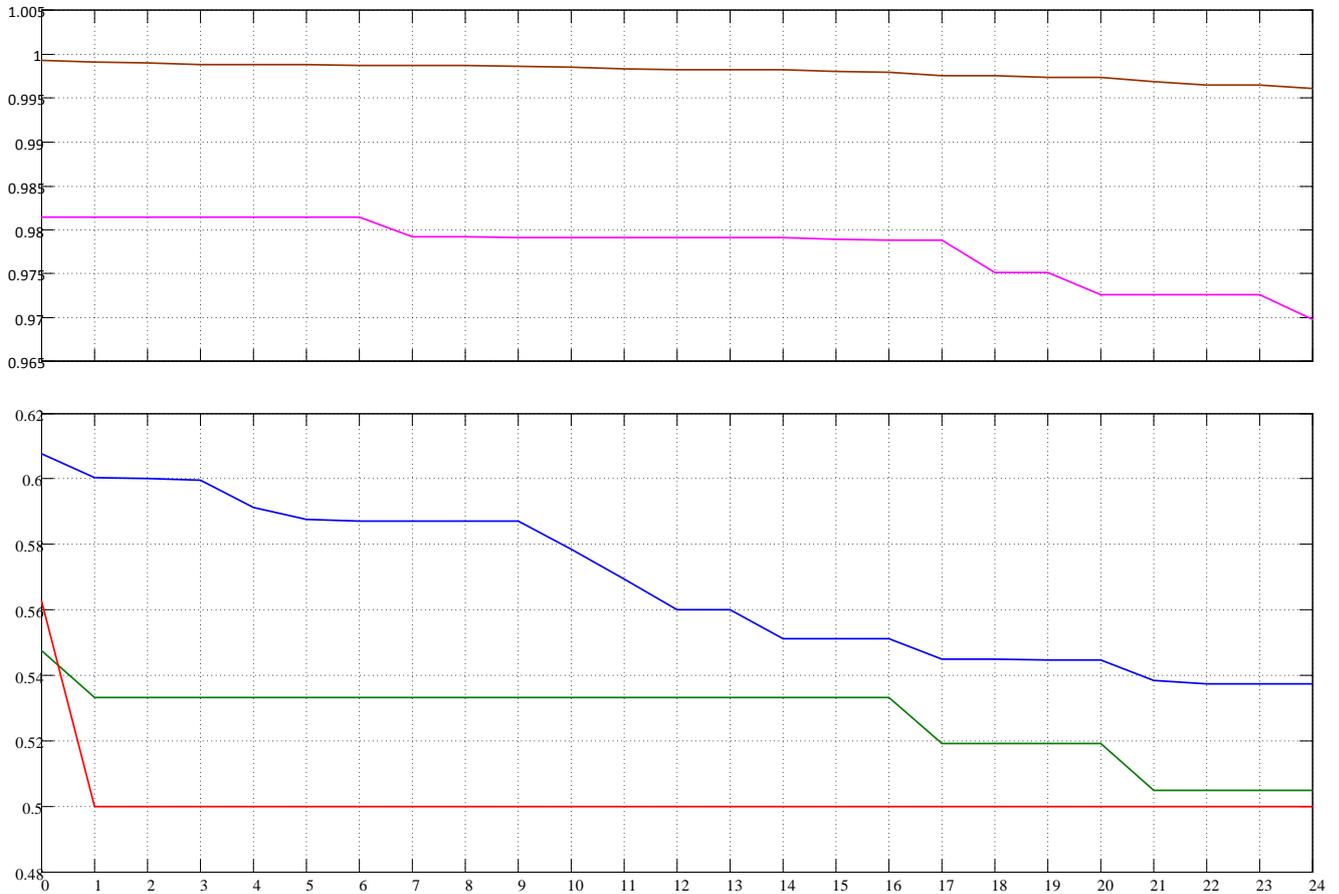


Рисунок 3.9 – Вероятность определения положений для транспортировки по k_3 первым признакам

3.7. Выводы по третьей главе

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.

Для формального описания моделей разработанного комплекса обоснован и применен аппарат байесовских сетей доверия, обеспечивающих возможность решения задач вероятностного прогнозирования. Уточнение таблиц условных вероятностей для разработанных моделей произведено на основе экспертной информации, имеющихся медицинских исследований, направленных на выявление подобных взаимосвязей между элементами процесса диагностики травм, накопленных статистических данных. Для получения экспертной информации разработано программное средство, позволяющее формировать опросные листы. С использованием последних проведено анкетирование специалистов в области травматологии.

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

Применение полученных результатов моделирования и решения поставленных задач (табл. 2.1) 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. Результаты экспериментальной проверки разработанных методик поддержки принятия решений о способе спасения пораженных и моделирование соответствующих процессов с оценкой их эффективности представлены в конце главы.

4.1. Методика оптимизации структуры робототехнических средств спасения пораженных

Ввиду сложности точного априорного определения всего спектра и характеристик мероприятий по спасению пораженных в результате аварий на ОПО 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.

Для описания взаимосвязей между различными вариантами построения элементов РТС предлагается использовать альтернативно-графовую формализацию [87], в которой различные варианты построения элементов системы (либо

множества таких элементов) задаются в виде вершин альтернативного графа, а дуги отражают характер взаимосвязей между ними (рис. 4.1).

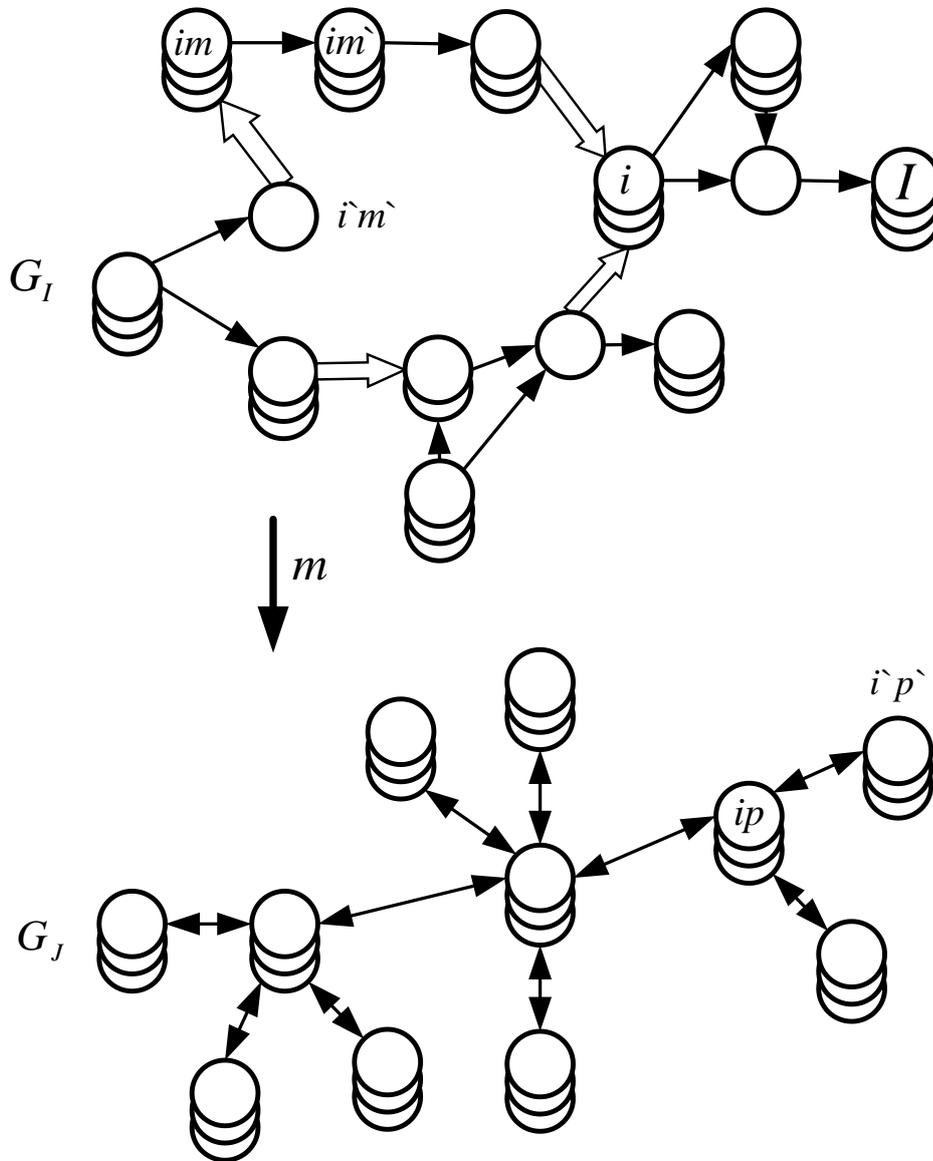


Рисунок 4.1 – Альтернативно-графовая формализация структуры РТС

Пусть G_J – граф, задающий варианты состава и взаимосвязей возможных узлов РТС; $G_J^* \in G_J$ – подграф, задающий один из возможных вариантов реализации узлов РТС с их взаимосвязями. Вершины графа G_J отождествляются с вариантами построения узлов переработки информации, возможными местами их размещения, комплексами технических средств и т.д. 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. Вершины графа G_I в зависимости от рассматриваемой задачи отождествляются с процедурами обработки информации, задачами управления и их этапами и т.п. Его 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 создания и функционирования РТС.

Тогда задача синтеза структуры РТС может быть представлена следующим образом:

$$\begin{aligned} \text{extr} \mathfrak{R}_0 \left\{ (G_I^* \in G_I) \mathfrak{R}^* (G_J^* \in G_J) \right\}, \\ \mathfrak{R}_\eta \left\{ (G_I^* \in G_I) \mathfrak{R}^* (G_J^* \in G_J) \right\}, \quad \eta = \overline{1, \eta_0}, \mathfrak{R}^* \in \mathfrak{R}. \end{aligned} \quad (4.1)$$

Рассмотренный подход (4.1) допускает формализацию в виде задач математического программирования. При этом искомое отображение \mathfrak{R}^* множества взаимосвязанных задач и их этапов G_I на множество взаимосвязанных узлов системы G_J задается соответствующим набором переменных.

Пусть задано множество задач ($i = \overline{1, I}$) (этапов $m = \overline{1, m_i}$), выполняемых РТС, и их вариантов ($k = \overline{1, K}$), множество узлов системы ($j = \overline{1, J}$) и вариантов их построения ($p = \overline{1, P_j}$).

При распределении задач между узлами РТС возможны два типа отображений \mathfrak{R} :

1) каждая задача (этап) выполняется лишь в одном из нескольких возможных узлов системы;

2) задачи (этапы) выполняются в нескольких узлах системы.

Формализация задач с отображением первого типа приводит к математическим задачам целочисленного программирования, а второго типа – смешанного (линейного и целочисленного) программирования.

Задача синтеза структуры РТС в данном случае может быть сформулирована следующим образом:

$$F_0(x_{ik}, x_{imn}, x_{imj}, x_{jp}) \rightarrow \text{opt}, \quad (4.2)$$

где F_0 – оптимизируемые показатели качества, при ограничении на затраты функционирования:

$$\sum_{i,m,n,j} B_{imnj\hat{i}\hat{m}\hat{n}\hat{j}} x_{imnj} x_{\hat{i}\hat{m}\hat{n}\hat{j}} \leq B \quad (4.3)$$

и загрузку узлов:

$$\sum_{i,k,m,n} R_{ikmnt}^{\gamma} x_{ikmnt} \leq R_{jpt}^{\gamma} - P_{jpt}^{\gamma}, \quad j = \overline{1, J}, \quad \gamma = \overline{1, \gamma_0}, \quad (4.4)$$

где $B_{imnj\hat{i}\hat{m}\hat{n}\hat{j}} = \alpha_{imnj}$, если $imnj = \hat{i}\hat{m}\hat{n}\hat{j}$; $B_{imnj\hat{i}\hat{m}\hat{n}\hat{j}} = \beta_{imni\hat{m}\hat{n}\hat{j}} \gamma_{j\hat{j}l\hat{l}}$, если $imnj \neq \hat{i}\hat{m}\hat{n}\hat{j}$; α_{imnj} – затраты ресурсов на решение m -го этапа i -й задачи в j -м узле; $\beta_{imni\hat{m}\hat{n}\hat{j}}$ – средний поток информации между mn -этапом i -й задачи и $m\hat{n}\hat{j}$ -этапом \hat{i} -й задачи в процессе функционирования системы; $\gamma_{j\hat{j}l\hat{l}}$ – затраты ресурсов на передачу единицы объема информации из узла j в узел \hat{j} , оснащенных техническими средствами l -го и \hat{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;

$$x_{ik} = \begin{cases} 1, & \text{если } i\text{-я задача решается } k\text{-м способом;} \\ 0 & \text{в противном случае,} \end{cases} \quad \text{– вариант решения задачи;}$$

$$x_{imn} = \begin{cases} 1, & \text{если } m\text{-й этап } i\text{-й задачи выполняется в } n\text{-м способом;} \\ 0 & \text{- в противном случае,} \end{cases} \quad \text{– вариант решения}$$

этапа;

$$x_{imj} = \begin{cases} 1, & \text{если } m\text{-й этап } i\text{-й задачи выполняется в } j\text{-м узле;} \\ 0 & \text{- в противном случае,} \end{cases} \quad \text{– объем задачи;}$$

$$x_{jp} = \begin{cases} 1, & \text{если } j\text{-й элемент реализуется } p\text{-м способом;} \\ 0 & \text{- в противном случае,} \end{cases} \quad \text{– вариант реализации узла;}$$

$$x_{imnj} = \begin{cases} 1, & \text{если } m\text{-й этап } i\text{-й задачи решается в } n\text{-м варианте в } j\text{-м узле;} \\ 0 & \text{- в противном случае,} \end{cases} \quad \text{– вариант}$$

решения задачи, вариант этапа и узел, в котором он выполняется;

$$x_{ikmnj} = \begin{cases} 1, & \text{если } n\text{-й вариант } m\text{-го этапа } i\text{-й задачи,} \\ & \text{решаемой } k\text{-м способом, выполняется в } j\text{-м узле;} \\ 0 & \text{- в противном случае,} \end{cases} \quad \text{– вариант решения}$$

задачи, способ, вариант этапа и узел, в котором он выполняется.

Представленная формализация синтеза структуры (4.2) позволяет решить задачу распределения задач между элементами (узлами) РТС спасения пораженных методами целочисленного программирования, а соответствующую методику оптимизации структуры таких РТС представить в следующем виде.

Шаг 1.1. Формирование исходных данных: множество задач ($i = \overline{1, I}$) (этапов $m = \overline{1, m_i}$), выполняемых РТС, и их вариантов ($k = \overline{1, K}$), множество узлов системы ($j = \overline{1, J}$) и вариантов их построения ($p = \overline{1, P_j}$). Основными задачами, решаемыми РТС спасения пораженных, являются [50]:

определение наличия сознания у пораженного;

восстановление проходимости дыхательных путей и определение признаков жизни у пораженного;

проведение сердечно-легочной реанимации до появления признаков жизни;

поддержание проходимости дыхательных путей;

обзорный осмотр пораженного и временная остановка наружного кровотечения;

подробный осмотр пораженного в целях выявления признаков травм, отравлений и других состояний, угрожающих его жизни и здоровью, и оказание первой помощи в случае выявления указанных состояний;

придание пораженному оптимального положения тела;

непосредственно транспортировка пораженного.

Для определения признаков жизни (наличия сознания) и осмотра пораженного в качестве основных узлов РТС спасения следует рассматривать датчики (температуры, давления, влажности) или соответствующие сенсорные системы и системы компьютерного зрения, анализа и синтеза речи (для опроса пораженного), количество и номенклатуры которых определяются, исходя из информативности определяемых признаков травм, при заданных временных ограничениях на процедуры осмотра, опроса и манипуляций с пораженным.

Шаг 1.2. Определение данных для формирования системы ограничений:

$$\alpha_{imnj}, \beta_{imni \setminus mn}, \gamma_{ji \setminus j \setminus i}, R_{ikmnl}^{\gamma}, P_{jpt}^{\gamma}.$$

Шаг 1.3. Постановка задачи оптимизации структуры РТС спасения пораженных в виде:

$$t_{\text{травма}}^{\Pi} (x_{ik}, x_{imn}, x_{imj}, x_{jp}) \rightarrow \min, \quad (4.5)$$

при ограничениях (4.3)-(4.4).

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

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

Полученное решение является решением задачи № 2 повышения эффективности процесса спасения пораженных (табл. 2.1).

4.2. Методика планирования траектории движения робототехнических средств транспортировки пораженных

Решение задачи № 8 (табл. 2.1) обеспечивается применением модифицированной методики планирования траектории движения РТС, 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 и требований к минимизации энергопотребления РТС [10]. Исходными данными для ее реализации являются:

- картографические данные;
- данные полученные с БПЛА;
- данные, полученные РТС спасения пораженных;
- число $M_{\text{РТС ТРАНСП.}}$ и массогабаритные показатели (ширина $l_{\text{Ш РТС } i}$ и высота $l_{\text{В РТС } i}$ ($i = 1, \dots, M_{\text{РТС ТРАНСП.}}$)) планируемых к применению РТС транспортировки.

Разрабатываемая методика включает в себя следующие шаги.

Шаг 2.1. Формирование на основе исходных данных графа $G(A, B)$ тактических траекторий движения. При этом вершинам графа $A = \{a_i\}$, $i = 1, \dots, N$, ставятся в соответствие места изменения траектории движения АРТС и в виде координат $\{x_i, y_i\}$ задаются их географические местоположения, а ребрам B – участки пути движения между соответствующими узлами (при наличии такого пути) и их конфигурация. Отклонение тактической траектории от глобальной связано с наличием завалов и трудно проходимых участков. В качестве параметров конфигурации участков пути движения РТС выступают:

- длина l_y участка;
- минимальная ширина $l_{\text{Ш}}$ «коридора», необходимого для движения РТС на данном участке;

- минимальная высота l_B «коридора», необходимого для движения РТС на данном участке.

Шаг 2.2. Выбор для проведения дальнейших расчетов $K = M_{\text{РТС ТРАНСП.}}$ в предположении, что для выполнения работ по ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций (расчистки завала, тушения пожара, поиска пораженного и т.п.) планируемые к применению РТС будут направляться одновременно.

Шаг 2.3. Нахождение K кратчайших путей между начальной и конечной вершинами графа $G(A, B)$. В качестве начальной вершины выбирается место «запуска» РТС, в качестве конечной – участок предстоящих работ, а в качестве весов ребер – $l = l_y$.

Шаг 2.4. Преобразование графа $G(A, B)$ в $G^*(A, B)$, содержащий только K кратчайших путей (и инцидентных им вершин), полученных на предыдущем шаге.

Шаг 2.5. Нахождение K^* кратчайших путей между начальной и конечной вершинами графа $G^*(A, B)$. При этом в качестве весов ребер выбирается величина:

$$l = \begin{cases} 1, \text{ если } l_{\text{ш}} > \max(l_{\text{ш РТС } i}); \\ 0, \text{ в противном случае.} \end{cases}$$

Шаг 2.6. Если $K^* < M_{\text{РТС ТРАНСП.}}$, то $K = K + 1$ и переход к шагу 2.2; в противном случае - переход к следующему шагу.

Шаг 2.7. Преобразование графа $G^*(A, B)$ в $G^{**}(A, B)$, содержащий только K^* кратчайших путей (и инцидентных им вершин), полученных на шаге 5.

Шаг 2.8. Нахождение K^{**} кратчайших путей между начальной и конечной вершинами графа $G^{**}(A, B)$. При этом в качестве весов ребер выбирается величина:

$$l = \begin{cases} 1, \text{ если } l_B > \max(l_{B \text{ РТС } i}); \\ 0, \text{ в противном случае.} \end{cases}$$

Шаг 2.9. Если $K^{**} < M_{\text{РТС ТРАНСП.}}$, то $K = K + 1$ и переход шагу 2; в противном случае - переход к следующему шагу.

Шаг 2.10. Если число кратчайших путей $K \gg M_{\text{РТС ТРАНСП.}}$, то выбор в качестве тактической траектории движения планируемых к применению РТС первых $M_{\text{РТС ТРАНСП.}}$ путей.

Результатом реализации предложенной методики являются тактические траектории движения (рис. 4.2), оптимальные с точки зрения прохождения по ним минимального расстояния планируемым к применению РТС.

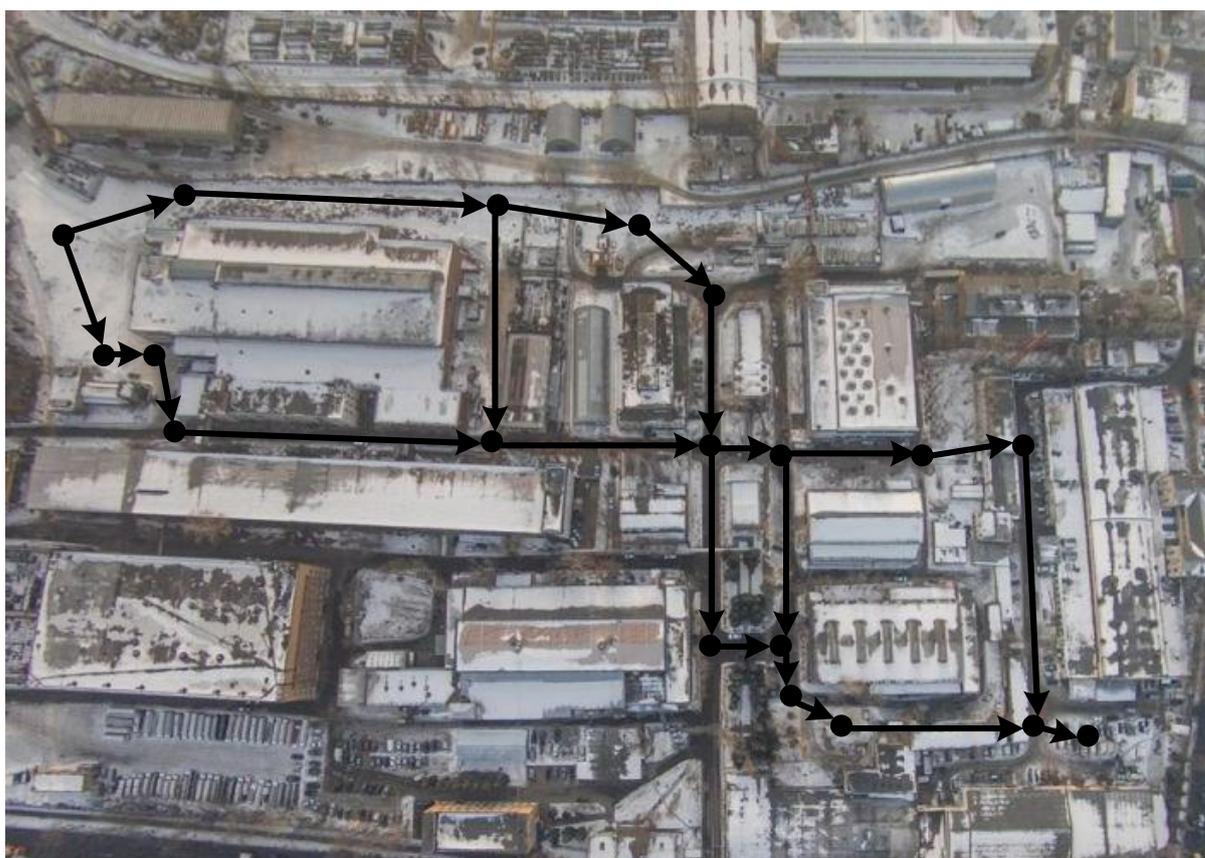


Рисунок 4.2 – Планирование тактической траектории движения РТС транспортировки пораженных

Полученные решения учитывают их габаритные размеры (существенно влияющие на процесс транспортировки пораженного в оптимальной позе в условиях завалов) и требования к минимизации энергопотребления РТС. Их число $M_{\text{РТС ТРАНСП.}}$ зависит от разновидности предстоящих работ по ликвидации

последствий чрезвычайных ситуаций и требует обоснования в каждом конкретном случае. В случае отсутствия $M_{\text{РТС ТРАНСП.}}$ кратчайших путей (уже на шаге 2.3 разработанной методики) меняется стратегия применения РТС – они движутся по меньшему числу путей «друг за другом». При полном отсутствии тактической траектории движения требуется изменение исходных данных.

Применение разработанной методики позволяет решить частную задачу № 8 (табл. 2.3).

4.3. Методика выбора способа спасения пораженного в результате аварии на опасном производственном объекте

Процесс спасения пораженных в результате аварии на ОПО в рамках проводимых исследований реализуется посредством последовательного применения разработанного модельно-алгоритмического и методического обеспечения. Функционально методика спасения пораженных в результате аварии на ОПО в соответствии с разработанным подходом (рис. 4.3) может быть представлена в следующем виде.

В процессе обследования зоны ЧС РТС спасения обнаруживает пораженных и отправляет в штаб сообщение с координатами текущего местоположения. После этого проводит анализ активности окружающей среды на наличие факторов непосредственной угрозы жизни пораженных – это может быть разлив АХОВ, пожар в здании или на технике, угроза взрыва и т.д. (шаг 3). При наличии непосредственной угрозы жизни пораженных РТС спасения приступает к устранению влияющих факторов либо при невозможности устранения – к экстренной эвакуации пораженных в безопасное место. В данном случае, безопасным считается место, где вышеобнаруженные факторы не смогут причинить пораженным вред (шаги 5, 6 и 12). Алгоритм экстренной эвакуации (шаг 12) представлен ниже.

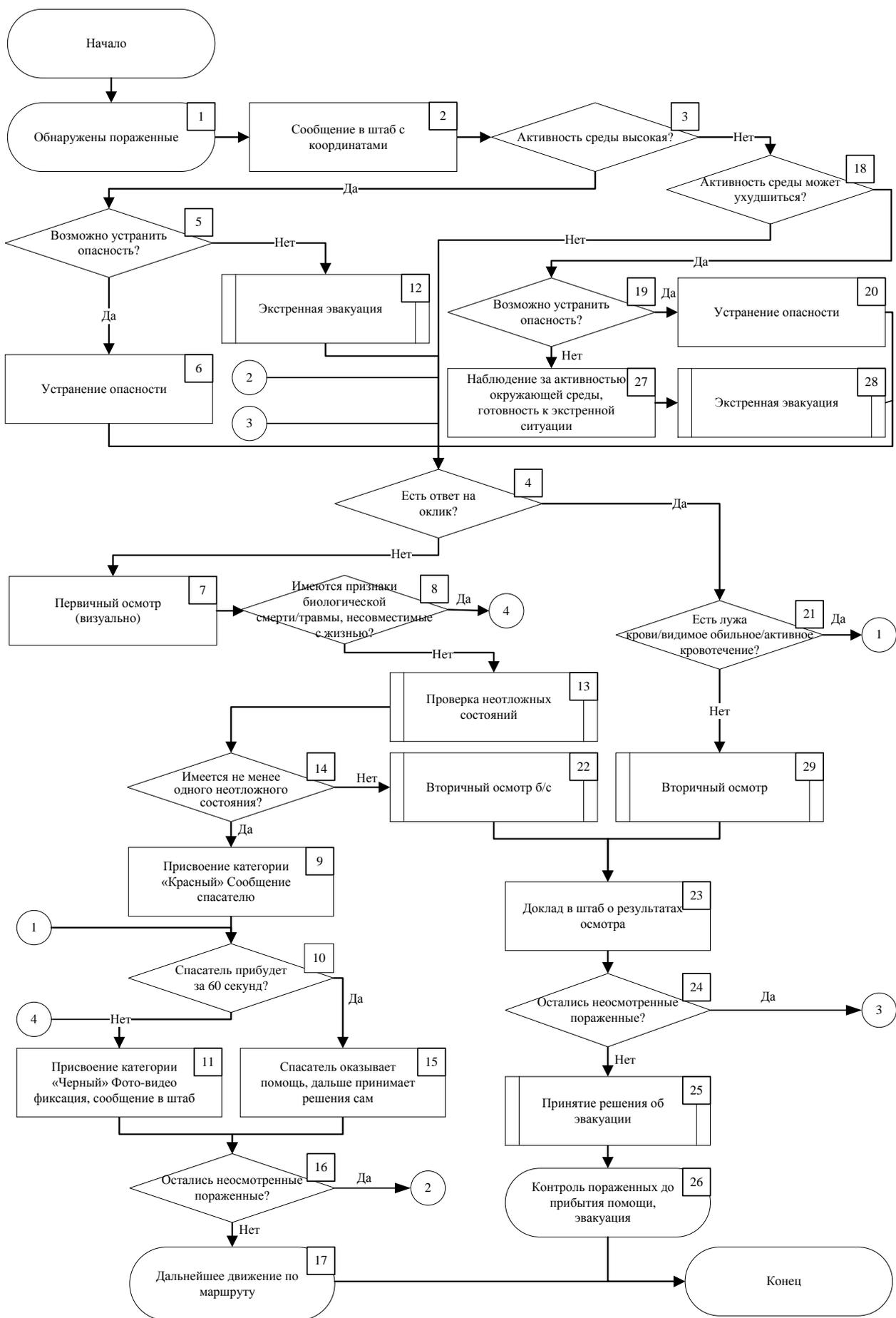


Рисунок 4.3 – Блок-схема методики выбора способа спасения пораженного

При отсутствии на текущий момент непосредственной опасности, но наличии угрожающих факторов, способных при определенных условиях резко ухудшить состояние пораженного или привести к его гибели (ослабленные разрушением конструкции, разлитое топливо и т.д.) без возможности эти факторы ликвидировать – РТС спасения начинает работу с пораженным, при этом отслеживая все изменения в активности среды. В случае ухудшения ситуации РТС спасения приступает к экстренной эвакуации (шаги 19, 27, 28) либо ликвидирует угрожающие факторы и начинает работать с пораженным (шаг 20).

Работа с пораженным начинается с анализа его реакции на звуковое (голосовое) воздействие (шаг 4). Возможны два варианта: наличие реакции и ее отсутствие.

Вариант 1. При отсутствии реакции РТС спасения приступает к первичному осмотру, который включает в себя поиск признаков биологической смерти и несовместимых с жизнью травм, а также наличие у пораженного неотложных состояний (шаги 8, 13). Алгоритм проверки неотложных состояний (шаг 13) представлен ниже.

При обнаружении во время первичного осмотра признаков биологической смерти и/или травм, несовместимых с жизнью, пораженному присваивается категория сортировки «Черная». В данном случае РТС спасения делает доклад в штаб с обязательными фото- и видеофиксацией местонахождения пораженного (шаги 8, 11), после чего переходит к работе со следующим пораженным, либо продолжает движение по маршруту при отсутствии других неосмотренных пораженных (шаги 4, 16, 17).

При обнаружении во время первичного осмотра одного и более неотложных состояний РТС спасения присваивает пораженному категорию сортировки «Красная», передает информацию о его статусе (обнаруженные неотложные состояния) в штаб и анализирует местоположение ближайшего специалиста (спасателя). В зависимости от обнаруженного неотложного состояния спасатель должен приступить к реанимационным мероприятиям в течение 60-120 секунд с момента его (неотложного состояния) наступления (обнаружения) и в

дальнейшем не имеет права покинуть пораженного до появления признаков биологической смерти (шаги 10, 15) [80]. Если специалист за указанное время не успевает приступить к реанимационным мероприятиям, пораженный переводится в категорию сортировки «Черная» (шаги 10, 11), и РТС спасения работает с ним по описанной выше схеме.

При отсутствии во время первичного осмотра признаков биологической смерти, травм, несовместимых с жизнью, и неотложных состояний РТС спасения присваивает пораженному категорию сортировки «Желтая» и начинает вторичный осмотр бессознательного пораженного (шаг 22), о результатах которого докладывает в штаб и переходит к осмотру следующего пораженного (шаги 4, 23, 24), либо принимает решение об эвакуации (шаг 25), если неосмотренных пораженных больше нет. После принятия решения об эвакуации РТС спасения наблюдает за состоянием пораженных до прибытия помощи, в дальнейшем РТС транспортировки доставляет их в зону эвакуации (шаг 26). Алгоритмы вторичного осмотра бессознательного пораженного (шаг 22) и принятия решения об эвакуации (шаг 25) рассмотрены ниже.

Вариант 2. При наличии реакции поражённого на голосовое (звуковое) воздействие, РТС спасения проверяет лишь наличие обильного кровотечения (шаг 21), и при его обнаружении присваивает пораженному категорию сортировки «Красная», передает информацию о статусе (обильное кровотечение) в штаб и анализирует местоположение ближайшего спасателя, далее работает по схеме при обнаружении неотложных состояниях, описанной выше.

При отсутствии обильного кровотечения РТС спасения приступает к проведению вторичного осмотра (шаг 29), о результатах которого докладывает в штаб и переходит к осмотру следующего пораженного (шаги 4, 23, 24) либо принимает решение об эвакуации (шаг 25), если неосмотренных пораженных больше нет. После принятия решения об эвакуации РТС спасения наблюдает за состоянием пораженных до прибытия помощи, в дальнейшем РТС транспортировки доставляет их в зону эвакуации (шаг 26). Алгоритм вторичного осмотра (шаг 29) описан ниже.

Алгоритм экстренной эвакуации. Основная задача РТС спасения при проведении экстренной эвакуации (рис. 4.4) – максимально быстрое перемещение пораженных из опасной среды в безопасную зону (шаг 2). При этом имеющиеся травмы пораженного могут учитываться, но на способ перемещения не влияют. Если пораженных несколько (шаг 3), РТС спасения вызывает помощь (шаг 5) и продолжает экстренную эвакуацию (шаг 2) до тех пор, пока все не будут эвакуированы в безопасную зону. После завершения экстренной эвакуации РТС приступает к осмотру пораженных (шаг 4).

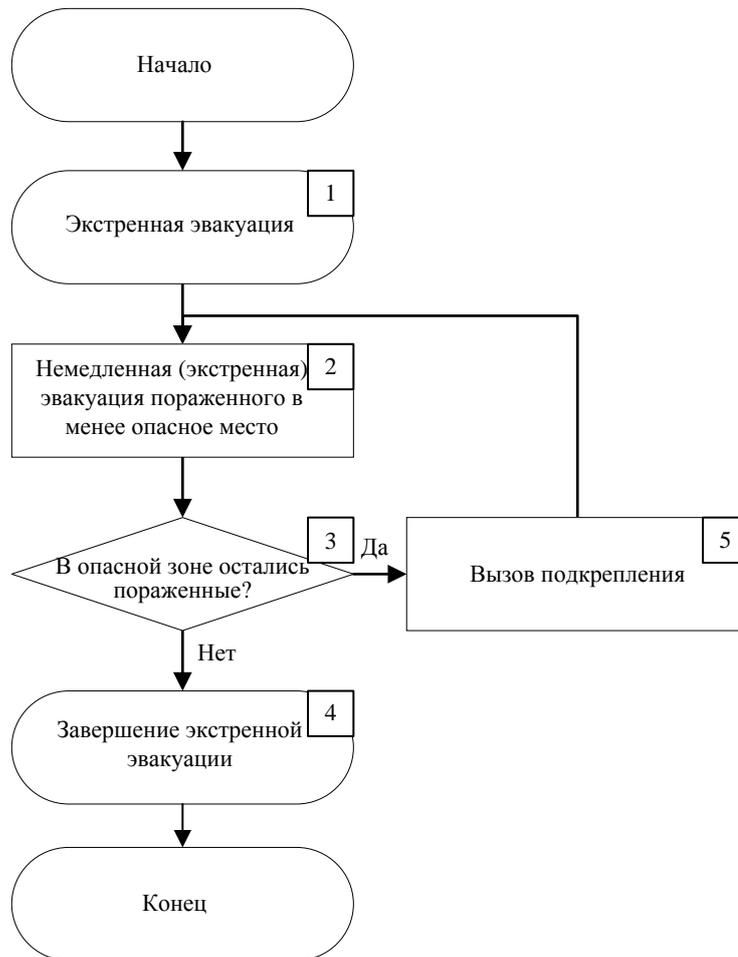


Рисунок 4.4 – Алгоритм экстренной эвакуации пораженного

Алгоритм проверки неотложных состояний. Неотложные состояния – совокупность симптомов (признаков), требующих немедленного оказания первой помощи и имеющих в наличии прогноз смерти в ближайшее время [43]. Наиболее опасные из них – обильное либо артериальное кровотечение (большая кровопотеря) (шаг 2), отсутствие дыхания (шаг 3) и отсутствие пульса (шаг 4).

При проверке неотложных состояний РТС (рис. 4.5) должно поочередно получить информацию о наличии или отсутствии каждого из них. Для проверки используется специальное оборудование. По результатам осмотра РТС спасения принимает решение о присвоении пораженному категории сортировки (шаги 5 и 7).

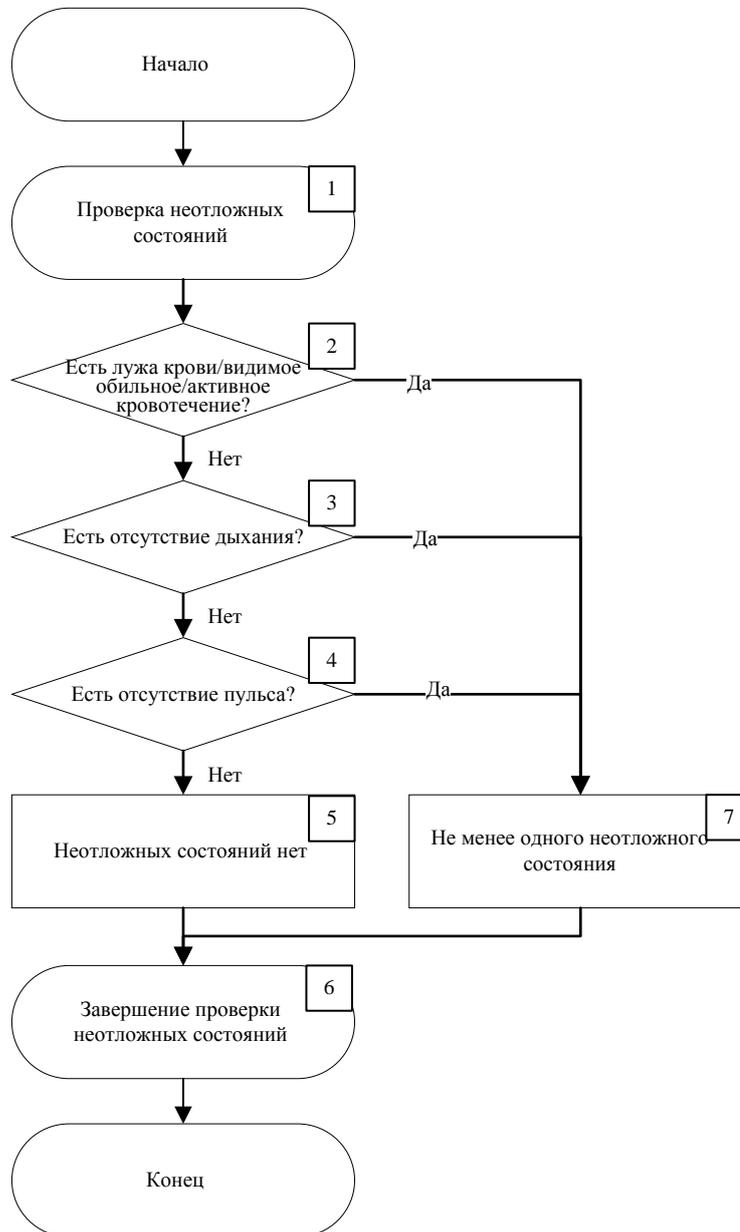


Рисунок 4.5 – Алгоритм проверки неотложных состояний

Алгоритм вторичного осмотра пораженного без сознания. Цель вторичного осмотра пораженного без сознания (рис. 4.6) – сбор более полной информации о его состоянии. Обморочное или коматозное состояние пораженного определяется

на основе применения болевого приема либо иного физического воздействия (шаг 2): находящийся в обмороке, отреагирует на это действие каким-либо движением (возможно рефлекторным), находящийся в коматозном состоянии никакой реакции не проявит.

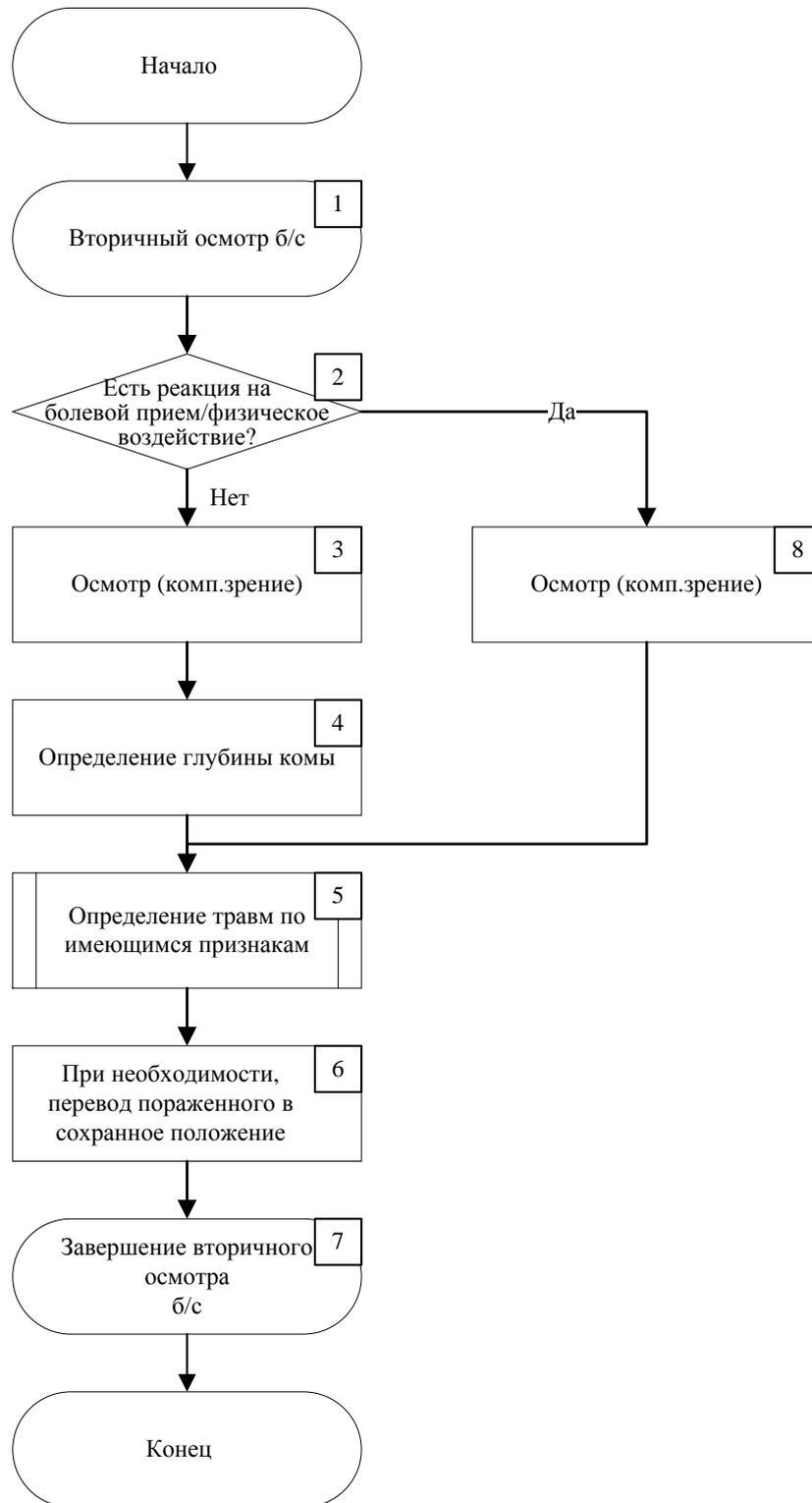


Рисунок 4.6 – Алгоритм вторичного осмотра бессознательного пораженного

В первом случае достаточно приступить к осмотру, используя специальные технические средства (шаг 8), для пораженного в коме необходимо также определить глубину комы (шаги 3, 4) [126]. После чего РТС спасения применяет модель выявления травм пораженного к полученным признакам и определяет наиболее вероятные травмы (шаг 5). При ухудшении состояния РТС спасения может перевести пораженного в устойчивое сохранное положение (шаг 6), и завершает вторичный осмотр бессознательного пораженного.

Алгоритм вторичного осмотра пораженного. Цель вторичного осмотра – сбор более полной информации о состоянии пораженного (рис. 4.7).

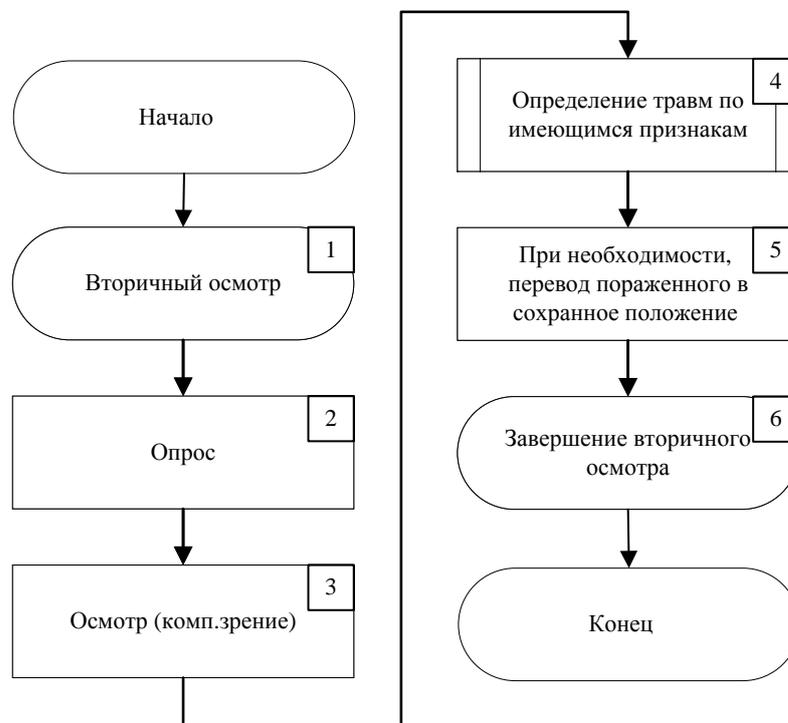


Рисунок 4.7 – Алгоритм вторичного осмотра пораженного

Для этой цели используются опрос (шаг 2) – с заранее подготовленной последовательностью вопросов, и осмотр (шаг 3) с использованием специальных технических средств. После чего РТС спасения применяет модель выявления травм пораженного к полученным признакам и определяет наиболее вероятные травмы (шаг 4). При ухудшении состояния РТС спасения может перевести пораженного в устойчивое сохранное положение (шаг 5), и завершает вторичный осмотр пораженного.

Алгоритм принятия решения об эвакуации. Для принятия решения об эвакуации (рис. 4.8) РТС спасения присваивает пораженному категорию сортировки «Черная», «Красная», «Желтая» или «Зеленая» (шаги 2 и 3) и выбирает оптимальное положение для транспортировки (шаг 4).

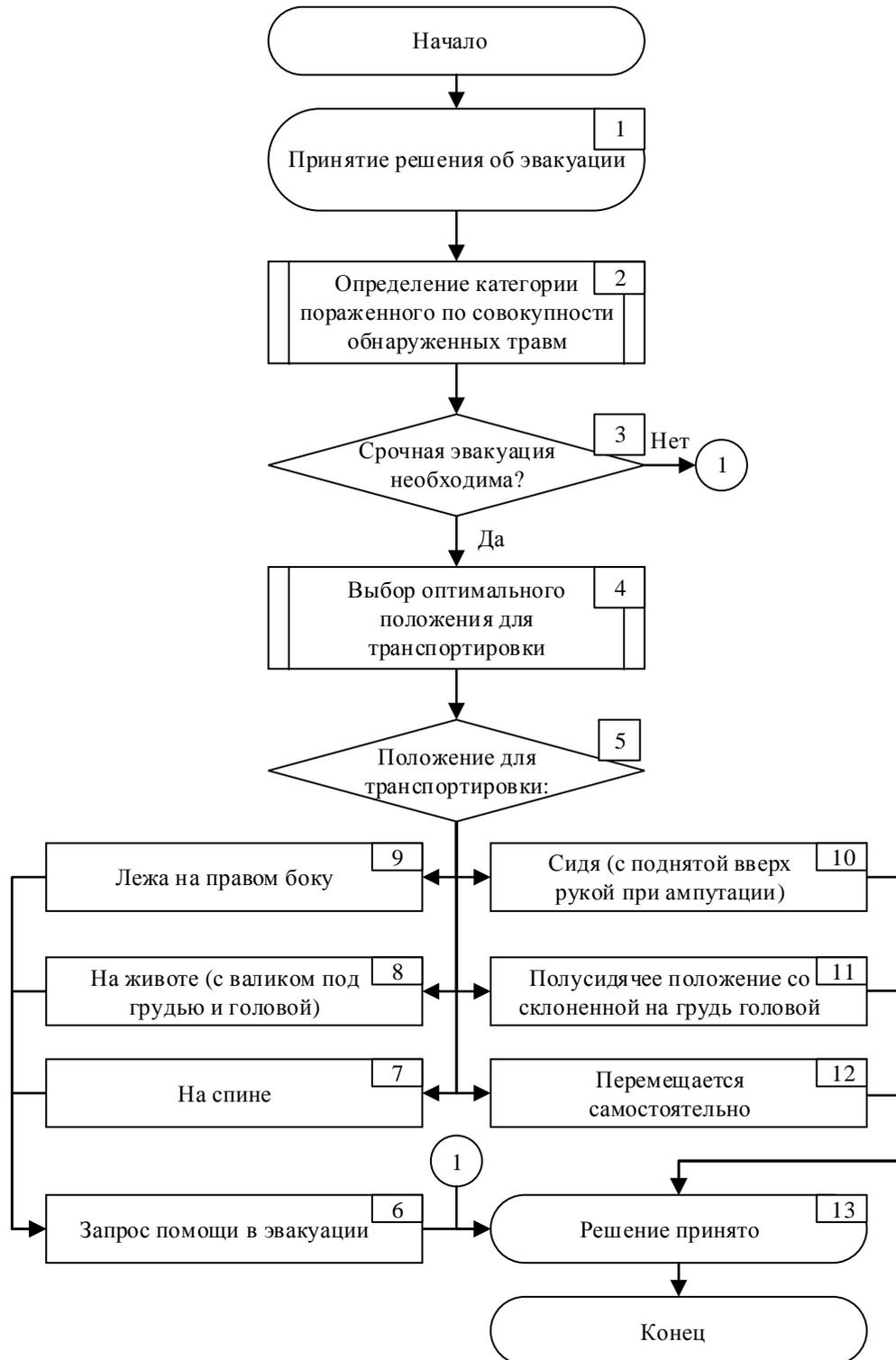


Рисунок 4.8 – Алгоритм принятия решения об эвакуации

Категория сортировки пораженного присваивается путем применения модели определения категории пораженного, а выбор оптимального положения для транспортировки – путем применения модели выбора положения для транспортировки пораженного.

Выбор оптимального положения для транспортировки напрямую зависит от обнаруженных при вторичном осмотре признаков и выявленных травм (шаги 5, 7-12). В свою очередь от выбранного положения зависит количество требуемых РТС для транспортировки (сопровождения) пораженных в зону эвакуации, и при необходимости РТС делает запрос о помощи в эвакуации (шаг 6).

Пример реализации разработанной методики представлен ниже.

4.4. Экспериментальная проверка разработанных моделей и методик поддержки принятия решений о способе спасения пораженных

В качестве примера при экспериментальной проверке разработанного модельно-алгоритмического и методического обеспечения рассмотрена авария на хранилище компонент ракетного топлива (КРТ).

Оценить последствия аварий на такого типа ОПО позволяет *методика оценки последствий химических аварий* [41], предназначенная для оценки масштабов поражения при промышленных авариях с выбросом ОХВ. Она позволяет определить:

количество поступивших в атмосферу ОХВ при различных сценариях аварии;

пространственно-временное поле концентраций ОХВ в атмосфере;

размеры зон химического заражения, соответствующие различной степени поражения людей, определяемой по ингаляционной токсодозе.

При заблаговременном прогнозировании масштабов заражения в качестве исходных данных рекомендуется принимать:

сценарий с полным разрушением емкости (технологической, складской, транспортной и др.), содержащей ОХВ в максимальном количестве;

сценарий «гильотинного» разрыва трубопровода с максимальным расходом при максимальной длительности выброса;

метеорологические условия – класс устойчивости атмосферы – инверсия, скорость ветра – 1 м/с.

Исходными данными для расчета являются:

физико-химические и токсикологические характеристики ОХВ;

количество и технологические параметры ОХВ;

параметры оборудования, в котором обращается ОХВ;

вероятный сценарий выброса ОХВ в атмосферу, для выброса жидкой фазы характер разлива на подстилающей поверхности и характеристики;

топографические характеристики территории вблизи аварийного объекта;

метеоусловия на момент аварии;

время экспозиции.

При разгерметизации баков с КРТ в результате аварии образуется облако, масса которого определяется по следующей формуле:

$$M_{\text{обл}} = M_{\Gamma} + M_{\text{ж}} + M_{\text{и}}, \quad (4.3)$$

где $M_{\text{обл}}$ – масса КРТ в первичном облаке; M_{Γ} – масса КРТ, переходящая в первичное облако в виде газа при мгновенном вскипании КРТ; $M_{\text{ж}}$ – масса КРТ, переходящая в первичное облако в виде аэрозоля; $M_{\text{и}}$ – масса КРТ, переходящая в первичное облако в виде газа при кипении пролива.

Площадь поверхности пролива $S_{\text{прол}}$ на открытой местности при свободном растекании определяется по формуле:

$$S_{\text{прол}} = \frac{\pi \left(\sqrt[3]{25,5 \frac{M_{\text{КРТ}} - M_{\Gamma} - M_{\text{ж}}}{\rho_{\text{КРТ}}}} \right)^2}{4}, \quad (4.4)$$

где $M_{\text{КРТ}}$ – масса КРТ в хранилище на момент аварии; $\rho_{\text{КРТ}}$ – плотность КРТ.

Радиус первичного облака КРТ $R_{\text{обл}}$ в момент детонации баков определяется как

$$R_{\text{обл}} = \sqrt[3]{\frac{3 M_{\text{обл}}}{4\pi \rho_{\text{выб}}}}, \quad (4.5)$$

где $\rho_{\text{выб}}$ – плотность КРТ в первичном облаке в начальный момент времени.

Радиус вторичного облака $R_{\text{обл2}}$, образующегося при испарении КРТ из пролива, определяется как:

$$R_{\text{обл2}} = 0,56\sqrt{S_{\text{прол}}}, \quad (4.6)$$

Для наиболее критического периода ЧС (0÷40 секунд) данные по массе КРТ представлены в таблице 4.1.

В случае возникновения ЧС без возгорания КРТ кислород, который используется в качестве окислителя (О), быстро испаряется с образованием «белого облака». Керосин, который используется в качестве горючего (Г), в результате детонации частично перейдет в газообразное и аэрозольное состояние с образованием первичного облака, а оставшаяся часть образует «пятно загрязнения» на поверхности Земли. Для рассматриваемого примера были получены данные, представленные в таблице 4.2.

Таблица 4.1 – Массовые характеристики КРТ на начальном этапе полета ракеты космического назначения

Время полета, с	Масса КРТ в боковых блоках, кг	Масса КРТ в центральном блоке, кг	Масса КРТ в 3 ступени, кг	Общая масса КРТ, кг	Масса О, кг	Масса Г, кг
0	39162	90160	23204	270012	191941	78071
10	35911	87228	23204	254076	180612	73463
20	32660	84296	23204	238140	169284	68856
30	29409	81364	23204	222203	157956	64248
40	26158	78432	23204	206267	146627	59640

Таблица 4.2 – Пространственные характеристики в случае возникновения ЭС без возгорания КРТ на начальном этапе полета ракеты космического назначения

Время полета, с	Масса горючего (M), кг	M_{Γ} , кг	$M - M_{\Gamma}$, кг	$M_{\text{Ж}}$, кг	$M_{\text{И}}$, кг	$M_{\text{обл}}$, кг	$R_{\text{обл}}$, м	$S_{\text{прол}}$, м ²	$R_{\text{обл2}}$, м
0	78071	30606	47465	30606	16860	61211	6	52	4
10	73463	28799	44664	28799	15865	57599	6	50	4
20	68856	26993	41863	26993	14870	53986	5	48	4
30	64248	25187	39061	25187	13875	50373	5	46	4
40	59640	23380	36260	23380	12879	46761	5	43	4

Значительно чаще в результате ЧС происходит возгорание КРТ, из-за чего возникает более сложная задача моделирования проливов КРТ с последующим возгоранием и образованием облака с продуктами горения токсичных КРТ. В данном случае необходимо рассмотреть воздействие ударной волны и динамику распространения токсонагрузки вредных веществ.

Для определения радиуса действия ударной волны, сформировавшейся в результате взрыва топливовоздушной смеси (ТВС), можно воспользоваться приближенной формулой [41]:

$$R = K \cdot W^{1/3} / (1 + (3180 / W)^2)^{1/6}, \quad (4.7)$$

где коэффициент K определяется по справочным данным, а W – тротиловый эквивалент взрыва, определяемый из соотношения:

$$W = \frac{0,4}{0,9} \cdot \frac{M_{\Gamma} q_{\Gamma}}{4,5 \cdot 10^6}, \quad (4.8)$$

где M_{Γ} – масса ТВС; q_{Γ} – теплота сгорания газа, величина которой определяется по справочным данным или оценивается по формуле:

$$q_{\Gamma} = 44\beta, \quad (4.9)$$

где β – табличное значение корректировочного коэффициента для наиболее распространенных взрывоопасных веществ.

В таблице 4.3 представлены значения радиусов действия ударной волны для зоны полного разрушения зданий R_1 ($K=3,8$), зоны тяжелых повреждений R_2 ($K=5,6$) и зоны средних повреждений R_3 ($K=9,6$).

Таблица 4.3 – Расчетные значения радиусов действия ударной волны в случае возникновения ЧС на начальном этапе полета ракеты космического назначения для различных зон повреждений

Время полета, с	M_{Γ} , кг	W , МДж	R_1 , м	R_2 , м	R_3 , м
0	253152,29	129979,95	192,47	283,64	486,24
10	238211,17	122308,50	188,61	277,94	476,48
20	223270,06	114637,05	184,57	272,00	466,29
30	208328,94	106965,60	180,36	265,79	455,64
40	193387,83	99294,15	175,93	259,27	444,47

На основании начальных радиусов зон поражения и данных атмосферы прогнозировались изменения агрессивности окружающей среды. Для определения способа спасения пораженных применялась соответствующая методика (п. 4.3). В качестве исходных данных использовались следующие значения:

число изначально живых в первый момент после возникновения ЧС $N_0 = 6328$ человек;

среднее время выживания с момента возникновения ЧС до гибели пораженного $T_{\text{ср}} = 4$ ч.;

время обнаружения ЧС $t_{\text{обнаруж.}}^{\text{ЧС}} = 3$ мин.;

время реализации основных этапов аварийно-спасательных работ, предваряющих этап спасения пораженных $t_{\text{предв.}}^{\text{ЧС}} = 46$ мин.;

число специалистов (спасателей), способных оказать первую помощь $M_{\text{СПЕЦ.}} = 35$;

число применяемых РТС поиска и спасения пораженных $M_{\text{РТС СПАС.}} = 1...5$;

число применяемых РТС транспортировки пораженных
 $M_{\text{РТС ТРАНСП.}} = 21...42.$

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 максимально допустимом числе РТС спасения пораженных $M_{\text{РТС СПАС.}} = 5$ и РТС транспортировки $M_{\text{РТС ТРАНСП.}} \geq 29$) от применения методики обеспечивает спасение $N_{\text{СП}} = 4637$ человек, что в 2,5 раза превышает результат, достигаемый в результате работы только спасателей. Указанное значение свидетельствует о значительном повышении эффективности спасения пораженных в результате аварии на ОПО.

4.5. Выводы по четвертой главе

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

Применение методики оптимизации структуры робототехнического средства спасения пораженных позволяет минимизировать время выявления травм у пораженного за счет минимизации числа признаков травм при

сохранении требуемой точности их определения. Реализация методики планирования траектории движения робототехнических средств транспортировки пораженных позволяет 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. Методика выбора способа спасения пораженного в результате аварии на опасном производственном объекте позволяет путем применения разработанного модельно-алгоритмического и методического обеспечения выбирать рациональную последовательность необходимых действий, обеспечивающую повышение эффективности 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 раз) увеличить число спасенных пораженных.

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 положении 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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аникин, В.А. Мобильный робототехнический комплекс с системой технического зрения на базе БПЛА / В.А. Аникин, Н.В. Ким, В.П. Носков, И.В. Рубцов // Вопросы оборонной техники. – 2010. – № 1(242)–2(243), С. 40–46.
2. Аникин, В.А. Решение целевых задач комплексом РТК – выносной пункт СТЗ / В.А. Аникин, Н.В. Ким, В.П. Носков, И.В. Рубцов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2015. – № 1(162). – С. 121–132.
3. Бадамшин, Р.А. Проблемы управления сложными динамическими объектами в критических ситуациях на основе знаний / Р.А. Бадамшин, Б.Г. Ильясов, Л.Р. Черняховская. – М.: Машиностроение, 2003. – 240 с.
4. Бархоткин, В.А. Обработка изображений для идентификации наземной обстановки мобильными роботизированными комплексами / В.А. Бархоткин, В.Ф. Петров, М.П. Кочетков, Д.Н. Корольков // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2014. – № 3(152). – С. 77–87.
5. Басов, О.О. Методологические основы синтеза полимодальных инфокоммуникационных систем государственного управления: монография / О.О. Басов, А.А. Карпов, И.А. Сайтов. – Орёл: Академия ФСО России, 2015. – 271 с.
6. Безопасность жизнедеятельности. Безопасность в чрезвычайных ситуациях природного и техногенного характера: учеб. пособие / В.А. Акимов, Ю.Л. Воробьев, М.И. Фалеев и др. – М.: Абрис, 2012. – 592 с.
7. Беркутов, А.Н. Учебник военно-полевой хирургии / А.Н. Беркутов. – 2-е изд., доп. и испр. – Л., 1973. – 569 с.
8. Беспилотный летательный аппарат Т23Э. [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.enics.ru/detail?product_id=20.
9. Беспилотный самолет ZALA 421-08М [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://zala.aero/zala-421-08>.
10. Богданов, С.П. Применение методов теории графов для проектирования средств измерения тактильных параметров / С.П. Богданов, О.О. Басов, А.А. Иванов // Труды СПИИРАН. – 2014. – № 2(33). – С. 27–44.

11. Будаев, Д.С. Разработка прототипа системы согласованного управления группой беспилотных аппаратов с применением мультиагентных технологий / Д.С. Будаев, Г.Ю. Вощук, Н.А. Гусев, И.В. Майоров, А.Н. Мочалкин // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2015. – №10 (171). – С. 18–28.

12. Будаев, Д.С. Разработка сетцентрической интеллектуальной системы адаптивного планирования действий группы автономных беспилотных аппаратов для согласованного выполнения поставленных задач / Д.С. Будаев, Г.Ю. Вощук, А.Н. Мочалкин, В.С. Травин // Сборник материалов десятой всероссийской научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления» (Таганрог–Домбай, 2015). – Ростов н/Д.: ЮФУ, 2015. – Т. 1. – С. 166–172.

13. В НИ ИрГТУ создали опытную модель робота «Перевертыш», способного искать людей в завалах при ЧС [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.istu.edu/news/13598/>.

14. Военная и специальная робототехника для России [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://sa100.ru/robots2/manufacture/Russia/Obzor/RusMan1.htm>.

15. Воронцов, К.В. Лекции по методам оценивания и выбора моделей [Электронный ресурс] / К.В. Воронцов – 2007. – Режим доступа: www.ccas.ru/voron/download/Modeling.pdf.

16. Воронцов, К.В. Обзор современных исследований по проблеме качества обучения алгоритмов [Электронный ресурс] / К.В. Воронцов // Таврический вестник информатики и математики. – 2004. – № 1. – С. 5–24. – Режим доступа: http://www.ccas.ru/frc/papers/voron_04twim.pdf.

17. ГОСТ Р 22.0.02-94. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Термины и определения основных понятий. – М. Госстандарт – 1995. – 16 с.

18. ГОСТ Р 22.8.01-96. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Ликвидация чрезвычайных ситуаций. Общие требования. – М. Госстандарт – 1996. – 8 с.

19. ГОСТ Р 54344-2011. Техника пожарная. Мобильные робототехнические комплексы для проведения аварийно-спасательных работ и пожаротушения.

Классификация. Общие технические требования. Методы испытаний. – М.: Стандартиформ. – 2012. – 31 с.

20. ГОСТ Р ИСО 18434-1-2013. Контроль состояния и диагностика машин. Термография. Часть 1. Общие методы. – М. Стандартиформ. – 2014. – 39 с.

21. ГОСТ Р. 22.0. 05-94 Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Техногенные чрезвычайные ситуации. Термины и определения. – М. Госстандарт – 1996. – 16 с.

22. Гуманенко Е.К. Военно полевая хирургия: учебник.–2 е изд., изм. и доп. / Е.К. Гуманенко // М.: ГЭОТАР Медиа, – 2008. – 768 с.

23. Дмитриев, А.И. О математических принципах классификации предметов или явлений / А.И. Дмитриев, Ю.И. Журавлев, Ф.П. Кренделев // Дискретный анализ. – Новосибирск: ИМ СО АН СССР, 1966. – Вып. 7. – С. 1 – 17.

24. Дюкова, Е.В. Построение распознающих процедур на базе элементарных классификаторов [Электронный ресурс] / Е.В. Дюкова, Н.В. Песков. – Режим доступа: www.ccas.ru/frc/papers/djukova05construction.pdf.

25. Загоруйко, Н.Г. Прикладные методы анализа данных и знаний / Н.Г. Загоруйко. – Новосибирск: Изд-во Ин-та математики, 1999. – 270 с.

26. Загоруйко, С.Н. Навигация БПЛА и 3D-реконструкция внешней среды по данным бортовой СТЗ / С.Н. Загоруйко, В.Н. Казьмин, В.П. Носков // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2014. – Т. 8. – С. 62–67.

27. Заседание Коллегии МЧС России [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.mchs.gov.ru/dop/info/smi/news/item/2630187>.

28. Калинин, В.Н. Многомодельное описание процессов управления космическими средствами / В.Н. Калинин, Б.В. Соколов // Теория и системы управления. – 1995. – №1. – С. 149.

29. Калинин, В.Н. Морфологический анализ проблематики теории системных исследований / В.Н. Калинин // Труды СПИИРАН. – 2013. – Вып. 1(24). – С. 89–107.

30. Калинин, В.Н. Теоретические и прикладные аспекты управления структурной динамикой робототехнических комплексов / В.Н. Калинин,

М.Ю. Охтилев Б.В., Соколов, А.Л. Ронжин, О.О. Басов, И.В. Ватаманюк // Труды военно-научной конференции «Роботизация Вооруженных Сил Российской Федерации». – Москва, 2016. – С. 369–373.

31. Калинин, В.Н. Теоретические основы управления активными подвижными объектами / В.Н. Калинин. – Министерство обороны СССР, 1974. – 130 с.

32. Колб, Л.И. Медицина катастроф и чрезвычайных ситуаций / Л.И. Колб, С.И. Леонович, И.В. Яромич – Минск: Выш.шк., 2008. – 448 с.

33. Колесникова, С.И. Методы анализа информативности разнотипных признаков / С.И. Колесникова // Вестник Томского государственного университета. – 2009. – № 1(6). – С. 69–80.

34. Колесникова, С.И. Статистический подход к оцениванию зависимых признаков в интеллектуальных системах / С.И. Колесникова, А.Е. Янковская // Математические методы распознавания образов: Сб. докл. 13-й Всерос. конф. – М.: МАКС Пресс, 2007. – С. 143–146.

35. Конык, О.А. Аварии и аварийные ситуации на промышленных предприятиях: учеб. пособие: самост. учеб. электрон. изд. [Электронный ресурс] / О.А. Конык. – Сыктывкар: СЛИ, 2013. – 107 с. – Режим доступа: <http://lib.sfi.komi.com>.

36. Кузькин, А.А. Методика обеспечения устойчивости стратегии развития информационных технологий на предприятии в условиях неопределенности воздействия среды: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.01 / Кузькин Александр Александрович. – Спб. 2015. – 116 с.

37. Куренков, В.И. Методы исследования эффективности ракетно-космических систем. Методические вопросы / В.И. Куренков. – Самара: Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С.П. Королева (нац. исслед. ун-т), 2012. – 201 с.

38. Мажуховский, Э.И. Аварийно-спасательные и другие неотложные работы / Э.И. Мажуховский // Технологии гражданской безопасности. – 2006. – Вып. 2. – Т. 3. – С. 88–92.

39. Масленников, Е.Д. Предсказания на основе байесовских сетей доверия: алгоритм и программная реализация / Е.Д. Масленников, В.Б. Сулимов // Вычислительные методы и программирование. – 2010. – Т. 11. – № 2. – С. 222–235.

40. Метод активных контуров [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.physic-explorer.ru/metod_aktivnih_konturov-1124-1.html

41. Методики оценки последствий аварий на опасных производственных объектах: сборник документов. 3-е изд., испр. и доп. – М.: Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности, 2010. – Серия 27. – Выпуск 2. – 208 с.

42. Миркин, Б.Г. Анализ качественных признаков и структур / Б.Г. Миркин. – М.: Статистика, – 1980. – 317 с.

43. Михайлович, В.А. Руководство для врачей скорой помощи — 2-е изд., перераб. и доп. / Михайлович В.А. — Л.: Медицина, 1990. — 544 с.

44. Михеев, М.Ю. Применение «дерева решений» для анализа состояния сложных систем / М.Ю. Михеев, В.А. Котякова, Е.А. Володина, В.Я. Баннов // Труды международного симпозиума Надёжность и качество. – Пенза: ПГУ, 2012. – Т. 2. – С. 401–403.

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

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

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

48. 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.

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

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

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

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

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

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

55. Мохаммед А.Г. Разработка методики комплексирования систем визуализации медико-биологического назначения / А.Г. Мохаммед // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012. – №11 (136). – С. 96–101.

56. Мусина, В.Ф. Байесовские сети доверия как вероятностная графическая модель для оценки медицинских рисков / В.Ф. Мусина // Труды СПИИРАН. – 2013. – Вып. 24. – С. 135–151.

57. Нейдорф, Р.А. Исследование эвристических алгоритмов в задачах прокладки и оптимизация маршрутов в среде с препятствиями / Р.А. Нейдорф, В.В. Полях, И.В. Черногоров, О.Т. Ярахмедов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2016. – №3 (176). – С. 127–143.

58. Новиков, А.А. О времени выхода сумм ограниченных случайных величин из криволинейной полосы / А.А. Новиков // Теория вероятностей и ее применения. – 1981. – Т. 26. – № 2. – С. 287–301.

59. Носков, В.П. Опыт решения задачи автономного управления движением мобильных роботов / В.П. Носков, И.В. Рубцов // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2005. – Т. 12. – С. 21–24.

60. Об утверждении плана реализации госпрограммы «Защита населения и территорий от чрезвычайных ситуаций, обеспечение пожарной безопасности и безопасности людей на водных объектах» на 2014 год и на плановый период 2015 и 2016 годов [Электронный ресурс]. – 2014. – Режим доступа: <http://government.ru/docs/15616>.

61. Орлов, А.И. Анализ нечисловой информации в социологических исследованиях / А.И. Орлов. – М.: Наука, 1985. – С. 58–92.

62. Основы организации медицинского обеспечения населения в чрезвычайных ситуациях (экстремальная медицина, основы медицины катастроф) // под ред. Н.Н. Винничука, В.В. Давыдова. – Издательство "Элби-СПб, 2003. – 80 с.

63. Перегудов, Ф.И. Введение в системный анализ / Ф.И. Перегудов, Ф.П. Тарасенко. – М.: Высшая школа, 2001. – 396 с.

64. Петухов, Г.Б. Основы теории эффективности целенаправленных процессов. Ч.1. Методология, методы, модели / Г.Б. Петухов. – МО СССР, 1989. – 665 с.

65. Пивоваров, В.В. Спироартериокардиоритмограф / В.В. Пивоваров // Медицинская техника. – 2006. – № 1. – С. 38–40.

66. Полный медицинский справочник фельдшера (дополненный) / М. Эксмо, – 2015. – 832 с.

67. Попов, П.А. 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. Баринов, Д.В. Мясников. – Химки: АГЗ МЧС России, 2014. – 61 с.

68. Предупреждение и ликвидация чрезвычайных ситуаций (Учебное пособие для органов управления РСЧС) / под общ. ред. Ю.Л. Воробьева – М.: КРУК, – 2002. – С. 368.

69. Приказ Минздравсоцразвития РФ № 477н «Об утверждении перечня состояний, при которых оказывается первая помощь, и перечня мероприятий по оказанию первой помощи». – 2012. – 3 с.

70. Продукционная модель знаний [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.aiportal.ru/articles/knowledge-models/production-model.html>.

71. Пряничников, В.Е. Информационное обеспечение и навигация робототехнических систем с дистанционными ультразвуковыми и оптическими сенсорами: монография / В.Е. Пряничников. – М.: Инт. прикл. математики им. М.В. Келдыша РАН. 1993. – 261 с.

72. Пшихопов, В.Х. Интеллектуальное планирование траекторий подвижных объектов в средах с препятствиями / под ред. В.Х. Пшихопова. – М.: Физматлит, 2014. – 350 с.

73. Пысла, М.С. Алгоритмы первичной медицинской сортировки / М.С. Пысла // Медицина катастроф. – 2014. – № 1. – С.47-52.

74. Резников, Б.А. Системный анализ и методы системотехники / Б.А. Резников. – МО СССР, 1990. – 522 с.
75. Розанов, Е.Г. Военно-полевая хирургия / Е.Г. Розанов, Т. Ефименко, В.Н. Абашин, В.Е. Розанов, Н.А. Ефименко. – Медицина, 2002. – 528 с.
76. Сапрыкин, Р.В. Алгоритмы информационного взаимодействия интеллектуальных мобильных роботов при картографировании внешней среды функционирования / Р.В. Сапрыкин // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2015. – №3(164). – С. 164–174.
77. Соколов, Б.В. Комплексное моделирование функционирования автоматизированной системы управления навигационными космическими аппаратами / Б.В. Соколов, Р.М. Юсупов // Проблемы управления и информатики. – 2002. – №5. – С.103–117.
78. Соколов, Б.В. Концептуальные основы оценивания и анализа качества моделей и полимодельных комплексов / Б.В. Соколов, Р.М. Юсупов // Теория и системы управления. – 2004. – №6. – С. 5–16.
79. Сорокин, В.Н. Синтез речи / В.Н. Сорокин. – Наука, 1992. – 392 с.
80. Статья 125. Оставление в опасности. Уголовный кодекс Российской Федерации от 13.06.1996 № 63-ФЗ // Собрание законодательства Российской Федерации. 17.06.1996. № 25. Ст. 2954. (с послед. изм. и доп.).
81. Ту, Дж. Принципы распознавания образов / Дж. Ту, Р. Гонсалес. – М.: Мир, 1978. – 415 с.
82. Тулупьев, А.Л. Байесовские сети доверия. Логико-вероятностный вывод в ациклических направленных графах / А.Л. Тулупьев, А.В. Сироткин, С.И. Николенко. – СПб: Изд-во СПбГУ, 2009. – 400 с.
83. Тутыгин, А.Г. Преимущества и недостатки метода анализа иерархий / А.Г. Тутыгин, В.Б. Коробов // Известия РГПУ им. А. И. Герцена. – 2010. – Т. 1. – С. 108–115.
84. Фанина, Е.А. Опасные производственные объекты: устойчивое функционирование, мониторинг: учеб. пособие / Е.А. Фанина, А.Н. Лопанов, А.П. Гаевой. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2011. – 183 с.

85. Федеральный закон от 21.07.1997 N 116-ФЗ (ред. от 13.07.2015) «О промышленной безопасности опасных производственных объектов».

86. Федеральный закон от 22.08.1995 № 151-ФЗ (ред. от 02.07.2013) «Об аварийно-спасательных службах и статусе спасателей» [Электронный ресурс]. – 2013. – Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_148644.

87. Цвиркун А.Д. Основы синтеза структуры сложных систем. М.: Наука, 1982.

88. Шашок, В.Н. Проектирование манипуляторов для работы в экстремальных условиях / В.Н. Шашок, С.И. Филиппов, Д.В. Багаев, А.Н. Малышев, А.А. Кобзев, В.Н. Умнов // Сборник материалов десятой всероссийской научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления» (Таганрог–Домбай, 2015). – Ростов н/Д.: ЮФУ, 2015. – Т. 1. С. 267–278.

89. Ширяев А.Н. Вероятность / А.Н. Ширяев. – М.: Наука, 1980. – 575 с.

90. Шойгу, С.К. Учебник спасателя / С.К. Шойгу, М.И. Фалеев, Г.Н. Кириллов и др.; под общ. ред. Ю.Л. Воробьева / 2-е изд., перераб. и доп. // Краснодар: «Сов. Кубань», 2002. – 528 с.

91. Шурыгин, А.М. Статистический кластер-алгоритм / А.М. Шурыгин // Математические методы распознавания образов: Сб. докл. 13-й Всерос. конф. – М.: МАКС Пресс, 2007. – С. 241–242.

92. Ahonen, T. Face Recognition with Local Binary Patterns / T. Ahonen, A. Hadid, M. Pietikainen // Computer Vision (ECCV 2004). – 2004. – P. 469–481.

93. Amit, Y. A coarse-to-fine strategy for multiclass shape detection / Y. Amit, D. Geman, X. Fan // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2004. – Vol. 26. – No. 12. – P. 1606–1621.

94. Antoine, J.P. Two-dimensional wavelets and their relatives / J.P. Antoine, R. Murenzi, P. Vandergheynst, S.T. Ali. – Cambridge University Press. 2004. – 458 p.

95. Bachrach, J. Composable continuous-space programs for robotic swarms / J. Bachrach, J. Beal, J. McLurkin. *Composable // Neural Computing & Applications*. – 2010. – Vol. 19. – P. 825–847.

96. Balakrishnan, G. Detecting pulse from head motions in video / G. Balakrishnan, F. Durand, J. Guttag // *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. – 2013. – P. 3430–3437.

97. Barbarosoğlu, G. An interactive approach for hierarchical analysis of helicopter logistics in disaster relief operations. *European Journal of Operational Research*. – 2002. – Vol. 140. – P. 118–133.

98. Becker, A. Crowdsourcing swarm manipulation experiments: A massive online user study with large swarms of simple robots / A. Becker, C. Ertel, J. McLurkin // *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. – 2014. – P. 2825–2830.

99. Bender, J. Adaptive probabilistic networks with hidden variables/ J. Bender, D. Koller, R. Russel, K. Kanazava // *Machine Learning*. – 1997. – Vol. 29. – No. 2–3. – P. 213–244.

100. Ben-Tal, A. Robust optimization for emergency logistics planning: Risk mitigation in humanitarian relief supply chains / A. Ben-Tal, B.D. Chung, S.R. Mandala, T. Yao // *Transportation research part B: methodological*. – 2011. – vol. 45. – P. 1177–1189

101. Campos, V. A Method for Evacuation Route Planning in Disaster Situations / V. Campos, R. Bandeira, A. Bandeira // *Procedia - Social and Behavioral Sciences*. – 2012. – Vol. 54. – P. 503–512.

102. Cardoso, J.F. High-order contrasts for independent component analysis / J.F. Cardoso // *Neural computation*. – 1999. – Vol. 11. – No. 1. – P. 157–192.

103. Champion, H.R. A revision of the Trauma Score / H.R. Champion, W.J. Sacco, W.S. Copes, D.S. Gann, T.A. Gennarelli, M.E. Flanagan // *Journal of Trauma and Acute Care Surgery*. – 1989. – Vol. 29. – No. 5. – P. 623–629.

104. Charalampous, K. Thorough robot navigation based on SVM local planning / K. Charalampous, I. Kostavelis, A. Gasteratos // *Robotics and Autonomous Systems*. – 2015. – Vol. 70. – P. 166–180.

105. Chowdhury, A.S. Automated detection of pelvic fractures from volumetric CT images /A.S. Chowdhury, J.E. Burns, A. Mukherjee, B. Sen, J. Yao, R.M. Summers // *9th IEEE International Symposium on Biomedical Imaging (ISBI 2012)*. – 2012. – P. 1687–1690.

106. Chowdhury, A.S. Computer Vision Based Hairline Mandibular Fracture Detection from Computed Tomography Images /A.S. Chowdhury, A. Mukherjee, S.M Bhandarkar., C.Y. Jack // *Advanced Computational Approaches to Biomedical Engineering*. Springer Berlin Heidelberg, – 2014. – P. 193–212.

107. Chowdhury, A.S. Hairline fracture detection using MRF and Gibbs sampling /A.S. Chowdhury, A. Bhattacharya, S.M Bhandarkar., G.S. Datta, J.C. Yu, R Figueroa. // *IEEE Workshop on Applications of Computer Vision (WACV 2007)*. – 2007. – P. 56–56.

108. De Cubber, G et al. Search and rescue robots developed by the european ICARUS project / G. De Cubber, D. Serrano, K. Berns, K. Chintamani et al. // *7th Int. Workshop on Robotics for Risky Environments*. – 2013.

109. Dempster, A. Maximum likelihood from incomplete data via the EM algorithm / A. Dempster, N. Laird, D. Rubin // *J. of the Royal Statistical Society*. – 1997. – Vol. 39. – No. 1. – P. 1–38.

110. Donnelley, M.W. Computer aided long-bone segmentation and fracture detection / M.W. Donnelley. – Flinders University, Faculty of Science and Engineering, 2008. – 250 p.

111. Dutta, S. Obstacle Avoidance of Mobile Robot using PSO-based Neuro Fuzzy Technique // *International Journal of Computer Science and Engineering*. – 2010. – Vol. 2. – No. 2. – P. 301–304.

112. Edrissi, A. A multi-agent optimization formulation of earthquake disaster prevention and management / A. Edrissi, H. Poorzahedy, H. Nassiri, M. Nourinejad // *European Journal of Operational Research*. – 2013. – Vol. 229. – P. 261–275.

113. Fallon, M. An Architecture for Online Affordance-based Perception and Whole-body Planning / M. Fallon, S. Kuindersma, S. Karumanchi, M. Antone et. al // *Journal of Field Robotics*. – 2014. – Vol. 32. – Issue 2. – P. 229–254.
114. Fei, J. Thermistor at a distance: unobtrusive measurement of breathing / J. Fei, I. Pavlidis // *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*. – 2010. – Vol. 57. – No. 4. – P. 988–998.
115. Feng, C.-M. A fuzzy bi-level and multi-objective model to control traffic flow into the disaster area post earthquake / C.-M. Feng, C.-C Wen. // *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*. – 2005. – Vol. 6. – P. 4253–4268.
116. Feng, C.-M. Highway emergency rehabilitation scheduling in post-earthquake 72 hours / C.-M. Feng, T.-C. Wang // *Journal of the 5th Eastern Asia Society for Transportation Studies*. – 2003b. – Vol. 5. – P. 3276–285.
117. Feng, C.-M. Traffic control management for earthquake-raided area / C.-M. Feng, C.-C Wen // *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*. – 2003. – Vol. 5. – P. 3261–3275.
118. Fiedrich, F Optimized resource allocation for emergency response after earthquake disasters / F. Fiedrich, F. Gehbauer, U. Rickers // *Safety Science*. – 2000. – Vol. 35. – P. 41–57.
119. Fujimori, A. Adaptive navigation of mobile robots with obstacle avoidance / A. Fujimori, P. Nikiforuk, M. Gupta // *IEEE Transactions on Robotics and Automation*. – 1997. – Vol. 13. – No. 4. – P. 596–602.
120. Greig, D.M. Exact maximum a posteriori estimation for binary images / D.M. Greig, B.T. Porteous, A.H. Seheult // *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)*. – 1989. – P. 271–279.
121. Hacıhaliloglu, I. Automatic bone localization and fracture detection from volumetric ultrasound images using 3-D local phase features / I. Hacıhaliloglu, R. Abugharbieh, A.J. Hodgson, R.N. Rohling, P. Guy // *Ultrasound in medicine & biology*. – 2012. – Vol. 38. – No. 1. – P. 128–144.

122. Hamed, M. Reliable Transportation of Humanitarian Supplies in Disaster Response: Model and Heuristic / M. Hamed, A. Haghani, S. Yang // *Procedia - Social and Behavioral Sciences*. – 2012. – Vol. 54. – P. 1205–1219.

123. Horner, M.W. The effects of transportation network failure on people's accessibility to hurricane disaster relief goods: a modeling approach and application to a Florida case study / M.W. Horner, M.J. Widener // *Natural hazards*. – 2011. – Vol. 59. – P. 1619–1634.

124. Hornyak, T. Be afraid: DARPA unveils Terminator-like Atlas robot [Электронный ресурс] / T. Hornyak. – 2013. – Режим доступа: <http://www.cnet.com/news/be-afraid-darpa-unveils-terminator-like-atlas-robot>.

125. Hyvärinen, A. Independent component analysis / A. Hyvärinen, J. Karhunen, E. Oja. – John Wiley & Sons, 2004. – 504 p.

126. Iankova A. The Glasgow coma scale clinical application in emergency departments / A. Iankova // *Emergency nurse*. – 2006. – Vol. 14. – No. 8. – P. 30–35.

127. Jacob, N.E. Survey of Bone Fracture Detection Techniques / N.E. Jacob, M.V. Wyawahare // *International Journal of Computer Applications*. – 2013. – Vol. 71. – No. 17. – P. 31–34

128. James, C.J. Independent component analysis for biomedical signals / C.J. James, C.W. Hesse // *Physiological measurement*. – 2004. – Vol. 26. – No. 1. – P. R15–R39.

129. Jenkins, J.L. et al. 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: an official publication of the World Association for Disaster and Emergency Medicine*. – 2008. – Vol. 1(23). – P. 3–8.

130. Jensen, F.V. Bayesian networks and decision graphs/ F.V. Jensen, T.D. Nielsen. – Berlin: Springer, 2007. – 457 p.

131. Jia, Y. Active contour model with shape constraints for bone fracture detection / Y. Jia, Y. Jiang // *International Conference on Computer Graphics, Imaging and Visualisation (CGIV'06)*. – IEEE, 2006. – P. 90–95.

132. Jian, L. Fracture identification of X-ray image /J. Liang, B.C. Pan, Y.H. Huang, X.Y. Fan // International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition (ICWAPR 2010). – 2010. – P. 67–73.

133. Kolawole, E. What if this ATLAS shrugged? - DARPA unveils new humanoid robot [Электронный ресурс] / E. Kolawole // Washington Post. – 2013. – Режим доступа: <http://www.washingtonpost.com/blogs/innovations/wp/2013/07/12/what-if-this-atlas-shrugged-darpa-unveils-new-humanoid-robot/>

134. Kuindersma, S. An efficiently solvable quadratic program for stabilizing dynamic locomotion / S. Kuindersma, F. Permenter, R. Tedrake // IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). – 2014. – P. 2589–2594.

135. Kuindersma, S. Optimization-based locomotion planning, estimation, and control design for the Atlas humanoid robot / S. Kuindersma, R. Deits, M. Fallon, A. Valenzuela et al. // Autonomous Robots. – 2016. – Vol. 40. – No. 3. – P. 429–455.

136. Lacave, C. Knowledge Acquisition in PROSTANET – A Bayesian network for diagnosis prostate cancer / C. Lacave, F.J. Diez // Knowledge-Based Intelligent Information and Engineering Systems. – 2003. – LNCS 2774. – P. 1345–1350.

137. Lee, J. Comparison between red, green and blue light reflection photoplethysmography for heart rate monitoring during motion / J. Lee, K. Matsumura, K.I. Yamakoshi, P. Rolfe, S. Tanaka, T. Yamakoshi // 35th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC). – 2013. – P. 1724–1727.

138. Lee, S.K. Distributed cohesive configuration control for swarm robots with boundary information and network sensing / S.K. Lee, J. McLurkin // Intelligent Robots and Systems (IROS 2014). IEEE/RSJ International Conference on. – 2014. – P. 1161–1167.

139. Lerner, E.B. Mass Casualty Triage: An Evaluation of the Data and Development of a Proposed National Guideline / E.B.Lerner, R.B. Schwartz, P.L. Coule, et al. // Disaster Medicine and Public Health Preparedness. – 2008. – Vol. 2. – No. S1. – P. S25-S34.

140. Li, S.Z. Markov random field modeling in computer vision / S.Z. Li. – Springer Science & Business Media, 2012. – 264 p.
141. Linda, C.H. Crack detection in X-ray images using fuzzy index measure / C.H. Linda, G.W. Jiji // *Applied Soft Computing*. – 2011. – Vol. 11. – No. 4. – P. 3571–3579.
142. Meshalkin, L.D. Some mathematical methods for the study of noncommunicable diseases / L.D. Meshalkin // *Proc. 6-th Intern. Meeting of Uses of Epidemiol. in Planning Health Services*. – Yugoslavia, Primosten, 1971. – Vol. 1. – P. 250–256.
143. 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.
144. Motienko, A.I. Modeling of Injured Position During Transportation Based on Bayesian Belief Networks / A.I. Motienko, A.L. Ronzhin, O.O. Basov, M. Zelezny // *Proceedings of the First International Scientific Conference “Intelligent Information Technologies for Industry” (IITI’16)*. – Springer International Publishing, 2016. – P. 81–88.
145. Nishitani, I. Human-centered space path planning for mobile robot in dynamic environments/ I. Nishitani, T. Matsumura, M. Ozawa, A. Yorozu, M. Takahashi // *Robotics and Autonomous Systems*. – 2015. – Vol. 66. – P. 18–26.
146. Nocera, A. Australian disaster triage: a colour maze in the Tower of Babel / A. Nocera, A. Garner // *Australian and New Zealand journal of surgery*. – 1999. – Vol. 69. – No. 8. – P. 598-602.
147. Oestern, H.J. Klassifikation Schwer- und Mehrfachverletzter – was hat sich bewährt? [The classification of the severely and multiply injured – what has been established?] / H.J. Oestern, K. Kabus // *Der Chirurg; Zeitschrift für alle Gebiete der operativen Medizin*. – 1997. – Vol. 68. – No. 11. – P. 1059-1065.
148. Ozdamar, L. Planning helicopter logistics in disaster relief / L. Ozdamar // *OR Spectrum*. – 2011. – Vol. 33. – P. 655–672.

149. Pearson, K. On the criterion that a given system of deviations from the probable in the case of a correlated system of variables is such that it can reasonably be supposed to have arisen from random sampling / K. Pearson // *Phil. Mag*, 1900. – Vol. 50. – P. 157–175.

150. Perl, J. Probabilistic Reasoning in Intelligent Systems: Networks of Plausible Inference / J. Perl. – NY etc.: Morgan Kaufmann Publ., 1994. – 552 p.

151. Pitsikalis, V. Adaptive multimodal fusion by uncertainty compensation / V. Pitsikalis, A. Katsamanis, G. Papandreou, P. Maragos // In: *Ninth International Conference on Spoken Language Processing*. – Pittsburgh, 2006. – P. 2458–2461.

152. Poh, M.Z. Non-contact, automated cardiac pulse measurements using video imaging and blind source separation / M.Z. Poh, D.J. McDuff, R.W. Picard // *Optics express*. – 2010. – Vol. 18. – No. 10. – P. 10762–10774.

153. Qian, X. et al. An active contour model for medical image segmentation with application to brain CT image / X. Qian, J. Wang, S. Guo, Q. Li // *Medical physics*. – 2013. – Vol. 40. – No. 2. – P. 021911.

154. Ronzhin, A.L. Multimodal Information Coding System for Wearable Devices of Advanced Uniform // A.L. Ronzhin, O.O. Basov, A.I. Motienko, A.A. Karpov, Y.V. Mikhailov, M. Zelezny // *18th International Conference on Human-Computer Interaction (HCI International 2016)*. – 2016. – LNCS 9734. – P. 539–545.

155. Saitov, I.A. Neural Network System for Monitoring State of a High-Speed Fiber-Optical Linear Path / I.A. Saitov, O.O. Basov, A.I. Motienko, S.I. Saitov, M.M. Bizin, V.Yu. Budkov // *13th International Symposium on Neural Networks (ISNN 2016)*. – 2016. – LNCS 9719. – P. 497–504.

156. Shen, Z.-J.M. Modeling transportation networks during disruptions and emergency evacuations [Электронный ресурс] / Z.-J.M. Shen, J. Pannala, R. Rai, T.S. Tsoi. – 2008. – Режим доступа: <http://escholarship.org/uc/item/1257t9znm>

157. Smith, R. Detection of fracture and quantitative assessment of displacement measures in pelvic X-RAY images / R. Smith, K. Ward, C. Cockrell, J. Ha, K. Najarian // *IEEE International Conference on Acoustics Speech and Signal Processing (ICASSP 2010)*. – 2010. – P. 682–685.

158. Song, R. Optimum Transit Operations during the Emergency Evacuations / R. Song, S. He, L. Zhang // Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology. – 2009. – Vol. 9. – P. 154–160.

159. Stentz, A. CHIMP, the CMU Highly Intelligent Mobile Platform / A. Stentz, H. Herman, A. Kelly, E. Meyhofer, et al. // Journal of Field Robotics. – 2015. – Vol. 32. – Issue 2. – P. 209–228.

160. Takano, C. Heart rate measurement based on a time-lapse image / C. Takano, Y. Ohta // Medical engineering & physics. – 2007. – Vol. 29. – No. 8. – P. 853–857.

161. Taniguchi, E. A conceptual road network emergency model to aid emergency preparedness and response decision-making in the context of humanitarian logistics / E. Taniguchi, F. Ferreira, A. Nicholson // Procedia - Social and Behavioral Sciences. – 2012. – Vol. 39. – P. 307–320

162. Tatić, M. [Scoring systems for evaluating injury severity] / M. Tatić, A. Komarcević, V. Borisev // Medicinski pregled. – 1999. – Vol. 53. – No. 9–10. – P. 521–525.

163. Theobald, D. Mobile reconfigurable robot. U.S. Patent No. 8106616. – 2012 ЧС [Электронный ресурс] / D. Theobald – Режим доступа: <http://www.google.com/patents/US8106616>.

164. Triage Guidelines [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://chemm.nlm.nih.gov/triage.htm>.

165. Upgraded Atlas robot to go wireless as the stakes are raised for the DARPA robotics challenge finals [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.darpa.mil/NewsEvents/Releases/2015/01/20.aspx>.

166. Verkruysse, W. Remote plethysmographic imaging using ambient light / W. Verkruysse, L.O. Svaasand, J.S. Nelson // Optics express. – 2008. – Vol. 16. – No. 26. – P. 21434–21445.

167. Viswanath, K. Multicommodity maximal covering network design problem for planning critical routes for earthquake response / K. Viswanath, S. Peeta //

Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. – 2003. – Vol. 1857. – P. 1–10,

168. Wagner, A.K. Intentional traumatic brain injury: epidemiology, risk factors, and associations with injury severity and mortality / A.K. Wagner, H.C. Sasser, F.M. Hammond, D. Wiercisiewski, J. Alexander. // Journal of Trauma and Acute Care Surgery. – 2000. – Vol. 49. – No. 3. – P. 404–410.

169. Wagner, A.K. Use of injury severity variables in determining disability and community integration after traumatic brain injury / A.K. Wagner, F.M. Hammond, H.C. Sasser, D. Wiercisiewski, H.J. Norton // Journal of Trauma and Acute Care Surgery. – 2000. – Vol. 49. – No. 3. – P. 411–419.

170. Wasyluk, H. Support of diagnosis of liver disorders based on a causal Bayesian network model / H. Wasyluk, A. Onisko, M.J. Druzdzel // Medical Science Monitor. – 2001. – Vol. 7. – P. 327–332.

171. Wei, Z. Study on recognition of the fracture injure site based on X-ray images / Z. Wei, Z. Liming // 3rd IEEE International Congress on Image and Signal Processing (CISP 2010). – 2010. – P. 1947–1950.

172. Wiegerincka, W.A.J.J. Approximate inference for medical diagnosis / W.A.J.J. Wiegerinck, H.J. Kappen, E.W.M.T. ter Braak, W.J.P.P. ter Burg, M.J. Nijman, J.P. Neijt // Pattern Recognition Letters. – 1999. – Vol. 20. – No. 11–13. – P. 1231–1239.

173. Wilson, D.T. A multi-objective combinatorial model of casualty processing in major incident response / D.T. Wilson, G.I. Hawe, G. Coates, R.S. Crouch // European Journal of Operational Research. – 2013. – Vol. 230. P. 643–655.

174. Wu, J. Fracture detection in traumatic pelvic CT images / J. Wu, P. Davuluri, K.R. Ward, C. Cockrell, R. Hobson, K. Najarian // Journal of Biomedical Imaging. – 2012. – Vol. 1. – P. 1–10.

175. Yazici, M.A., Impact of probabilistic road capacity constraints on the spatial distribution of hurricane evacuation shelter capacities / M.A. Yazici, K. Ozbay. // Transportation. Transportation Research Record. – 2007. – Vol. 2022. P. 55–62.

176. Yi, W. A dynamic logistics coordination model for evacuation and support in disaster response activities/ W. Yi, L. Özdamar // *European Journal of Operational Research*. – 2007. – Vol. 179. – P. 1177–1193.

177. Yuan, Y. Path selection model and algorithm for emergency logistics management/ Y. Yuan, D. Wang // *Computers & Industrial Engineering*. – 2009. – Vol.56. – P. 1081–1094.

178. Zadeh, N. Theoretical efficiency of the Edmonds-Karp algorithm for computing maximal flows / N. Zadeh // *Journal of the ACM (JACM)*. – 1972. – Vol. 19. – No. 1. – P. 184–192.

179. Zhang, Y. Motion planning and control of ladder climbing on DRC-Hubo for DARPA Robotics Challenge / Y. Zhang, J. Luo, K. Hauser, H. A. Park, M. Paldhe et. al. // *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2014)*. – 2014. – P. 2086.

180. Zucker, M. A General-purpose System for Teleoperation of the DRC-HUBO Humanoid Robot / M. Zucker, S. Joo, M. X. Grey, C. Rasmussen, E. Huang, M. Stilman, A. Bobick // *Journal of Field Robotics*. – 2015. – Vol. 32. – No. 3. – P. 336–351.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

АД	– артериальное давление;
АПО	– активный подвижный объект;
АРТС	– автоматизированное робототехническое средство;
АСР	– аварийно-спасательные работы;
АХОВ	– аварийно химически опасные вещества;
БСД	– байесовская сеть доверия;
БПЛА	– беспилотный летательный аппарат;
КРТ	– компоненты ракетного топлива;
ОПО	– опасный производственный объект;
ОХВ	– опасные химические вещества;
РТК	– робототехнический комплекс;
РТС	– робототехническое средство;
САКР	– спиреоартериокардиоритмограф;
ТВС	– топливно-воздушные смеси;
УЗИ	– ультразвуковое исследование;
ФПГ	– фотоплетизмограмма;
ЧС	– чрезвычайная ситуация;
ЭКГ	– электрокардиограмма;
ЭС	– экстремальная ситуация
DARPA	– Defense Advanced Research Projects Agency (агентство передовых оборонных исследовательских проектов США);
RTS	– Revised Trauma Score (переработанная травматическая шкала);
TS	– Trauma Score (травматическая шкала) ;

ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Аварийно-спасательные работы – это действия по спасению людей, материальных и культурных ценностей, защите природной среды в зоне чрезвычайных ситуаций, локализации чрезвычайных ситуаций и подавлению или доведению до минимально возможного уровня воздействия характерных для них опасных факторов [86].

Аварийно-спасательные и другие неотложные работы – совокупность первоочерёдных работ в зоне ЧС, заключающихся в спасении и оказании помощи людям, локализации и подавлении очагов поражающих воздействий, предотвращении возникновения вторичных поражающих факторов, защите и спасении материальных и культурных ценностей.

Авария — разрушение сооружений и (или) технических устройств, применяемых на опасном производственном объекте, неконтролируемый взрыв и(или) выброс опасных веществ [85].

Активный подвижный объект – сложная мобильная система, предназначенная для информационного, энергетического или/и вещественного взаимодействия с окружающей физической средой (активный подвижный объект 1 рода) или/и с другими подобными системами (активный подвижный объект 2 рода).

Безлюдные технологии – технологии, осуществляемые без непосредственного участия человека [19].

Зона чрезвычайной ситуации – территория или акватория, на которой сложилась чрезвычайная ситуация [17].

Категория пораженного – система обозначений пораженных, предназначенная для определения очерёдности оказания медицинской помощи и транспортировки в зону эвакуации при наличии большого количества пострадавших, но ограниченного количества медицинского персонала и средств транспортировки.

Ликвидация чрезвычайных ситуаций – аварийно-спасательные и другие неотложные работы, проводимые при возникновении ЧС и направленные на

спасение жизни и сохранение здоровья людей, снижение размеров ущерба окружающей природной среде и материальных потерь, а также локализацию зон чрезвычайных ситуаций, прекращение действия, характерного для опасных факторов [86].

Неотложные работы при ликвидации чрезвычайных ситуаций – это деятельность по всестороннему обеспечению аварийно-спасательных работ, оказанию населению, пострадавшему в чрезвычайных ситуациях, медицинской и других видов помощи, созданию условий, минимально необходимых для сохранения жизни и здоровья людей, поддержания их работоспособности [86].

Опасный производственный объект — предприятие или его цеха, участки, площадки, а также иные производственные объекты, указанные в Приложении 1 к Федеральному закону «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» № 116-ФЗ [85].

Поражающее воздействие источника чрезвычайной ситуации – негативное влияние одного или совокупности поражающих факторов источника чрезвычайной ситуации на жизнь и здоровье людей, сельскохозяйственных животных и растения, объекты народного хозяйства и окружающую природную среду [17].

Пораженный в ЧС – человек, заболевший, травмированный или раненый в результате поражающего воздействия источника ЧС [17].

Пострадавший в ЧС – человек, пораженный либо понесший материальные убытки в результате возникновения ЧС [17].

Робототехническое средство – средство, которое выполняет функции, предписанные виды работ или операции без непосредственного участия человека в опасной зоне [19].

Чрезвычайная ситуация – обстановка на определенной территории или акватории, сложившаяся в результате аварии, опасного природного явления, катастрофы, стихийного или иного бедствия, которые могут повлечь или повлекли за собой человеческие жертвы, ущерб здоровью людей или окружающей природной среде, значительные материальные потери и нарушение условий жизнедеятельности людей [17].

ПРИЛОЖЕНИЕ А. ТРАВМЫ И ИХ ПРИЗНАКИ, ВЗАИМОСВЯЗЬ И СПОСОБЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Таблица А.1 – Перечень наиболее распространенных травм

Показатель	Наименование
x_1	Повреждение позвоночника
x_2	Шоковое состояние
x_3	Переломы костей таза и нижних конечностей
x_4	Сотрясение головного мозга
x_5	Травмы груди
x_6	Ампутация нижних конечностей
x_7	Травмы передней части головы и лица
x_8	Травмы органов брюшной полости
x_9	Кровопотеря
x_{10}	Травмы затылочной части головы
x_{11}	Травмы ягодиц, тыльной поверхности ног
x_{12}	Травмы спины
x_{13}	Ушибы, порезы, ссадины
x_{14}	Травмы плечевого пояса
x_{15}	Ампутированная верхняя конечность,
x_{16}	Травмы глаза, груди, дыхательных путей
x_{17}	Травмы верхних конечностей
x_{18}	Травмы шеи

Таблица А.2 – Признаки травм и способы их определения

Показатель	Наименование			
		Осмотр	Опрос	Манипуляции
x_{19}	снижение чувствительности, жжение		+	
x_{20}	неестественное положение шеи и спины	+		
x_{21}	локализация боли		+	
x_{22}	нарушение двигательной функции	+	+	
x_{23}	пониженное АД			+
x_{24}	онемение		+	
x_{25}	нарушение функций тазовых органов	+		
x_{26}	потеря сознания	+		
x_{27}	возбуждение, сменяющееся заторможенностью	+		

Продолжение таблицы А.2

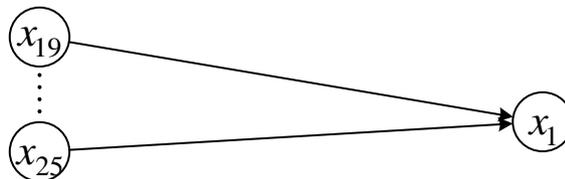
Показатель	Наименование	Осмотр	Опрос	Манипуляции
x ₂₈	учащенное дыхание			+
x ₂₉	учащенный пульс			+
x ₃₀	тахикардия			+
x ₃₁	беспамятство		+	
x ₃₂	потливость			+
x ₃₃	бледность	+		
x ₃₄	деформация тазовой области, конечностей	+		
x ₃₅	визуальное укорочение конечности	+		
x ₃₆	нарушение подвижности нижних конечностей	+	+	
x ₃₇	гематомы	+		
x ₃₈	раны	+		
x ₃₉	уменьшение движений в тазобедренном суставе, конечностях	+	+	
x ₄₀	кровотечение из раневой поверхности	+		
x ₄₁	отек мягких тканей в области травмы	+		
x ₄₂	ротация конечности	+		
x ₄₃	патологическая подвижность	+		
x ₄₄	костные отломки	+		
x ₄₅	вынужденное положение конечности	+		
x ₄₆	заметные повреждения	+		
x ₄₇	кровь из носа	+		
x ₄₈	головокружение		+	
x ₄₉	тошнота		+	
x ₅₀	слабость		+	
x ₅₁	свето- и звукобоязнь		+	
x ₅₂	нарушение координации движений	+		
x ₅₃	головная боль		+	
x ₅₄	расширенные/суженные зрачки	+		
x ₅₅	шум в ушах		+	
x ₅₆	необычные дыхательные шумы			+
x ₅₇	парадоксальное дыхание			+
x ₅₈	сосущие раны грудной клетки	+		
x ₅₉	кардиалгия		+	
x ₆₀	набухшие не пульсирующие шейные вены	+		
x ₆₁	болевого синдром, усиливающийся при кашле		+	
x ₆₂	подкожная эмфизема	+		

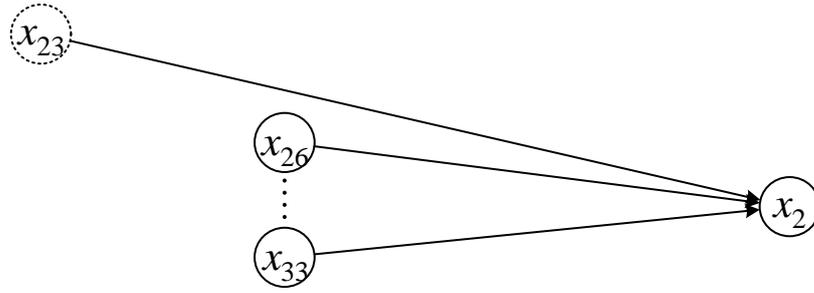
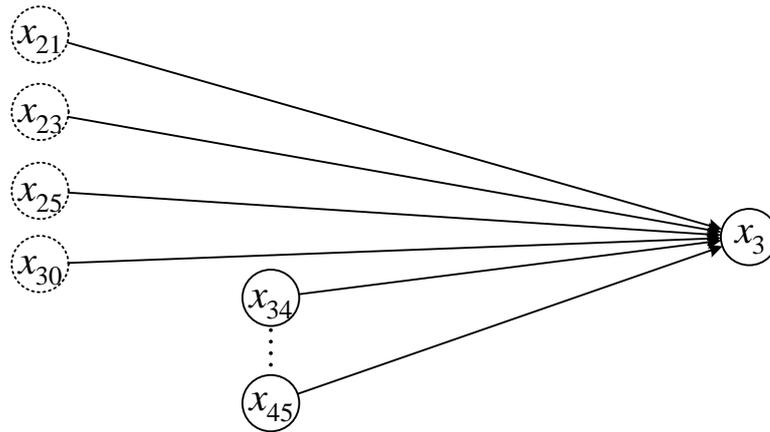
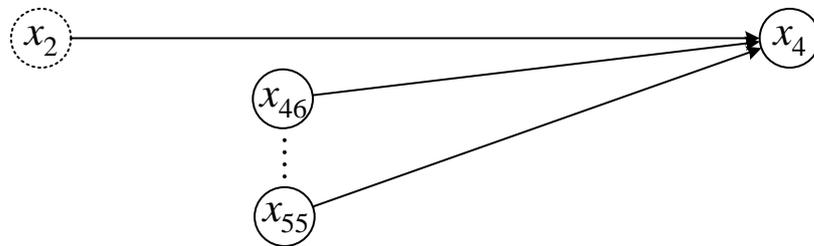
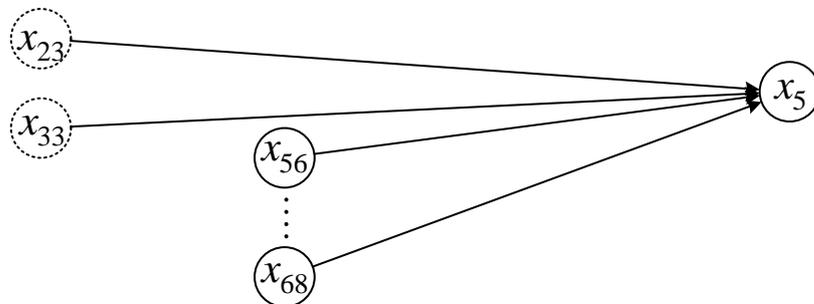
Продолжение таблицы А.2

Показатель	Наименование	Осмотр	Опрос	Манипуляции
X ₆₃	торакалгия		+	
X ₆₄	цианоз	+		
X ₆₅	одностороннее дыхание			+
X ₆₆	дыхательные движения короткие и поверхностные	+		
X ₆₇	травматическая асфиксия	+		
X ₆₈	синдром "декольте"	+		
X ₆₉	отсутствие нижней конечности	+		
X ₇₀	асимметрия лица	+		
X ₇₁	ссадины	+		
X ₇₂	нарушение зрения		+	
X ₇₃	деформация передней части головы и лица	+		
X ₇₄	целостность глаз, носа	+		
X ₇₅	адинамия	+		
X ₇₆	напряжение мышц брюшной стенки	+		
X ₇₇	ограничение дыхательных движений брюшной стенки	+		
X ₇₈	жажда		+	
X ₇₉	повышение температуры			+
X ₈₀	рвота	+		
X ₈₁	кровоизлияния	+		
X ₈₂	раневые поверхности	+		
X ₈₃	локальная припухлость и болезненность	+	+	
X ₈₄	отечность в области промежности	+		
X ₈₅	сонливость (зевота)		+	
X ₈₆	брадикардия			+
X ₈₇	круги перед глазами		+	
X ₈₈	психомоторное возбуждение	+	+	
X ₈₉	односторонний мидриаз	+		
X ₉₀	снижение реакции зрачков на свет	+		
X ₉₁	кома	+		
X ₉₂	гемипарез		+	
X ₉₃	повышение артериального давления			+
X ₉₄	фокальные эпилептические припадки	+		
X ₉₅	нарушение речи		+	
X ₉₆	непроизвольные колебательные движения глаз	+		
X ₉₇	ограничение взора вверх	+		

Окончание таблицы А.2

Показатель	Наименование	Осмотр	Опрос	Манипуляции
x_{98}	порезы	+		
x_{99}	ушибы	+		
x_{100}	позвоночник не поврежден			
x_{101}	укорочение предплечья	+		
x_{102}	опущение и смещение кпереди плеча	+		
x_{103}	ограничение, болезненность движений		+	
x_{104}	деформация	+		
x_{105}	отсутствие верхней конечности	+		
x_{106}	нарушение целостности области глаза	+		
x_{107}	наличие инородного тела в области глаза	+		
x_{108}	уряженное дыхание			+
x_{109}	одышка			+
x_{110}	боли при дыхании		+	
x_{111}	хруст			+
x_{112}	травмированная часть конечностей изменена	+		
x_{113}	неправильное положение верхней конечности	+		
x_{114}	боли в неподвижном состоянии		+	
x_{115}	свобода движений только в месте, где нет суставов	+		
x_{116}	ограниченность в движениях	+		
x_{117}	невозможность поворачивать голову	+		
x_{118}	выраженный кифоз (выпуклый кзади)	+		
x_{119}	вынужденное положение шеи	+		
x_{120}	фиксированное положение головы	+		

Рисунок А.1 – Подграф T_1 «Повреждение позвоночника»

Рисунок А.2 – Подграф T_2 «Шоковое состояние»Рисунок А.3 – Подграф T_3 «Переломы костей таза и нижних конечностей»Рисунок А.4 – Подграф T_4 «Сотрясение головного мозга»Рисунок А.5 – Подграф T_5 «Травмы груди»

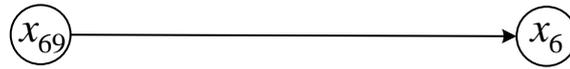


Рисунок А.6 – Подграф T_6 «Ампутированная нижняя конечность»

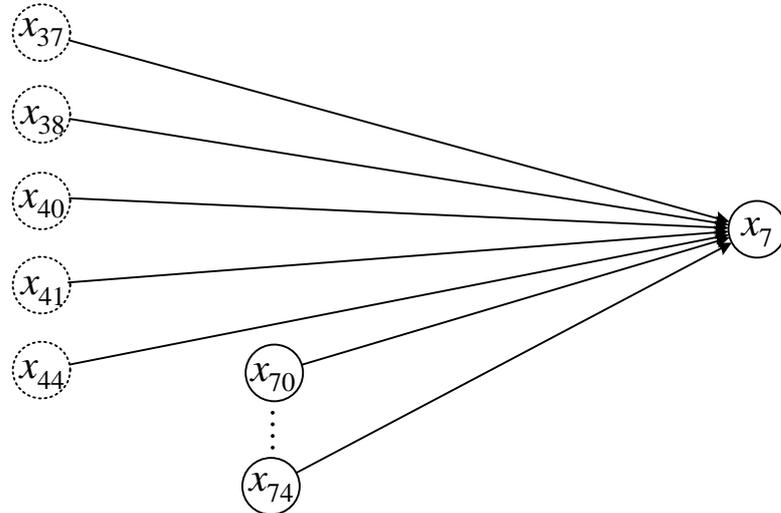


Рисунок А.7 – Подграф T_7 «Травмы передней части головы и лица»

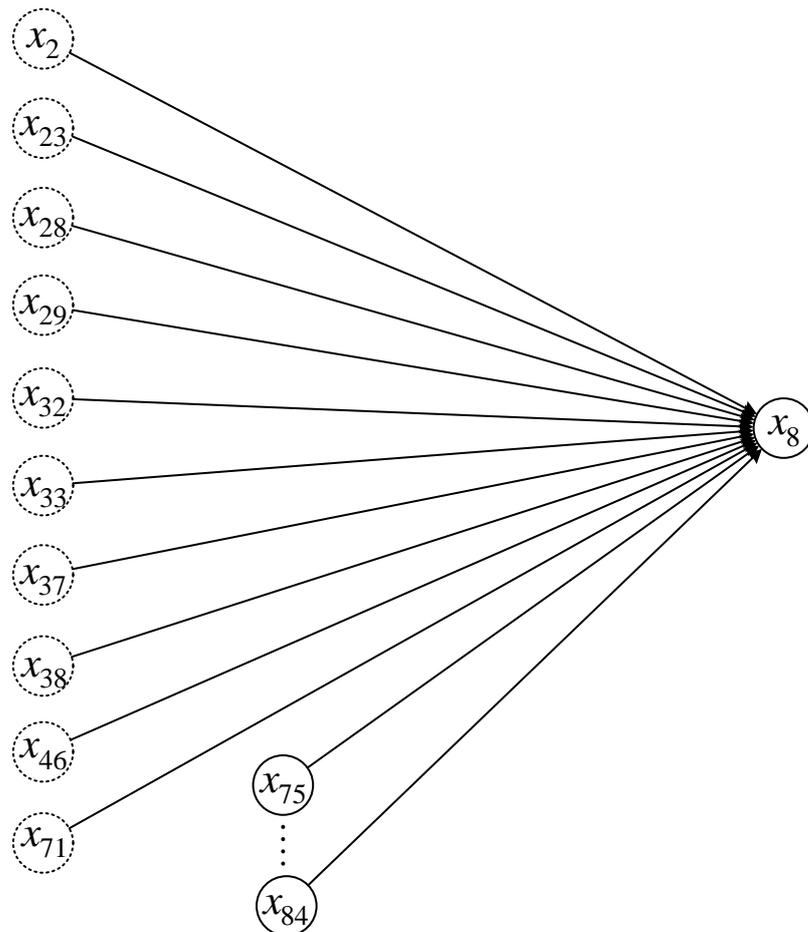
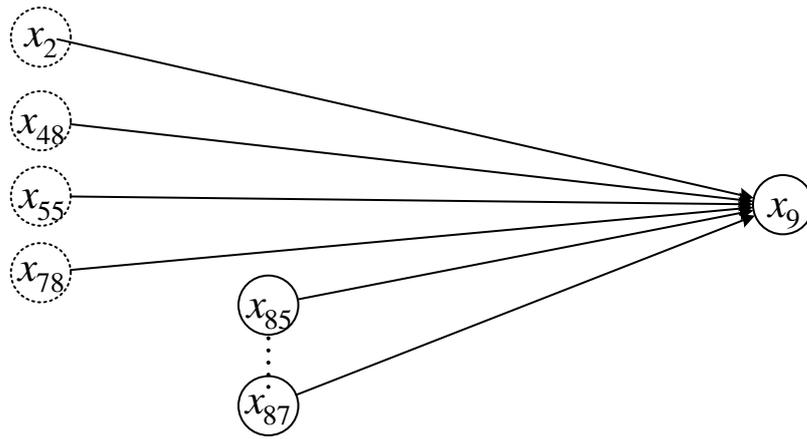
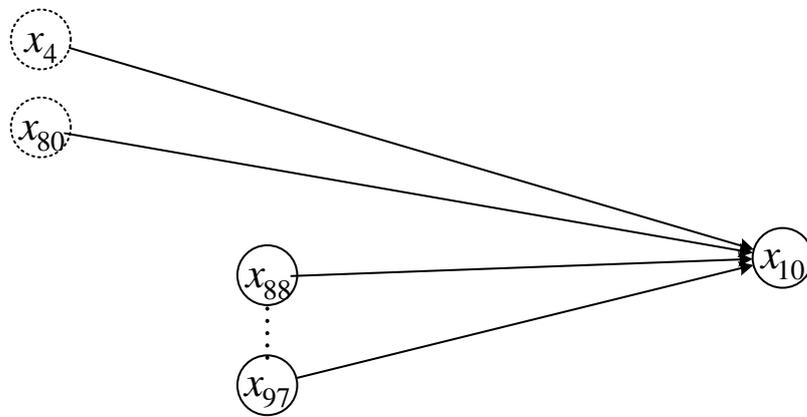
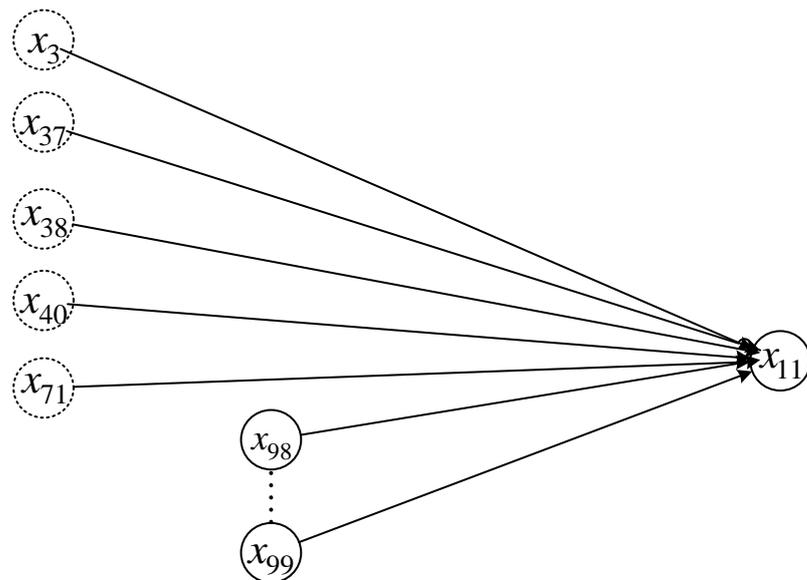


Рисунок А.8 – Подграф T_8 «Травмы органов брюшной полости»

Рисунок А.9 – Подграф T_9 «Кровопотеря»Рисунок А.10 – Подграф T_{10} «Травмы затылочной части головы»Рисунок А.11 – Подграф T_{11} «Травмы ягодиц, тыльной поверхности ног»

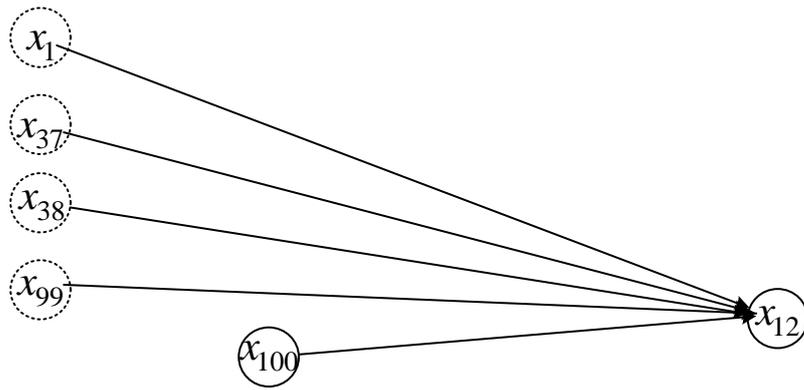
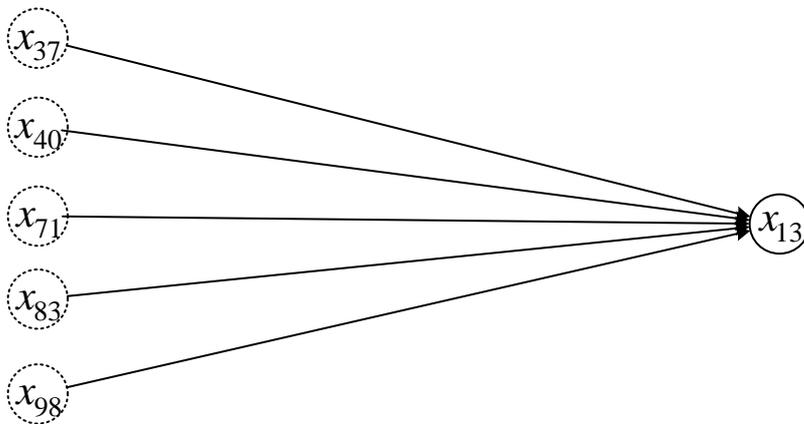
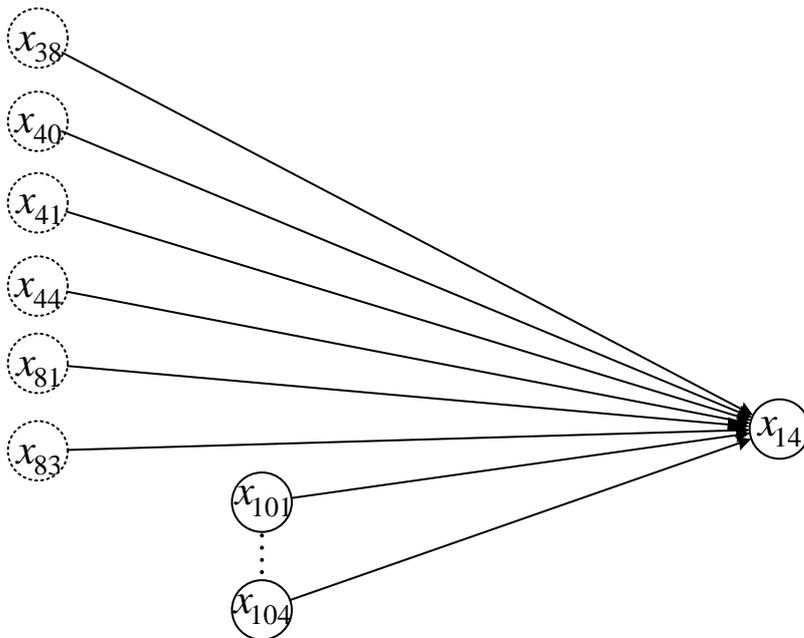
Рисунок А.12 – Подграф T_{12} «Травмы спины»Рисунок А.13 – Подграф T_{13} «Ушибы, порезы, ссадины»Рисунок А.14 – Подграф T_{14} «Травмы плечевого пояса»



Рисунок А.15 – Подграф T_{15} «Ампутированная верхняя конечность»

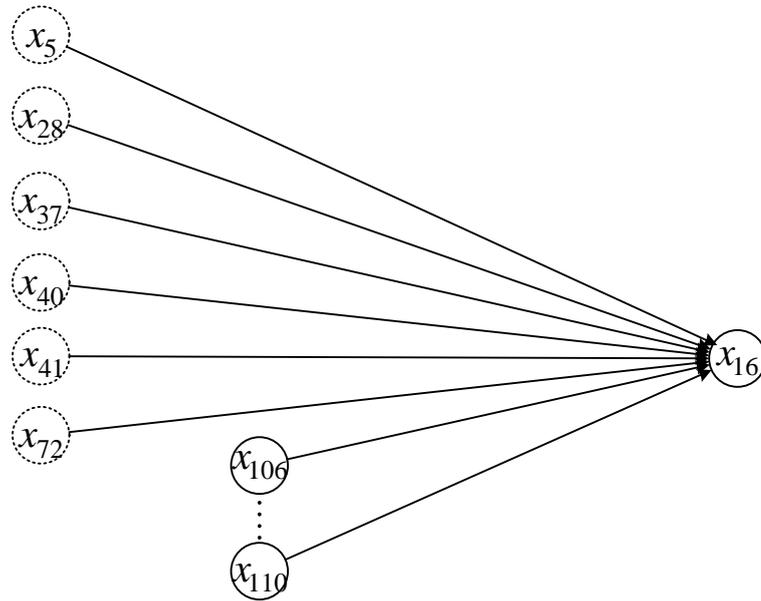


Рисунок А.16 – Подграф T_{15} «Ампутированная верхняя конечность»

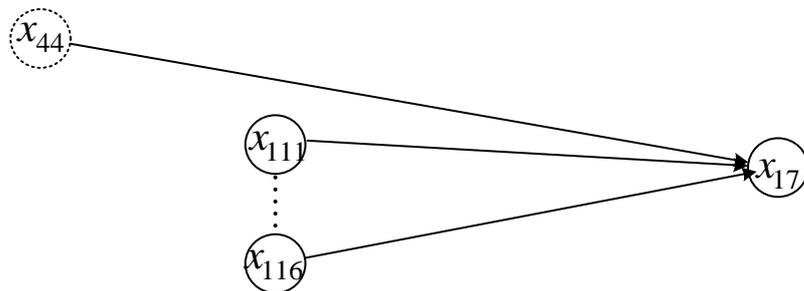


Рисунок А.17 – Подграф T_{17} «Травмы верхних конечностей»

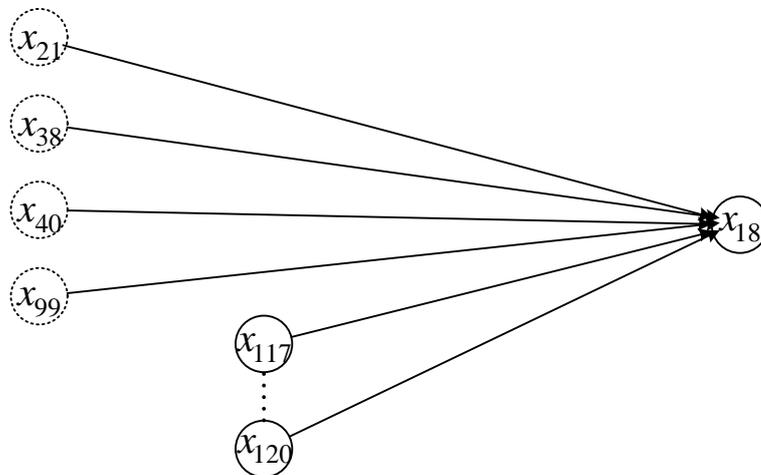


Рисунок А.18 – Подграф T_{18} «Травмы шеи»