

18. Chekalina E.A., Dmitrenko M.E., Popov A.I. Upravlenie roem беспилотnykh letatel'nykh apparatov v takticheskom zvene upravleniya [Controlling a swarm of unmanned aerial vehicles at the tactical control level], *Tekhnologii. Innovatsii. Svyaz': Sb. materialov nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Technologies. Innovation. Communication: Collection of materials of the scientific and practical conference]. St. Petersburg, 2022, pp. 181-185.
19. Lebedev B.K., Lebedev O.B. Planirovanie dvukhmernoy traektorii v usloviyakh chastichnoy neopredelennosti na osnove integratsii volnovogo i murav'inogo algoritmov [Planning a two-dimensional trajectory under conditions of partial uncertainty based on the integration of wave and ant algorithms], *5-ya Vserossiyskaya Pospelovskaya konferentsiya s mezhdunarodnym uchastiem «Gibridnye i sinergeticheskie intellektual'nye sistemy» GISIS'2020* [5th All-Russian Pospelov Conference with international participation «Hybrid and synergetic intelligent systems» GISIS'2020]. Zelenogradsk: Izd-vo Baltiyskiy federal'nyy universitet im. Immanuila Kanta, 2020, pp. 87-94.
20. Gorodetskiy V.I. Upravlenie kolektivnym povedeniem robotov v avtonomnoy missii [Controlling collective behavior of robots in an autonomous mission], *Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika* [Robotics and technical cybernetics], 2016, No. 1 (10), pp. 40-54.
21. Muslimov T.Z., Munasyrov R.A. Detsentralizovannoe upravlenie krugovymi formatsiyami беспилотnykh letatel'nykh apparatov na osnove metoda vektornogo polya [Decentralized control of circular formations of unmanned aerial vehicles based on the vector field method], *Vestnik UGATU* [Vestnik UGATU], 2019, Vol. 23, No. 3(85), pp. 112-121.
22. Medvedev yu.M., Pshikhopov V.Kh. i dr. Intellektual'noe planirovanie traektoriy podvizhnykh ob"ektov v sredakh s prepyatstviyami [Intelligent planning of vehicles path in the environment with obstacles], ed. by V.Kh. Pshikhopova. Moscow: Fizmatlit, 2014, 300 p.
23. Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu., Gurenko B.V. Algoritmy adaptivnykh pozitsionno-traektornykh sistem upravleniya podvizhnymi ob"ektami [Algorithms for adaptive position-trajectory control systems for moving objects], *Problemy upravleniya* [Control problems], 2015, pp. 66-74.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.Г. Коробейников.

**Котов Дмитрий Васильевич** – Военная академия Генерального штаба Вооруженных Сил Российской Федерации; e-mail: dim.kot2009@yandex.ru; г. Москва, Россия; тел.: 89269275177; научный сотрудник.

**Лебедев Олег Борисович** – Южный федеральный университет; e-mail: lebedev.ob@mail.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 89085135512; доцент.

**Kotov Dmitry Vasilievich** – Military Academy of the General Staff of the Armed Forces of the Russian Federation; e-mail: dim.kot2009@yandex.ru; Moscow, Russia; phone: +79269275177; researcher.

**Lebedev Oleg Borisovich** – Southern Federal University; e-mail: lebedev.ob@mail.ru; Taganrog, Russia; phone: +79085135512; associate professor.

УДК 614.842.47

DOI 10.18522/2311-3103-2024-1-167-180

**И.В. Образцов, М.Г. Пантелеев**

### **ОБОСНОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В ЗАДАЧАХ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ КОРАБЛЕЙ ВМФ\***

*Информации о пожароопасных ситуациях, циркулирующей в контурах систем контроля и управления кораблём ВМФ и уровня технологий искусственного интеллекта, вполне достаточно, чтобы разработать научно-методический аппарат обнаружения пожароопасных ситуаций в корабельных помещениях, определения места их возникновения и факторов пожара, прогнозиро-*

---

\* Работа выполняется в рамках научно-исследовательской работы «Поиск и исследование методов и технологий искусственного интеллекта для применения в системах обеспечения пожарной безопасности кораблей», включенная в научный план ВС РФ на 2023 год и плановый 2024 и 2025 года.

вания развития пожароопасной ситуации и разработать комплекс технологических решений с применением искусственного интеллекта для получения обоснованных рекомендаций по локализации и тушению пожаров на кораблях ВМФ. Это позволит значительно сократить время обнаружения источников возгорания, дать достоверную информацию о пожароопасной обстановке, спрогнозировать развитие пожара в корабельных помещениях и оперативно организовать борьбу с корабельным пожаром до возникновения критических пожароопасных факторов и ущерба кораблю, здоровью и жизни личного состава. Технологии искусственного интеллекта являются эффективным средством решения сложных плохо формализуемых задач. К этому классу традиционно относятся задачи классификации, кластеризации, аппроксимации многомерных отображений, прогнозирования временных рядов, нелинейной фильтрации, управления сложными технологическими объектами. Анализ пожарной опасности технологических процессов, работы корабельных систем и технических средств показал, что одним из наиболее перспективных путей разрешения системного противоречия в обеспечении пожарной безопасности является использование технологий искусственного интеллекта. Необходимость разработки интеллектуальных систем обеспечения живучести на кораблях ВМФ обусловлена необходимостью повышения эффективности руководства при борьбе за живучесть в ряде аварий и катастроф. Описаны примеры влияния различных факторов на ведение борьбы за живучесть при возникновении аварий. Определена роль интеллектуальных систем обеспечения живучести в составе систем кораблей и судов. Обоснована необходимость внедрения таких систем. Разрабатываемые в настоящее время интеллектуальные системы обеспечения живучести на кораблях ВМФ призваны оказывать помощь командному составу кораблей и судов в своевременности и обоснованности принятия решений, что позволит повысить эффективность борьбы за живучесть.

*Пожарная безопасность; борьба за живучесть; корабли ВМФ; интеллектуальная система живучести; онтологическая база знаний; расписывание образов; искусственные нейронные сети; искусственный интеллект; база данных; база знаний; интеллектуальная поддержка принятия решения.*

**I.V. Obratsov, M.G. Pantelev**

#### **SUBSTANTIATION AND DEVELOPMENT OF AN INTELLECTUAL DECISION SUPPORT SYSTEM IN THE TASKS OF ENSURING FIRE SAFETY OF NAVY SHIPS**

*Information about fire-hazardous situations circulating in the circuits of the control and control systems of the Navy ship and the level of artificial intelligence technologies is quite enough to develop a scientific and methodological apparatus for detecting fire-hazardous situations in ship premises, determining the location of their occurrence and fire factors, predicting the development of a fire-hazardous situation and developing a set of technological solutions using artificial intelligence to obtain sound recommendations on localization and extinguishing fires on Navy ships. This will significantly reduce the time for detecting sources of ignition, provide reliable information about the fire-hazardous situation, predict the development of a fire in the ship's premises and promptly organize the fight against a ship's fire before the occurrence of critical fire-hazardous factors and damage to the ship, the health and life of personnel. Artificial intelligence technologies are an effective means of solving complex poorly formalized tasks. This class traditionally includes the tasks of classification, clustering, approximation of multidimensional maps, time series forecasting, nonlinear filtering, and management of complex technological objects. The analysis of the fire hazard of technological processes, the operation of ship systems and technical means has shown that one of the most promising ways to resolve the systemic contradiction in ensuring fire safety is the use of artificial intelligence technologies. The need to develop intelligent survivability systems on Navy ships is due to the need to improve the effectiveness of leadership in the fight for survivability in a number of accidents and catastrophes. Examples of the influence of various factors on the conduct of the struggle for survivability in the event of accidents are described. The role of intelligent survivability systems in the systems of ships and vessels is determined. The necessity of implementing such systems is justified. The intelligent survivability systems currently being developed on Navy ships are designed to assist the command staff of ships and vessels in the timeliness and validity of decision-making, which will increase the effectiveness of the fight for survivability.*

*Fire safety; the struggle for survivability; Navy ships; intelligent survivability system; Schedule images artificial neural networks; ontological knowledge base; artificial intelligence; database; knowledge base; Intelligent decision support.*

**Введение.** Исходя из анализа пожаров на кораблях и судах ВМФ, утверждает-ся, что причинно-следственные связи в пожароопасных ситуациях, несмотря на их в целом типичный характер, в каждой пожароопасной ситуации обладают свойством уникальности. Тем не менее закономерности тактики борьбы с корабельным пожа-ром, основанной на требованиях и руководствах, регулярных тренировок и опыте борьбы с реальными корабельными пожарами, можно и нужно вывести через умную – интеллектуальную поддержку принятия решений по борьбе с корабельными пожа-рами. Поэтому путь создания системы управления борьбой за живучесть, ориенти-рованный на интеллектуальное принятие решений, является актуальным [1].

Вместе с тем, задачи по борьбе с корабельным пожаром по своему многообра-зию, множеству агентов и сложности структурных взаимосвязей между ними могут оказаться недоступными для обзора (мониторинга) лицом-руководителем процесса выполнения задач (ЛПР). Фундаментальный принцип кибернетики, известный как принцип необходимого разнообразия У.Р. Эшби, состоит в том, что сложность управляющей системы должна быть не меньше сложности объекта управления. Из этого принципа следует, что интеллектуализация управления борьбой с пожаром не может быть только сведена к автоматическому выполнению алгоритмической последовательности заранее сформированного набора действий.

Поэтому возникает необходимость организации функционирования системы управления борьбой с корабельным пожаром на основе сетевого планирования, путем создания системы интеллектуальной поддержки принятия решений (СИППР) управленческой деятельности руководителя.

**Система интеллектуальной поддержки принятия решений.** Отличие СИППР от классических экспертных систем состоит в том, что выбор пути на де-реве целей, средств и способов их достижения определяется не системой продук-ционных правил «если-то», заложенных в базу знаний (БЗ) экспертной системы, а самим руководителем, ЛПР.

Поддержка состоит в доступном для восприятия ЛПР мониторинге пожаро-опасной ситуации и процесса борьбы с корабельным пожаром, обычно воспроиз-водимого лишь мысленно. В результате ЛПР становится доступным во всем объе-ме и полноте поле управленческой деятельности по оценке обстановки, выработке замысла, принятию решения по борьбе с пожаром, организации, координации и контролю действий личного состава для его выполнения.

Отслеживание пожароопасной ситуации и процесса борьбы с корабельным пожаром с помощью табло, мнемосхем и сигнальных датчиков современных авто-матизированных систем контроля и управления пожаробезопасностью на кораблях ВМФ продуктивно, но весьма непросто. Управляемая система образно представ-ляет собой калейдоскоп взаимосвязанных операций, находящихся в различных состояниях. Эти обстоятельства диктуют необходимость оснащения перспектив-ных систем управления подсистемой, имеющей характер и смысл «Интеллекту-альной системы обеспечения живучести на кораблях ВМФ».

Ниже рассматривается основной аспект разработки этой подсистемы в плане реализации действий личного состава в соответствии со схемой на рис. 1, с приме-нением сетевой информационной технологии.

Концептуальное, формализованное описание постановки задачи, отражаю-щее идеологию ее формирования, может быть представлено как минимизация рис-ка развития аварии от опасной ситуации до катастрофической.

Для осуществления управления по достижению целевого состояния «Безо-пасное выполнение задачи» должна подвергаться анализу вся располагаемая масса сведений о текущем состоянии корабля, истории развития пожара и возможных вариантах борьбы с пожаром.

Рассматриваются принципы и концепция построения СИППР как систем, ос-нованных знаниях. Формулируется и развивается класс математических моделей представления знаний как мета-граф знаний с системой правил, реализующих

(формализующих) логико-детерминированный или логико-вероятностный подход в представлении набора причинно-следственных связей между классами сценариев развития нештатных пожароопасных ситуаций и стратегиями / правилами принятия управляющих решений по изменению сценариев развития ситуаций.

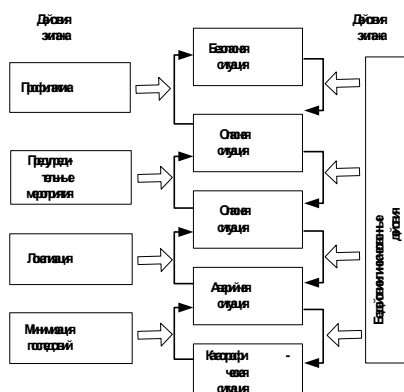


Рис. 1. Источники информации о пожароопасной ситуации

Ключевым элементом интеллектуальной системы управления становится база знаний управления [2, 3]. Знания в данном случае можно интерпретировать как систему формализации причинно-следственных связей, характеризующих взаимосвязи между изменением состояния объекта управления, и факторами, оказывающими влияние на эти состояния.

Анализ задач, решаемых СИППР обнаружения пожароопасных ситуаций и формирования плана действий. В соответствии с определенными в ТЗ [4] целью и задачами НИР СИППР должна решать три основные задачи:

1. Оценка взрывопожароопасной обстановки в корабельных помещениях.
2. Прогнозирование развития пожароопасной ситуации (ПОС).
3. Формирование плана действий по устранению ПОС и ликвидации ее последствий.

Оценка обстановки включает автоматический контроль (мониторинг) состояния корабельных помещений различного назначения на предмет взрывопожароопасной обстановки, обнаружение, локализацию и (по возможности) установление источника и причин ПОС. Особенностью систем рассматриваемого класса является сбор информации от большого количества датчиков и сенсоров различных типов, территориально распределенных по корабельным помещениям. При этом разные типы помещений отличаются потенциальными причинами возникновения пожаров. Сбор и анализ информации о состоянии корабельных помещений должны выполняться непрерывно в повседневных условиях, при обнаружении пожара и при борьбе за живучесть корабля.

Кроме того, оценка обстановки предполагает формирование, хранение и динамическое обновление в базе данных (БД) СИППР общего ситуационного контекста, включающего выполняемую в данный момент кораблем задачу, текущее состояние сил и средств.

Прогнозирование развития обнаруженной ПОС предназначено для формирования возможных будущих ситуаций на основе специализированных моделей. Важной особенностью таких моделей является определение динамики процесса развития пожара с явным представлением темпоральности, т.е. с привязкой состояния прогнозируемых процессов к моментам времени. Это, в частности, необходимо для определения запаса времени на принятие решений по ликвидации пожара и его последствий. В рамках этого времени может существовать возмож-

ность сбора дополнительной информации о ситуации, включая проведение осмотра мест распространения огня экипажем корабля. Разработка (или выбор) моделей прогнозирования является одной из важнейших задач разработки СИППР.

Интеллектуальная поддержка принятия решений при борьбе с пожарами предполагает формирование плана действий по устранению ПОС и ликвидации последствий пожара. В простых случаях решения могут содержать рекомендации по выполнению разовых действий, например по включению систем пожаротушения для локализации и ликвидации корабельного пожара. В более сложных случаях решением может быть многошаговый план, содержащий последовательность действий. Такие планы могут учитывать более широкий контекст ситуации (миссия корабля и его текущая задача, имеющиеся в данный момент силы и средства, конкретные особенности корабельных помещений, фаза развития пожара, риски распространения и т.п.) и включать организационные мероприятия по эвакуации личного состава [5].

На основе состава решаемых задач и требований к СИППР должен быть определен состав, структура и характеристики интеллектуальной системы обеспечения пожарной безопасности корабля (СИППР ОПБК).

На этапе НИР целесообразно анализировать две категории требований к СИППР:

- ◆ функциональные требования;
- ◆ требования к архитектуре СИППР.

Функциональные требования определяются составом и содержанием основных задач СИППР, предполагают уточнение требований к моделям и методам их решения, т.е. к математическому обеспечению системы. На основе этих требований на последующих этапах уточняются требования к алгоритмическому и программному обеспечению.

Функциональные требования к СИППР определяются необходимостью решения и содержанием трех рассмотренных выше базовых задач – оценки обстановки, прогнозирования развития событий и формирования плана действий.

Основными требованиями в части оценки обстановки являются:

- ◆ полнота входной информации;
- ◆ своевременность – все существенные события, свидетельствующие о наличии ПОС, должны обнаруживаться своевременно для идентификации этой ситуации и оперативного принятия решений.

Полнота поступающей на вход СИППР от всех источников (датчиков, сенсоров, личного состава) первичной информации понимается как ее достаточность для оперативной (своевременной) оценки ситуации и принятия адекватного решения [6]. Требование полноты исходных данных должно обеспечиваться составом и размещением источников первичной информации, и организацией ввода данных в систему. На данном этапе можно считать, что данное требование обеспечивается на этапе проектирования корабля при размещении систем пожарной безопасности в различных корабельных помещениях.

Своевременность предполагает обнаружение всех событий, существенных для идентификации ПОС, настолько быстро, чтобы осталось достаточное время для адекватной оценки ситуации. Модель, используемая для оценки ситуации, в свою очередь, должна оставлять время для прогнозирования и принятия адекватного решения. Требование своевременности, таким образом, декомпозируется на требование к времени сбора первичной информации и к времени комплексной оценки ситуации на основе всей совокупности исходных данных. Последнее определяется особенностями модели оценки ситуации.

Основными требованиями в части моделей и методов решения задачи прогнозирования являются:

- ◆ адекватность моделей прогнозирования;
- ◆ минимизация время решения задачи.

Адекватность модели прогнозирования означает, что она определяет возможные последствия наблюдаемой аварийной ситуации с достоверностью и точностью, позволяющими в заданное время принять адекватные решения по ее устранению.

Динамика развития пожара на корабле в общем случае может варьироваться в зависимости от множества факторов, которые должны учитываться в модели. Возможные последствия наблюдаемых событий должны определяться с привязкой к временной шкале, при этом модель должна формировать оценки тяжести последствий (ущерба) с привязкой к различным моментам времени.

Модель прогнозирования должна позволять решать задачу в опережающем масштабе времени, чтобы оставалось достаточное время для принятия решения (формирования плана действий) его практической реализации до момента наступления критических событий (неприемлемого ущерба).

Поскольку сложность моделей прогнозирования может варьироваться в широких пределах, при разработке (выборе) модели необходим разумный компромисс между ее сложностью и временем решения задачи. Таким образом, модель прогнозирования должна быть достаточно простой, чтобы обеспечивать решение задачи в опережающем масштабе времени и оставлять время для оперативного принятия решения и его реализации.

В части моделей и методов решения задачи планирования действий основными требованиями также являются адекватность и своевременность формирования планов. Планирование должно выполняться с учетом общего ситуационного контекста (оперативной обстановки), включающего текущую задачу, выполняемую кораблем в рамках заданной миссии, его местонахождение (у пирса, в своих или чужих территориальных водах и т.п.) и положение (для ПЛ – в надводном или подводном состоянии), состояние собственных сил и средств и т.п.

Существует два базовых подхода к решению задачи планирования действий является одной из классических в теории ИИ:

- ◆ формирование плана по реактивному принципу;
- ◆ использование методов планирования, основанных на делиберативных архитектурах.

Уточнение требований к моделям и методам планирования возможно на основе детального анализа особенностей проблемной области [7].

Основными требованиями к архитектуре СИППР являются: универсальность и открытость.

Универсальность предполагает возможность использования общей архитектуры (путем ее настройки и адаптации) для построения СИППР разных типов (ПЛ, НК), классов и видов кораблей.

Открытость предполагает возможность достаточно просто расширять (наращивать) функциональные возможности СИППР в рамках ее базовой архитектуры без (существенной) доработки программного обеспечения. Реализация данного требования имеет два аспекта:

- ◆ модульность построения программной архитектуры – возможность добавления новых модулей решения базовых задач (например, прогнозирования), на уровне программных библиотек;
- ◆ использование интерпретируемых БЗ – возможность расширять функциональные возможности СИППР путем пополнения (модификации) знаний в БЗ без доработки ПО.

Важным классом требований к данному классу систем являются также эргономические требования к интерфейсу пользователя: содержанию и форме выводимой информации (в том числе, в многомодальном режиме). Такие требования подлежат уточнению на основе сложившейся практики построения корабельных информационных систем.

Общие принципы построения СИППР определяются на основе анализа особенностей проблемной области. Проблемная область рассматривается как совокупность предметной области и множества решаемых в ней задач. Предметная область описывается совокупностью сущностей, их свойств и отношений между ними. Модель предметной области фиксирует декларативные знания, необходимые пользователю СИППР для решения соответствующего класса задач.

Множество задач, которые должна решать (поддерживать решение) СИППР в данной проблемной области, характеризуется методами их решения. При этом для одной и той же задачи в общем случае может существовать несколько методов ее решения (аналитических, логических, эвристических, имитационных), которые могут существенно отличаться вычислительной сложностью (и, следовательно, временем решения) и степенью точности (достоверности) получаемых результатов.

К особенностям рассматриваемой проблемной области относятся:

- ◆ разнообразие классов и подклассов кораблей;
- ◆ разнообразие типов источников первичной информации о ПОС (датчиков, сенсоров);
- ◆ распределенность их размещения на объектах (в корабельных помещениях) и необходимость интеграции (комплексирования) данных от различных источников для оценки обстановки;
- ◆ разнообразие средств пожаротушения и их размещения в корабельных помещениях;
- ◆ широкий спектр возможных ПОС;
- ◆ возможность решения задач оценки обстановки, прогнозирования и планирования действий с использованием различных методов.

С учетом отмеченных особенностей, базовых задач и требований можно определить общие принципы построения СИППР:

1. Унификация архитектуры. Целесообразно использовать обобщенную базовую архитектуру, позволяющую с единых позиций проектировать СИППР для различных классов/подклассов кораблей. Реализация подхода на основе унифицированной архитектуры СИППР предполагает ее адаптивность, т.е. возможность ее профилирования (адаптации) под особенности конкретного объекта – НК или ПЛ разных классов. Адаптация должна выполняться на уровне содержимого БД и БЗ, без доработки (по возможности) программного кода системы. Особенности типов кораблей разных классов (а, при необходимости, и конкретного корабля), включая состав и планировку корабельных помещений, размещение в них датчиков, средств пожаротушения и т.д. должно явно фиксироваться в модели, хранимой в БЗ.

2. Открытость – способность расширения функционала СИППР при:

- ◆ появлении новых типов источников первичной информации;
- ◆ появлении новых типов средств борьбы с пожарами;
- ◆ разработке новых методов решения задач оценки обстановки, прогнозирования и планирования действий;
- ◆ создании кораблей новых проектов;

Открытость системы имеет два аспекта:

- ◆ Модульность – возможность добавления в унифицированный архитектурный фреймворк новых программных модулей (программных библиотек), реализующих различные формальные модели и методы решения базовых задач.

- ◆ Пополняемость БЗ.

Эффективная реализация принципа открытости возможна при использовании онтологического подхода, т.е. представления знаний с использованием моделей и языков онтологий.

3. Гибридность – возможность использования в рамках единого фреймворка СИППР разных типов формальных моделей (как традиционных, так и основанных на теории ИИ) для решения разных классов задач в рамках общего цикла принятия решений. Гибридность обусловлена естественной разнородностью частных задач, решаемых СИППР. Гибридные архитектуры СИППР позволяют комплексировать нейросетевые модели, с символьным представлением знаний и сочетать в рамках одной системы широкий спектр моделей и методов (классический логический вывод, нечеткая логика, байесовские сети доверия и др.).

4. Обеспечение режима реального времени. Реализация этого принципа предполагает, в частности, явное определение запаса времени на этапе оценки и прогнозирования обстановки.

5. Учет общего ситуационного контекста. Данный принцип является важным аспектом интеллектуальности и предполагает использование в процессе принятия решений максимально широкого (но релевантного данной задаче) контекста, в частности, учет стадии выполнения кораблем поставленной задачи, в которой произошло возгорание, учет состояния собственных сил и средств (в том числе личного состава и др. За формирование и поддержание в актуальном состоянии общего ситуационного контекста отвечает функция оценки обстановки СИППР.

6. Объяснимость решений. Результатом работы СИППР в общем случае может являться множество вариантов решения задачи (источника возгорания и соответствующего плана действий) с оценками их качества/эффективности по нескольким критериям. Принцип (и требование) объяснимости сформированного решения дает пользователю системы возможность принять более обоснованное решение.

Состав входных данных СИППР определяется составом источников первичной информации, которые в общем случае включают:

- ◆ данные, поступающие от датчиков и сенсоров о фиксируемых ими параметров обстановки;
- ◆ данные, вводимые должностными лицами (членами экипажа) на своих постах;
- ◆ данные, вводимые должностными лицами (членами экипажа) на своих постах;

Представление данных, получаемых от первичных источников информации, в системе (их структуры и форматы) традиционно определяется разработчиками специального программного обеспечения информационной системы.

Вместе с тем, перспективным подходом при построении СИППР представляется использование в единого унифицированного представления данных, основанного на онтологическом подходе. В последние годы разработаны онтологии датчиков и сенсорных сетей [8, 9], в которых различные типы сущностей (сенсоров) и данных специфицированы с использованием стандартизованного языка онтологий *OWL*. Фрагменты онтологий *SSN* и *SOSA* (*Sensor, Observation, Sample and Actuator*), содержащие описания классов и отношений представлены на рис. 2 и 3.

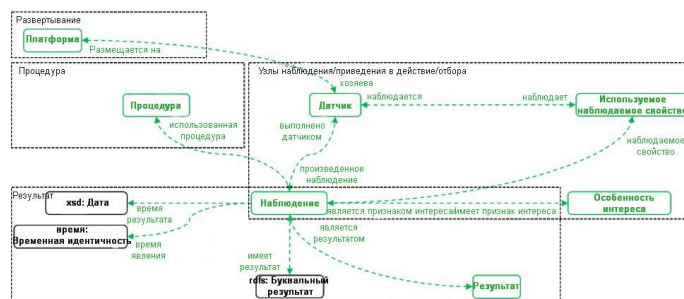


Рис. 2. Классы и свойства онтологии SOSA (фрагмент)



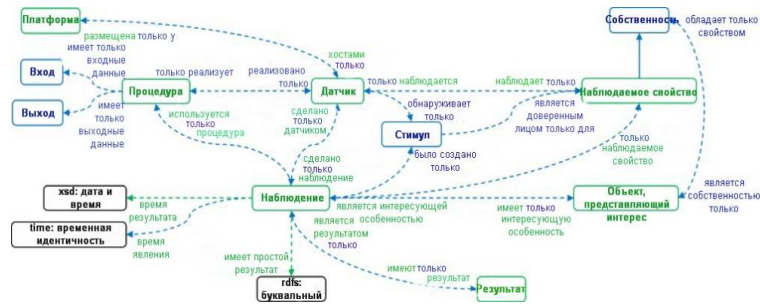


Рис. 3. Классы и свойства онтологии SSN (фрагмент)

Примеры описания класса «Наблюдаемое свойство» (*ObservableProperty*) и объектного свойства «Зарегистрированное свойство» (*observedProperty*) в онтологии *SOSA* приведены ниже:

```

sosa:ObservableProperty a OWL Class
sosa:observedProperty a OWL Object Property
Domain sosa:Observation
Range sosa:ObservableProperty.
    
```

Требования к составу и представлению знаний определяются необходимостью решения базовых задач оценки обстановки, прогнозирования и принятия решений. Общим требованиями являются

- ◆ полнота БЗ, т.е. знания должны позволять решать задачу во всех потенциально возможных ситуациях;
- ◆ форма представления знаний должна обеспечивать эффективность их использования решающими процедурами и расширяемость.

Исходя из особенностей проблемной области СИППР должна работать со следующими знаниями:

- ◆ знания об особенностях корабля и отдельных корабельных помещений;
- ◆ знания о потенциальных очагах и причинах возгорания;
- ◆ знания о сенсорах и датчиках;
- ◆ знания о средствах пожаротушения и условиях их применения;
- ◆ знания методов прогнозирования развития пожара и др.

СИППР рассматриваемого класса относится к гибридным системам ИИ, в составе которой целесообразно использовать различные концепции/типы знаний и, как следствие, модели их представления и методы обработки.

В ИИ выделяют две базовых парадигмы работы со знаниями: нейросетевая и символьная. Использование нейросетевого подхода предполагает наличие достаточно представительных обучающих выборок и характеризуется известными проблемами с верификацией решений (определением вероятности ошибок первого и второго рода). Наиболее эффективной сферой применения ИНС является распознавание образов. Их целесообразно использовать при обработке данных систем технического зрения.

Явное символьные знания используются для представления знаний, извлекаемых из руководящих документов, а также для представления экспертных знаний. Такие знания целесообразно использовать на верхнем уровне принятия решений. Перспективным подходом для представления символьных знаний является использование онтологий.

Для наполнения БЗ в первую очередь должны использоваться руководящие документы [10–16]

Решение задач оценки обстановки, прогнозирования и планирования действий в ПОС предполагает разработку и/или выбор соответствующих моделей и методов. При этом для решения разных задач должны использоваться разные модели и методы, т.е. СИППР должна строиться как гибридная система.

В практике построения СИППР в общем случае используются следующие основные классы моделей:

- ◆ традиционные аналитические модели теории принятия решений;
- ◆ логические модели, основанные на разных классах формальных логик;
- ◆ эвристические модели, основанные на экспертных знаниях.

При рассмотрении моделей и методов ИИ выделяют два основных направления:

1. Использование искусственных нейронных сетей (ИНС) и методов машинного обучения.

2. Использование явных символьных моделей знаний.

Нейросетевая парадигма систем ИИ получила в последние годы широкое распространение вследствие динамичного развития методов машинного обучения (в том числе, глубокого) и соответствующих программно-аппаратных средств. Наиболее известным применением нейросетевого подхода в последние годы являются большие языковые модели (*Large Language Models, LLM*), реализованные в виде «чат-ботов», обученных на очень больших корпусах текстов. Другим классом задач, в которых традиционно применяются ИНС является распознавание образов, в частности в системах технического зрения.

В рассматриваемом классе систем СИППР нейросетевой подход может быть использован на этапе оценки обстановки, в частности, для обнаружения и распознавания событий и ПОС (например, дыма или пламени) на основе поступающих с видеокамер данных (видеопотока). Возможность эффективного применения данного подхода в значительной степени определяется наличием достаточного количества обучающих данных (датасетов). Вместе с тем, в задачах, где отсутствует достаточное количество представительных и надежных обучающих данных, эффективность применения нейросетевого подхода существенно снижается.

Кроме того, эффективность ИНС при построении систем поддержки принятия оперативных решений, существенно ограничивается проблемами с объяснимостью и верифицируемостью получаемых результатов. В последние годы работы в направлении объяснимости нейросетевых моделей ведутся достаточно активно. Однако уровень достигнутых в настоящее время в этом направлении результатов не позволяет в полной мере обеспечить реализацию требования объяснимости решений, предъявляемого в критических (в частности, военных) приложениях СИППР.

Для решения задачи определения причины пожара в качестве формальных моделей могут использоваться диаграммы отношений, представленные ориентированными графами. Такой подход рассмотрен в [17] для анализа причин пожаров на торговых и рыболовных судах.

ПОС могут обнаруживаться и идентифицироваться на основе зафиксированной последовательности срабатывания датчиков разных типов, установленных в корабельном помещении. Основными типами датчиков, используемых в корабельных системах пожарной сигнализации, являются датчики дыма (оптической плотности) и температуры.

Модель представления знаний для обнаружения и идентификации ПОС на основе срабатывания данного типа датчиков при таком подходе может быть представлена в общем виде в форме продукционных правил вида:

«Если (Датчик  $_i$ , Событие  $_1$ , Время  $t_1$ ) &

(Датчик  $_i$ , Событие  $_2$ , Время  $\Delta t_2$ ) &

...

(Датчик  $_j$ , Событие  $_M$ , Время  $\Delta t_N$ )

то (Пожар в помещении  $R$ )»,

где Датчик  $i$  – идентификатор конкретного датчика; Событие  $k$  – событие, зафиксированное соответствующим датчиком в определенный момент времени;  $t1$  – время первого события, запускающего процесс анализа ПОС;  $\Delta t_n$  – интервал времени от начального события до текущего.

В более сложном случае правила могут анализировать события от датчиков, установленных в смежных помещениях.

Конкретные правила на основе данного шаблона должны формироваться с учетом параметров конкретного корабельного помещения, мест установки датчиков разных типов и т.п. Такие знания целесообразно хранить в онтологической базе знаний, представленной на языке *OWL* [18]. Правила целесообразно представлять на языке *SWRL* [19], совместимым с языком *OWL*.

Язык описания онтологий *OWL (Web Ontology Language)* позволяет описывать классы, свойства и индивидуумы. С 2004 г. является официальной рекомендацией консорциума *W3C* и широко поддерживается разработчиками ПО.

Следующие ключевые понятия *OWL* унаследовал от *RDF Schema*.

Онтологический подход к построению подсистем оценки обстановки в сложных киберфизических (в том числе многоагентных) системах рассмотрен в работах [18–20].

Графы знаний [20]. При рассмотрении моделей и языков представления знаний особняком стоят графы знаний (ГЗ). Граф знаний представляет собой набор взаимосвязанных описаний сущностей – объектов реального мира, событий, ситуаций или абстрактных концепций, в котором:

- ◆ описания имеют формальную структуру, которая позволяет как людям, так и компьютерам обрабатывать их эффективным и недвусмысленным образом;

- ◆ описания объектов дополняют друг друга, образуя сеть, в которой каждый объект представляет собой часть описания связанных с ним объектов.

Графы знаний интегрируют в себе характеристики нескольких парадигм управления данными и могут рассматриваться как:

- ◆ графы, поскольку их можно анализировать как любую другую графовую структуру данных;

- ◆ БД, поскольку данные могут запрашиваться с помощью структурированных запросов;

- ◆ БЗ, поскольку данные в ней имеют формальную семантику, которая может использоваться для интерпретации данных и вывода новых фактов.

Когда для выражения и интерпретации данных в ГЗ используется формальная семантика, обычно рассматриваются следующие концепции представления и моделирования знаний:

**Классы.** Описание сущности содержит классификацию сущности относительно иерархии классов. Например, при работе с общими новостями или деловой информацией могут быть классы *Person*, *Organization* и *Location*. У лиц и организаций может быть общий агент суперкласса. Местоположение обычно имеет множество подклассов, например Страна, Населенный пункт, Город и т.д. Понятие класса заимствовано из объектно-ориентированного проектирования, в котором каждая сущность должна принадлежать ровно к одному классу.

**Типы отношений.** Отношения между сущностями обычно помечаются типами, которые предоставляют информацию о природе отношения, например друг, родственник, конкурент и т.д. Типы отношений также могут иметь формальные определения, например, что *parent-of* является обратным отношением *child-of*, они оба являются частными случаями *relative-of*, которое является симметричным отношением. Отношения субрегиона и дочерней компании могут быть определены как транзитивные.

**Категория.** Сущность может быть связана с категориями, которые описывают некоторые аспекты ее семантики, например «Консультанты большой четверки» или «композиторы XIX века». Книга может принадлежать одновременно ко всем

этим категориям: «Книги об Африке», «Бестселлеры», «Книги итальянских авторов», «Книги для детей» и т.д. Категории, как правило, описываются и упорядочиваются по таксономии.

**Выводы.** Внедрение в алгоритмическое обеспечение корабельных информационных систем соответствующих моделей и алгоритмов интеллектуального принятия решений при контроле пожарной опасности позволит существенно повысить эффективность принимаемых решений при обеспечении пожарной безопасности кораблей ВМФ.

Для реализации интеллектуального подхода в обеспечении живучести выполняется поисковая научно-исследовательская работа: «Поиск и исследование методов и технологий искусственного интеллекта для применения в системах обеспечения пожарной безопасности кораблей» с выполнением фундаментальных задач направлена на повышение эффективности обеспечения пожарной безопасности кораблей (судов обеспечения) и подводных лодок ВМФ. Работа включена в научный план Вооруженных сил Российской Федерации на 2023 год и плановый период 2024 и 2025 годов. Цель работы – обосновать методы и технические решения для обеспечения интеллектуального контроля пожарной опасности в корабельных помещениях различного назначения. Заказчиками НИР выступают Управление развития технологий искусственного интеллекта Министерства обороны Российской Федерации и Морской научный комитет Военно-Морского Флота. Головной исполнитель: Военный учебно-научный центр Военно-Морского Флота «Военно-морская академия».

Впервые проводится работа по теоретическому обоснованию методов и технологий, позволяющих интеллектуализировать процесс контроля пожарной безопасности в корабельных помещениях. По результатам выполнения НИР будет принято решение о целесообразности внедрения функций интеллектуальной поддержки в системы обеспечения живучести кораблей (судов обеспечения) и подводных лодок ВМФ.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Поленин В.И., Сухачев Ю.А.* Сетевая система информационной автоматизированной поддержки управлением борьбой за живучесть морского судна // *Морская радиоэлектроника*. – 2016. – № 3 (64).
2. *Поленин В.И., Киваев Н.М., Сухачев Ю.А.* Создание интегрированных систем боевого управления – высшая стадия комплексирования // *Морская радиоэлектроника*. – 2014. – № 2 (48). – С. 44-49.
3. *Можжаев А.С., Поленин В.И.* Сетевое планирование и управление – перспективный путь создания интегрированных систем боевого управления // *Сб. трудов 12-й Международной научной школы "Моделирование и анализ безопасности и риска в сложных системах"*. – СПб., 2014;
4. *Образцов И.В., Петров С.А., Кулинь В.Ф., Пахомов Е.С. и др.* Промежуточный отчет о научно-исследовательской работе «Поиск и исследование методов и технологий искусственного интеллекта для применения в системах обеспечения пожарной безопасности кораблей» (шифр «Триумф-25»). 1 этап, ВИ ДПО ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия». УДК 623.8/9. – СПб., 2023.
5. *Образцов И.В.* Применение технологий искусственного интеллекта в системах обеспечения пожарной безопасности кораблей ВМФ // *Сб. статей по результату круглого стола на тему: «Теория и практика применения искусственного интеллекта в военной сфере» МВТФ «Армия-2022»*. – Серпухов, 2022.
6. *Образцов И.В.* Прогнозирование корабельных пожароопасных ситуаций с использованием искусственной нейронной сети // *Сб. материалов научно-практического семинара «Проблемы ПВО (ВКО) перспективных надводных кораблей»*. – СПб., 2022.
7. *Образцов И.В.* Перспективы разработки и внедрения интеллектуальной поддержки принятия решений по борьбе за живучесть кораблей ВМФ // *Сб. материалов по итогу научно-технического семинара «Информационная поддержка процессов эксплуатации комплексов военного назначения» ЯВВУ ПВО*. – Ярославль, 2023.

8. Semantic Sensor Network Ontology. W3C Recommendation 19 October 2017. – <https://www.w3.org/TR/vocab-ssn/>.
9. SSN ontology. – <http://www.w3.org/ns/ssn/>.
10. Руководство по обеспечению живучести надводных кораблей. – М.: Воениздат, 2017.
11. Руководство по обеспечению живучести подводных кораблей (РОЖ ПЛ-2017).
12. Руководство по обеспечению живучести ремонтируемого корабля (РОЖ РК-2017).
13. Правила и программы подготовки подводных лодок ВМФ (ПБЖ ПЛ-2018).
14. Корабельный устав ВМФ (КУ ВМФ-2021).
15. Требования ВМФ к системам информационной поддержки по борьбе за живучесть подводной лодки. Д-5539. – СПб.: НИИ кораблестроения и вооружения ВМФ, 2013.
16. *Никитин Е.В.* Некоторые проблемы обеспечения живучести кораблей и судов ВМФ // Военная мысль. – 2016.
17. *Kwiecińska B.* Cause-and-effect analysis of ship fires using relations diagrams // Scientific Journals Zeszyty Naukowe of the Maritime University of Szczecin. – 44 (116). – P. 187-191.
18. *Пантелеев М.Г., Лебедев С.В.* Онтологическое проектирование подсистемы оценки обстановки интеллектуальных агентов // Онтология проектирования. – 2016. – Т. 6, № 3(21). – С. 297-316.
19. *Lebedev S., Panteleyev M.* Ontology-Driven Situation Assessment System Design and Development in IoT Domains // International Journal of Embedded and Real-Time Communication Systems (IJERTCS). – 2017. – Vol. 8, No. 1. – P. 1-17.
20. *Panteleyev M.G., Lebedev S.V.* Ontology-Driven Design and Development of Situation Assessment Software in Cyber-Physical Systems // In «Tools and Technologies for the Development of Cyber-Physical Systems». – IGI Global, 2020. – P. 51-76.

#### REFERENCES

1. *Polenin V.I., Sukhachev Yu.A.* Setevaya sistema informatsionnoy avtomatizirovannoy podderzhki upravleniem bor'boy za zhivuchest' morskogo sudna [Network system of information automated support for the management of the struggle for the survivability of a marine vessel], *Morskaya radioelektronika* [Marine Radio Electronics], 2016, No. 3 (64).
2. *Polenin V.I., Kivaev N.M., Sukhachev Yu.A.* Sozdanie integrirovannykh sistem boevogo upravleniya – vysshaya stadiya kompleksirovaniya [Creation of integrated combat control systems is the highest stage of integration], *Morskaya radioelektronika* [Marine Radio Electronics], 2014, No. 2 (48), pp. 44-49.
3. *Mozhaev A.S., Polenin V.I.* Setevoe planirovanie i upravlenie – perspektivnyy put' sozdaniya integrirovannykh sistem boevogo upravleniya [Network planning and management – a promising way to create integrated combat control systems], *Sb. trudov 12-y Mezhdunarodnoy nauchnoy shkoly "Modelirovanie i analiz bezopasnosti i riska v slozhnykh sistemakh"* [Proceedings of the 12th International Scientific School "Modeling and analysis of security and risks in complex systems"]. Saint Petersburg, 2014;
4. *Obraztsov I.V., Petrov S.A., Kulit' V.F., Pakhomov E.S. i dr.* Promezhutochnyy otchet o nauchno-issledovatel'skoy rabote «Poisk i issledovanie metodov i tekhnologiy iskusstvennogo intellekta dlya primeneniya v sistemakh obespecheniya pozharnoy bezopasnosti korabley» (shifr «Triumf-25»). 1 etap, VI DPO VUNTS VMF «Voенно-morskaya akademiya». UDK 623.8/9 [Interim report on the research work "Search and research of artificial intelligence methods and technologies for use in ship fire safety systems" (code "Triumph-25"). Stage 1, VI DPO VUNTS of the Navy "Naval Academy". UDC 623.8/9]. Saint Petersburg, 2023.
5. *Obraztsov I.V.* Primenenie tekhnologiy iskusstvennogo intellekta v sistemakh obespecheniya pozharnoy bezopasnosti korabley VMF [Application of artificial intelligence technologies in fire safety systems for Navy ships], *Sb. statey po re ul'tatu kruglogo stola na temu: «Teoriya i praktika primeneniya iskusstvennogo intellekta v voennoy sfere» MVTF «Armiya-2022»* [A collection of articles on the results of the round table on the topic: "Theory and practice of the use of artificial intelligence in the military sphere" MVTF "Army-2022"]. Serpukhov, 2022.
6. *Obraztsov I.V.* Prognozirovanie korabel'nykh pozharoопасnykh situatsiy s ispol'zovaniem iskusstvennoy neyronnoy seti [Forecasting of shipboard fire-hazardous situations using an artificial neural network], *Sb. materialov nauchno-prakticheskogo seminara «Problemy PVO (VKO) perspektivnykh nadvodnykh korabley»* [Collection of materials of the scientific and practical seminar "Problems of air defense (East Kazakhstan region) of promising surface ships"]. Saint Petersburg, 2022.

7. *Obraztsov I.V.* Perspektivy razrabotki i vnedreniya intellektual'noy podderzhki prinyatiya resheniy po bor'be za zhivuchest' korably VMF [Prospects for the development and implementation of intellectual decision-making support for the fight for the survivability of Navy ships], *Sb. materialov po itogu nauchno-tehnicheskogo seminara «Informatsionnaya podder hka protsessov ekspluatatsii kompleksov voennogo na nacheniya» YaVVU PVO* [Collection of materials on the results of the scientific and technical seminar "Information support for the operation of military complexes" YaVVU Air Defense]. Yaroslavl', 2023.
8. Semantic Sensor Network Ontology. W3C Recommendation 19 October 2017. Available at: <https://www.w3.org/TR/vocab-ssn/>.
9. SSN ontology. Available at: <http://www.w3.org/ns/ssn/>.
10. Rukovodstvo po obespecheniyu zhivuchesti nadvodnykh korably [Guidelines for ensuring the survivability of surface ships]. Moscow: Voenizdat, 2017.
11. Rukovodstvo po obespechenii zhivuchesti podvodnykh korably (ROZH PL-2017) [Guidelines for ensuring the survivability of submarines (ROJ PL-2017)].
12. Rukovodstvo po obespecheniyu zhivuchesti remontiruemogo korablya (ROZH RK-2017) [Guidelines for ensuring the survivability of the repaired ship (ROJ RK-2017)].
13. Pravila i programmy podgotovki podvodnykh lodok VMF (PBZH PL-2018) [Rules and training programs for Navy submarines (PBJ PL-2018)].
14. Korabel'nyy ustav VMF (KU VMF-2021) [Naval Ship Charter (Navy Code-2021)].
15. Trebovaniya VMF k sistemam informatsionnoy podderzhki po bor'be za zhivuchest' podvodnoy lodki. D-5539 [Requirements of the Navy for information support systems to combat the survivability of a submarine. D-5539]. Saint Petersburg: NII korablestroeniya i vooruzheniya VMF, 2013.
16. *Nikitin E.V.* Nekotorye problemy obespecheniya zhivuchesti korably i sudov VMF [Some problems of ensuring the survivability of ships and vessels of the Navy], *Voennaya mysl'* [Military Thought], 2016.
17. *Kwiecińska B.* Cause-and-effect analysis of ship fires using relations diagrams, *Scientific Journals Zeszyty Naukowe of the Maritime University of Szczecin*, 44 (116), pp. 187-191.
18. *Panteleev M.G., Lebedev S.V.* Ontologicheskoe proektirovanie podsistemy otsenki obstanovki intellektual'nykh agentov [Ontology-Driven Approach to Design of Situation Awareness Subsystem of Intelligent Agents], *Ontologiya proektirovaniya* [Ontology of Designing], 2016, Vol. 6, No. 3 (21), pp. 297-316.
19. *Lebedev S., Panteleyev M.* Ontology-Driven Situation Assessment System Design and Development in IoT Domains, *International Journal of Embedded and Real-Time Communication Systems (IJERTCS)*, 2017, Vol. 8, No. 1, pp. 1-17.
20. *Panteleyev M.G., Lebedev S.V.* Ontology-Driven Design and Development of Situation Assessment Software in Cyber-Physical Systems, In *«Tools and Technologies for the Development of Cyber-Physical Systems»*. IGI Global, 2020, pp. 51-76.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор С.А. Петров.

**Образцов Иван Викторович** – ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия»; e-mail: lion-jan@ya.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: 89119293044; к.т.н.; докторант.

**Пантелеев Михаил Георгиевич** – Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»; e-mail: panteleev.mihail@nicetu.spb.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: 89213128928; к.т.н.; доцент; преподаватель кафедры вычислительной техники.

**Obraztsov Ivan Viktorovich** – VUNC Navy "Naval Academy"; e-mail: lion-jan@ya.ru; St. Petersburg,, Russia; phone: +79119293044; cand. of eng. sc.; doctoral student.

**Panteleev Mikhail Georgievich** – St. Petersburg State Electrotechnical University "LETI"; e-mail: panteleev.mihail@nicetu.spb.ru; St. Petersburg, Russia; phone: +79213128928; cand. of eng. sc.; associate professor; lecturer of the department of computer engineering.