



Онтологическая модель процесса планирования работ на производственных предприятиях в мультиагентной системе поддержки принятия решений

© 2026, Е.В. Ляпунцева, В.Б. Чечнев ✉

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет) (МГТУ им. Н.Э. Баумана), Москва, Россия

Аннотация

Представлена онтологическая модель процесса планирования работ на производственных предприятиях, интегрированная в мультиагентную систему поддержки принятия решений на основе модульного подхода. В мультиагентной системе используется коалиционно-холоническая архитектура, представляющая собой многоуровневую структуру агентов, объединяемых в статические холоны, управляемые супервизорами, для реализации повторяющихся задач и временные коалиции, управляемые агентами-координаторами, с целью решения сложных задач. Онтология является общим семантическим пространством и источником знаний для агентов, обеспечивая когнитивную согласованность их действий, а также средством координации холонов и коалиций. Взаимодействие с онтологией реализуют специализированные агенты. Настройка приоритетов критериев осуществляется через весовые коэффициенты, что повышает адаптивность и управляемость системы. Снижение когнитивной нагрузки на лиц, принимающих решения, достигается за счёт онтологического отсека несогласованных альтернатив и предустановленных правил. Особенно выражены данные эффекты при увеличении дефицита ресурсов и жёсткости ограничений к создаваемому плану. Результаты апробации системы позволяют сделать вывод о возможном уменьшении времени планирования, увеличении равномерности распределения нагрузки производственного персонала и повышении точности соблюдения бюджетных ограничений при планировании работ. Практическая значимость заключается в ускорении подготовки и повышении точности планов производственных работ, уменьшении когнитивной нагрузки на лицо, принимающего решения, при планировании работ сотрудников малых и средних производственных предприятий.

Ключевые слова: онтологическая модель, мультиагентная система, поддержка принятия решений, когнитивная система, планирование работ.

Цитирование: Ляпунцева Е.В., Чечнев В.Б. Онтологическая модель процесса планирования работ на производственных предприятиях в мультиагентной системе поддержки принятия решений. *Онтология проектирования*. 2026. Т.16, №1(59). С.139-151. DOI: 10.18287/2223-9537-2026-16-1-139-151.

Вклад авторов: Ляпунцева Е.В. – постановка задачи, анализ результатов; Чечнев В.Б. – разработка онтологической модели, проведение эксперимента.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение

В условиях изменяющейся информационной среды, дефицита времени, наличия множества критериев эффективности и высокой степени неопределённости исходных данных задачи планирования работ (ПР) на производственных предприятиях (ПП) представляют собой сложный интеллектуальный процесс. Следствием является высокая когнитивная нагрузка лиц, принимающих решения (ЛПР) [1]. Системы поддержки принятия решений (СППР), основанные на детерминированных критериях, жёстких алгоритмах и статических моделях, недостаточно учитывают специфику когнитивных процессов ЛПР. Существует потребность в СППР, способных адаптироваться к изменениям среды и понижать когнитивную нагрузку

на ЛПР. Применение онтологий позволяет формализовать знания о предметной области (ПрО), повысить гибкость и адаптивность управления, снизить когнитивную нагрузку на ЛПР, в т.ч. из-за схожести с ментальными моделями деятельности человека [2-4].

Целью данного исследования является разработка онтологической модели (ОМ) процесса ПР на ПП в мультиагентной системе (МАС), обеспечивающей поддержку решений с учётом сложности многокритериальных задач.

1 Формализация задачи планирования работ

В работе рассматривается ПП, выполняющее множество проектов (контрактов) $C = \{C_1, C_2, \dots, C_p\}$ в определённом плановом периоде, делящемся на месяцы и представляющем собой множество $T = \{T_1, T_2, \dots, T_c\}$. Каждый контракт C_i – это выпуск одного или нескольких конечных продуктов или оказания услуг. В данной задаче принято, что результаты деятельности ПП представляются множеством продуктов $P = \{P_1, P_2, \dots, P_d\}$. Для каждого продукта P_j существует множество операций $O_{ij} = \{O_{ij1}, O_{ij2}, \dots, O_{ij\sigma}\}$. Каждая операция O_{ijk} характеризуется трудоёмкостью L_{ijk} – объёмом трудовых затрат (нормо-часов), необходимых для её выполнения. Набор операций может иметь технологические или логические отношения предшествования, при которых $O_a < O_b$ означает необходимость завершить операцию O_a до начала O_b . Для выполнения операций O_{ijk} имеется множество ресурсов $R = \{R_1, R_2, \dots, R_y\}$. Ресурсом в данном случае является рабочее время отдельных работников определённой квалификации, участвующих в выполнении данной операции O_{ijk} . Каждый ресурс R_n обладает календарём доступности: в каждый дискретный период планирования T ресурс R_n может быть использован в размере y'_{nt} не более заранее задаваемого объёма норма-часов y_{nt} . При этом каждый y_{nt} обладает заранее задаваемой стоимостью S_{nt} .

Решение задачи планирования заключается в определении:

- распределения ресурсов R по всем требуемым операциям O ;
- временного расписания выполнения операций на задаваемом горизонте планирования.

В условиях дискретного времени решение может быть представлено как набор бинарных переменных:

$$x_{ijk}^{(n,t)} = \begin{cases} 1, & \text{если операция } O_{ijk} \text{ начинается в период } t \text{ на ресурсе } R_n, \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases}$$

Решение должно удовлетворять следующим ограничениям:

- суммарные выделенные ресурсы на каждую операцию O_{ijk} должны быть равны трудоёмкости L_{ijk} ;
- для любого ресурса R_n в каждом периоде T_t суммарная нагрузка от всех назначенных операций не превосходит доступного R_i ;
- соблюдение отношения предшествования;
- соблюдение заданных требований по периоду начала и окончания выполнения операций;
- суммарная стоимость всех используемых ресурсов R должна находиться в рамках задаваемых границ бюджета: $B_{min_{ijk}} \leq \sum_{n \in R} \sum_{t \in T} (S_{nt} y'_{nt}) \leq B_{max_{ijk}}$.

В рассматриваемых условиях ПР можно сформулировать следующие критерии оптимальности f :

- для каждой C_i :

$$f_i' - \text{минимизация отклонения от целевого бюджета контракта } B_{target_i} = \frac{B_{min_i} + B_{max_i}}{2},$$

$$f_i'' - \text{максимизация выполнения контракта внутри целевого периода выполнения } T_{TARGET_i};$$

$$f_i''' - \text{максимизация равномерности распределения нагрузки между } R;$$

- для каждого P_{ij} :

f'_{ij} – минимизация отклонения от целевого бюджета продукта $B_{target_{ij}} = \frac{B_{min_{ij}} + B_{max_{ij}}}{2}$;

f''_{ij} – максимизация выполнения продукта внутри целевого периода выполнения $T_{TARGET_{ij}}$;

f'''_{ij} – максимизация равномерности распределения нагрузки между R ;

- для каждого O_{ijk} :

f'_{ijk} – минимизация отклонения от целевого бюджета операции $B_{target_{ijk}} = \frac{B_{min_{ijk}} + B_{max_{ijk}}}{2}$;

f''_{ijk} – максимизация выполнения операций внутри целевого периода выполнения $T_{TARGET_{ijk}}$;

f'''_{ijk} – максимизация равномерности распределения нагрузки между R .

В зависимости от выбранного метода многокритериальная задача может иметь разную целевую функцию. Например, используя метод линейной свёртки критериев, можно получить функцию: $F = \max(\sum_{i=1}^p W_b f'_i + \sum_{i=1}^p W_t f''_i + \sum_{i=1}^p W_c f'''_i)$, где W_b – вес критерия соответствия целевому бюджету, W_t – вес критерия соответствия целевому периоду, W_c – вес критерия равномерности распределения нагрузки.

В общей схеме процесса ПР действия ЛПР и мультиагентной СППР можно разделить на следующие категории (см. рисунок 1), совершаемые: при первичном запуске или при каждом расчёте; ежемесячно или по мере необходимости.

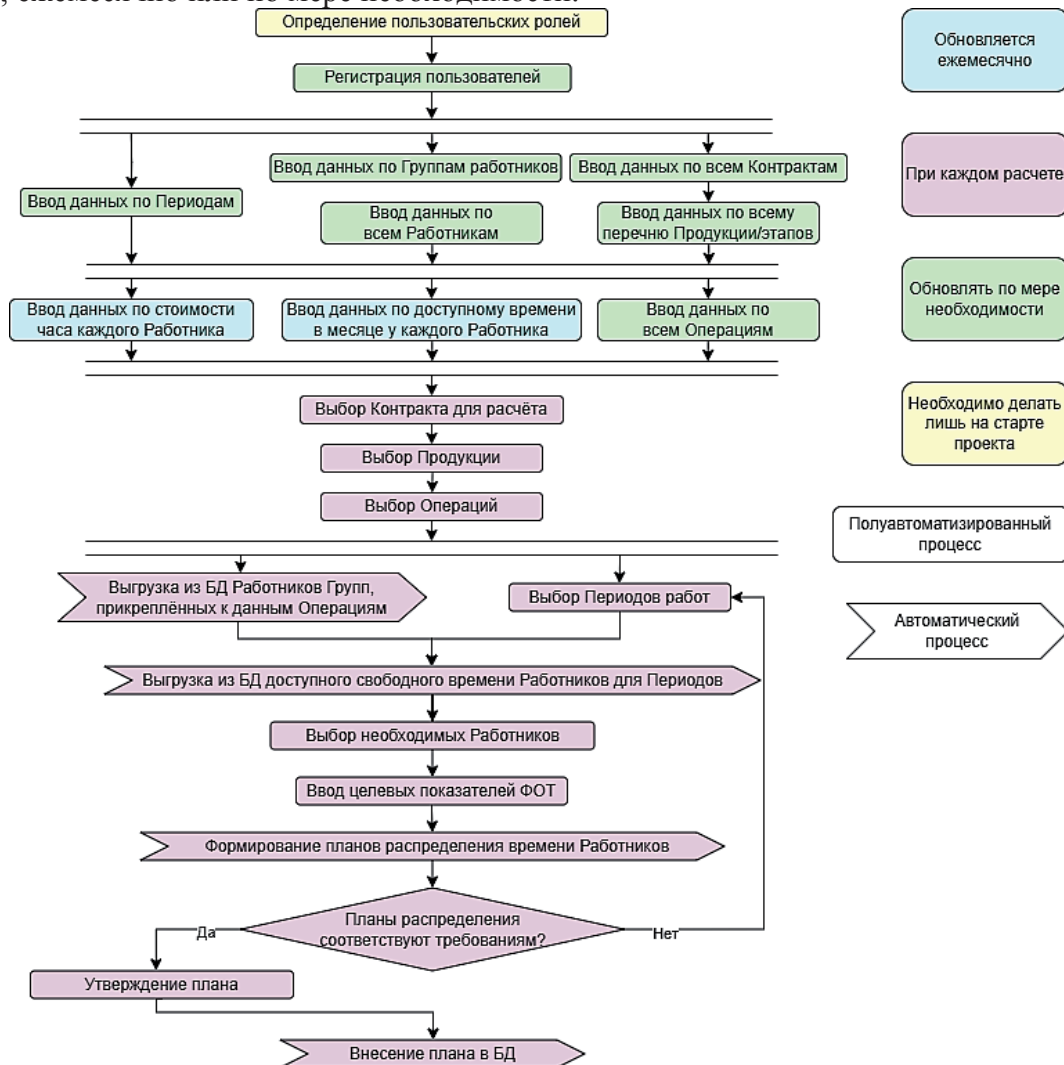


Рисунок 1 – Алгоритм работы лица, принимающего решение, в мультиагентной СППР

Эти категории действий образуют сквозную цепочку: результаты действий, выполняемых при первичном запуске, становятся входными данными для ежемесячных процедур, а отклики на события «по мере необходимости» вызывают перерасчёты, выполняемые системой при каждом прохождении алгоритма.

IDEF0-диаграмма (см. рисунок 2) переносит эту цепочку в терминологию «Input – Control – Output – Mechanism», демонстрируя действия ЛПП, точки передачи данных и механизмы управления на каждом этапе работы.

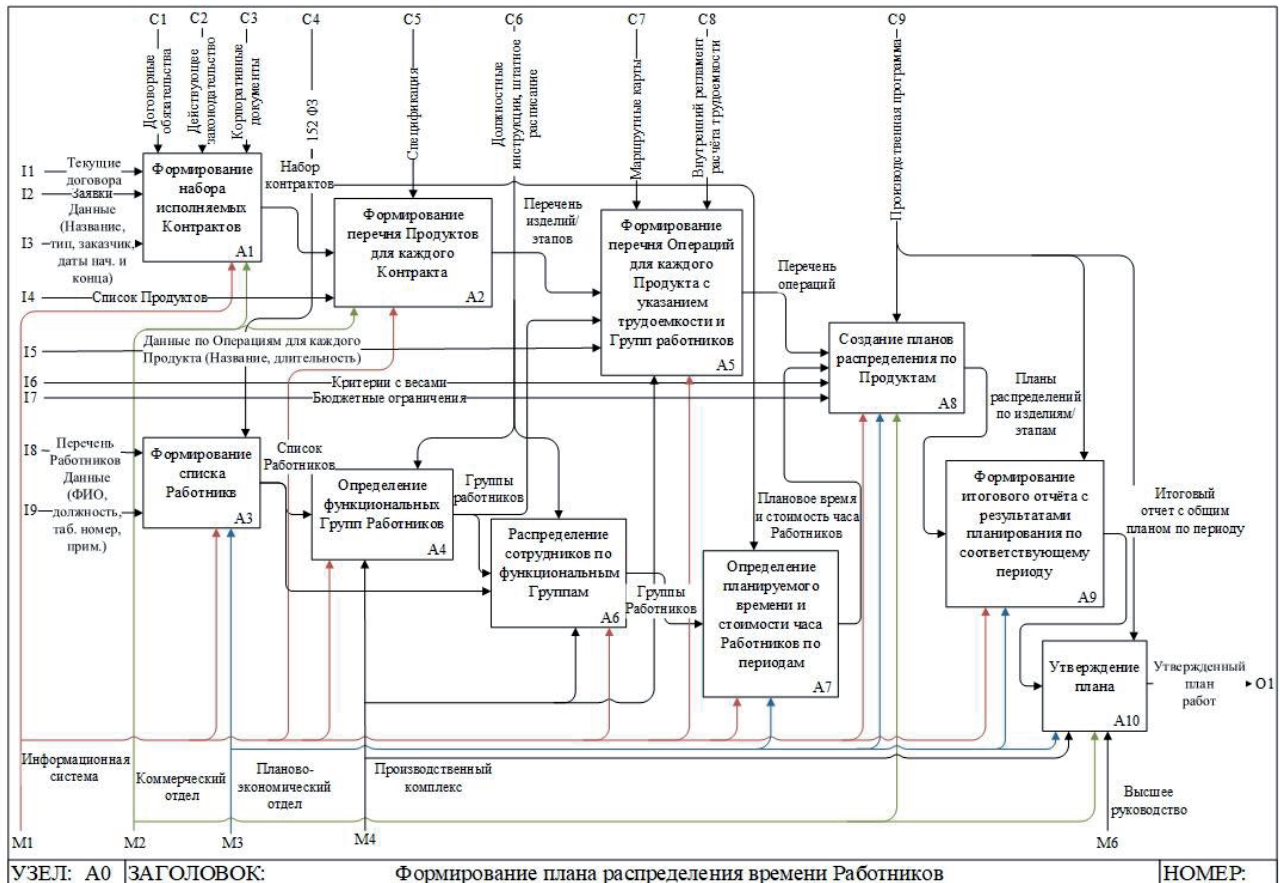


Рисунок 2 – Схема процесса планирования работ с помощью мультиагентной СППР

Задача ПР относится к слабоструктурированным и трудноформализуемым. Когнитивная сложность в данном контексте проявляется в необходимости восприятия большого объема информации о производственном процессе, понимания взаимосвязей, в прогнозировании последствий решений и оперативном перестроении плана при вносимых изменениях. Когнитивная сложность задачи ПР характеризуется следующими метриками:

- перцептивная нагрузка – объем и гетерогенность информации, актуальной для ЛПП, формально оцениваемые по подграфу ОМ, релевантному текущему контексту выбора: $k_{perc} = |V_s| + |E_s|$, где V_s, E_s – множества вершин и ребер подграфа;
- нагрузка памяти – число одновременно активных ограничений и правил, влияющих на решение: $k_{wm} = \sum_{r \in L} w_r$, где L – множество ограничений, w_r – «когнитивный вес» ограничения;
- комбинаторная сложность выбора – мощность множества альтернатив A и их неопределённость: $k_{comb} = |A|$.

С целью повышения прозрачности процесса принятия решения и повышения уровня когнитивной поддержки ЛПП, предлагаемое решение должно предоставлять ЛПП:

- ОМ всех сущностей и взаимоотношений ПрО;
- возможность воздействия на получаемые решения, например, с помощью выбора критериев и весов для них;
- возможность осуществлять выбор среди нескольких альтернативных вариантов;
- возможность динамической адаптации параметров расчёта, влияющих на получаемые планы работ, исходя из контекста каждой рассматриваемой задачи;
- объяснение получаемых решений.

2 Онтологическая модель процесса планирования

Онтология в контексте информационных систем определяется как формальное описание ПрО в понятной для всех участников процесса форме [5]. Внесённые уточнения [6, 7] определяют онтологию как:

- формальную модель ПрО (множество классов и отношений);
- аксиомы и правила, обеспечивающие возможность контроля целостности знаний;
- однозначно интерпретируемый всеми пользователями и системными компонентами словарь, представленный в виде помеченного графа, отражающего логические связи между элементами.

Онтология обеспечивает повторное использование знаний, позволяя разработать обобщённую структуру и специализировать её под разные ПрО. Так, в работах [8, 9] рассматривается использование онтологий для формализации знаний о производственных процессах в МАС. Такая онтология является примером обобщённой структуры, что позволяет на её основе сформировать конкретную модель с учётом особенности задачи. Наличие формальной структуры знаний облегчает идентификацию ключевых параметров и взаимосвязей между ними, помогая ЛПР принимать решения быстрее и с меньшими усилиями [10].

В данной работе используется редактор онтологий *Protégé*¹. Среди основных сущностей онтологии ПР можно выделить следующие классы (см. рисунок 3): Контракт, Продукт, Операция, Ресурс, Группа работников, Работник, Тариф работника, Период, План.

Приведённые классы образуют иерархическую структуру:

Контракт включает один или несколько Продуктов, каждый Продукт выполняется множеством Операций, а каждая Операция потребляет определённые Ресурсы, которые представляют собой Работников, объединённых в Группы по принципу возможности их взаимозаменяемости в рамках определённых Операций.

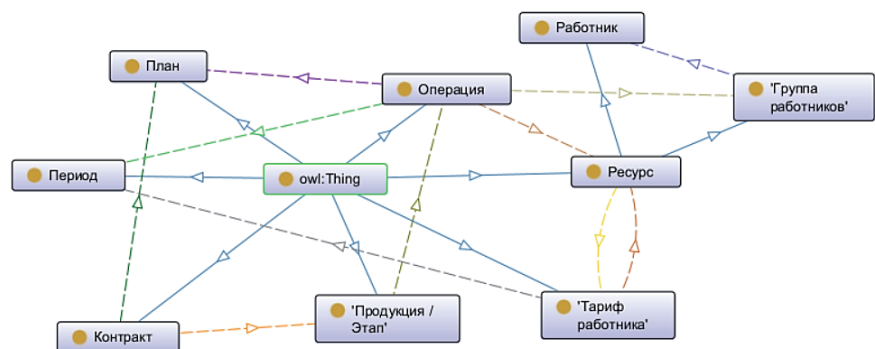


Рисунок 3 – Диаграмма классов для задачи планирования работ

Для каждого класса формируется набор атрибутов, хранящих характеристики экземпляров, и указываются связи-отношения между выявленными основными сущностями онтологии (см. рисунок 4).

Новизна предлагаемой ОМ заключается в выделении специальных классов и атрибутов, отражающих когнитивные требования ЛПР на ПП. В отличие от существующих решений предложенная ОМ может включать параметры, связанные с когнитивной нагрузкой и удоб-

¹ *Protégé* – свободный, открытый редактор онтологий и фреймворк для построения баз знаний. <https://protege.stanford.edu/>.

ством восприятия информации, например, параметры выбора критериев и весов критериев, наличие альтернативных решений.

ОМ, представленная таким образом, носит когнитивный характер – она близка к тому, как ЛПР описывало бы процесс ПР с использованием ПрО, выражая набор своих суждений о ней терминами данной онтологии. Эксперт может пополнять онтологию новыми сущностями, отношениями и атрибутами, а система может объяснять решения, опираясь на понятия из модели. Пользователь может взаимодействовать с системой через интерфейс, оперирующий заложенными онтологическими понятиями.

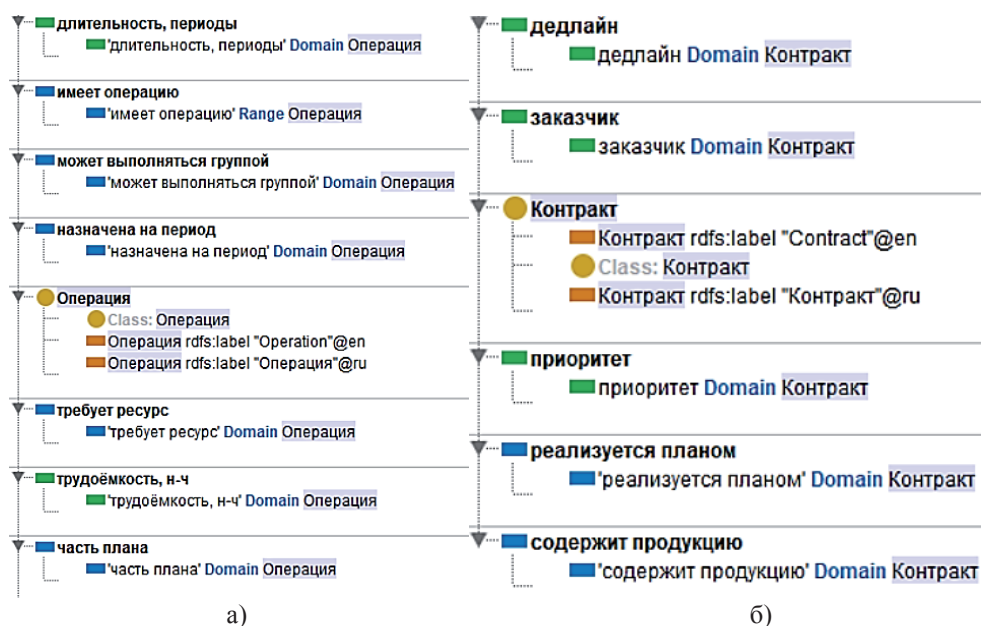


Рисунок 4 – Примеры отношений между классами и атрибуты для класса: (а) «Операция» и (б) «Контракт»

3 Интеграция онтологии с мультиагентной системой

Онтология участвует в работе МАС, обеспечивая когнитивную согласованность действий агентов, оперирующих понятиями, определёнными в ней и использующих её как общий источник знаний о ПрО.

Среди подходов к интеграции онтологии в МАС можно выделить следующие.

- Онтология в виде централизованной базы знаний, доступной всем агентам [8] (в таком случае выделяется специализированный агент, отвечающий за взаимодействие с онтологией: хранение экземпляров классов, выполнение запросов и внесение изменений).
- Трёхуровневая система, включающая следующие слои (такая концепция устраняет информационную разрозненность путём приведения данных к единому онтологическому виду):
 - онтологический слой (общая информационная модель, обеспечивающая согласованное хранилище данных о продукте и процессах);
 - слой взаимодействия агентов (коммуникационный центр, через который модули обмениваются данными на основе онтологии);
 - слой имитационных агентов (набор программных агентов, моделирующих поведение рассматриваемых логистических субъектов) [11].
- Модульный подход, основанный на специализации каждого агента под этапы процесса ПР, в котором онтологии представляют семантическое поле для всех агентов, обеспечивая совместимость гетерогенных знаний [12] (создание базовой онтологии с потенциальным расширением на новые ПрО, что позволяет уменьшить трудоёмкость и сроки разработки подобных систем [13]).
- Подход с использованием онтологии для оценки «аргументов» и согласования действий агентов, подкрепляющий результаты работы агентов формальными доказательствами, заложенными в онтологию [14].

Условия данной задачи релевантны модульному подходу с потенциальным расширением. Модульная архитектура позволяет не перегружать информацией каждого агента в МАС, что упрощает разработку и тестирование, а также увеличивает скорость её работы. При этом оставляя возможность перейти от текущего пакетного планирования по каждой отдельно взятой Операции к более гибкому и масштабируемому подходу, позволяющему минимизировать потери при перепланировании [15].

Концептуальная схема отображения основных классов разработанной онтологии на типы программных агентов заключается в следующем: каждому ключевому объекту планирования соответствует программный агент, наделённый определёнными целями и поведением. Онтология служит общим информационным пространством для агентов: все агенты оперируют одними понятиями и информацией, получаемой из онтологической базы знаний в соответствии со своей специализацией [16].

Исходя из данной схемы и параметров задачи ПР, предлагается использовать многоуровневую коалиционно-холоническую агентную архитектуру. Каждый холон представляет собой автономную группу агентов, которые могут использовать специализированные части общей онтологии для решения своих задач, координируясь общим агентом-супервизором, который отвечает за взаимодействие холона с другими холонами и коалициями. Такая структура позволяет раскрыть основные преимущества МАС:

- *распределённые вычисления* – агенты могут создавать краткосрочные группы (коалиции) с целью решения сложных задач, используя параллельные вычисления несколькими агентами одновременно;

- *масштабируемость* – выстраиваемая иерархия вложенности холонов даёт возможность верхнеуровневым холонам, например холонам агентов «Контракт», группировать и управлять количеством и работой холонов агентов «Продукт». Такая иерархия позволяет наращивать вычислительную мощность программы, увеличивая параллельность вычислений путём добавления новых низкоуровневых холонов, решающих локальные задачи, а также добавлять новые сущности в рамках существующей конфигурации холонов без полного пересмотра всего алгоритма работы.

Схема интеграции онтологии с МАС представлена на рисунке 5: ОМ; холоны, управляющиеся агентами-координаторами; коалиция агентов, создаваемая агентом-супервизором, и их взаимосвязь посредством общей онтологии знаний, с которой взаимодействуют специальные API-агенты, отвечающие за работу с отдельными частями онтологии, согласно их специализации.

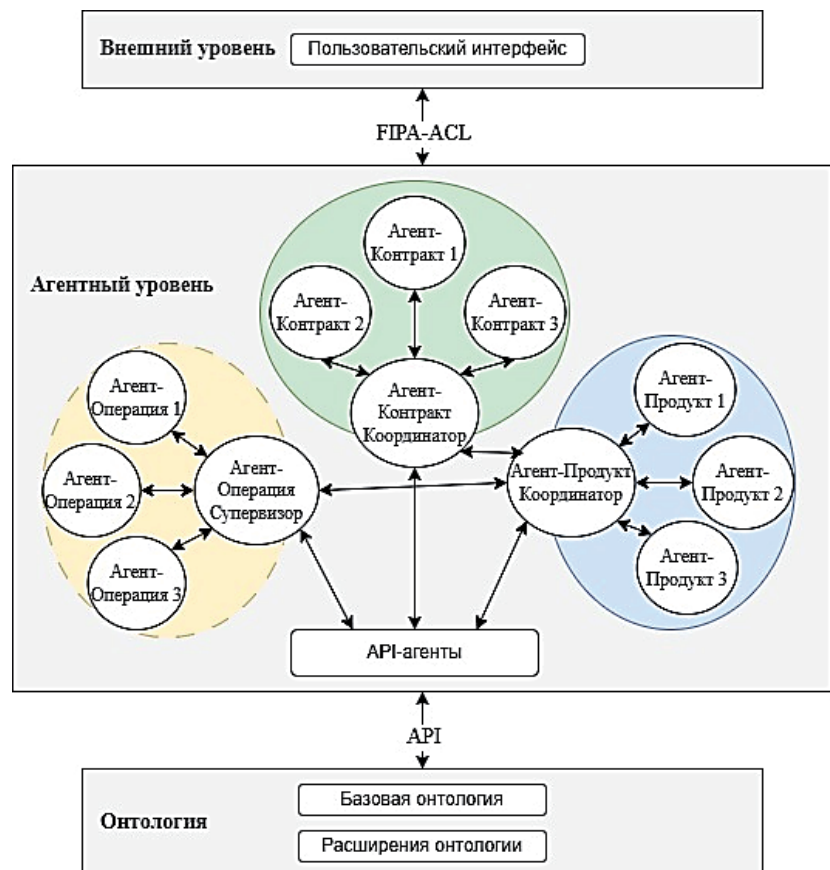


Рисунок 5 – Схема интеграции онтологии с мультиагентной системой

4 Апробация модели

Апробация ОМ в МАС выполнялась путём сопоставления двух вариантов процесса ПР:

- базового, в котором ЛПП разрабатывает план, используя справочники и последовательный просмотр ограничений без семантического отсека несогласованных решений;
- интеграционного, в котором МАС с ОМ создают единое семантическое пространство ПрО, осуществляется фильтрация альтернатив и предоставляется возможность управления ограничениями с помощью весовых коэффициентов W_b , W_t и W_c .

Для обоих вариантов применялись одинаковые наборы тестовых исходных данных и сценарии изменений. Исходные данные разделены на две типовые категории по их мощности: малые и средние (см. таблицу 1).

Таблица 1 – Основные параметры тестовых данных

Набор данных	Количество Операций	Число Работников	Количество Периодов	Отношение длительности Операций к доступному времени Работников, %
Средний А	25	22	6	21
Средний Б	25	22	9	9
Малый А	12	12	3	37
Малый Б	12	12	3	49

В эксперименте принимали участие специалисты, выполняющие ПР в рамках своей профессиональной деятельности на предприятии оборонно-промышленного комплекса. Каждый участник проводил оба варианта планирования со случайным порядком режима выполнения задач. Предоставлялась тренировочная сессия для ознакомления с интерфейсом, а для исключения влияния накопительного утомления между сессиями предусматривались перерывы. После завершения каждого варианта планирования фиксировались значения следующих показателей эффективности получаемого решения (см. таблицу 2):

- время подготовки плана T_{plan} (минут) – затрачиваемое время на формирование плана при заранее подготовленных исходных данных;
- критерии оптимальности плана: f' , f'' и f''' ;
- количество перегрузок Работников N_{over} – среднее арифметическое от количества перегрузок Работников в данном режиме у всех участников.

Таблица 2 – Полученные показатели эффективности двух вариантов процесса планирования работ

Набор данных	Метод	T_{plan} , минут	f' , %	f'' , %	f''' , %	N_{over}
Средний А	Базовый	91	2,1	100	94,3	0,4
	МАС с ОМ	3	0,9	100	97,6	0
Средний Б	Базовый	82	3,5	100	93,1	0
	МАС с ОМ	3	1	100	96,9	0
Малый А	Базовый	30	1,2	100	94,3	0
	МАС с ОМ	2	0,3	100	98,1	0
Малый Б	Базовый	55	1,9	100	82,8	1,2
	МАС с ОМ	2	1,4	100	93,6	0

По представленным в таблице 2 результатам можно сделать следующие выводы:

- наибольший эффект от использования МАС с ОМ виден на времени подготовки плана;
- несмотря на близкие к минимальным значениям базовые показатели f' , все сценарии МАС с ОМ продемонстрировали заметную положительную динамику;
- критерий соответствия срокам во всех сценариях достиг максимального значения в связи с тем, что все ЛПП ориентировались в первую очередь на него;
- показатель равномерности распределения стабилен в условиях разброса времени доступности работников;

- небольшое количество перегрузок, встречавшееся в базовых сценариях, в варианте МАС с ОМ сведено до нуля за счёт встроенных в ОМ ограничений на наличие перегрузок.

Помимо технической эффективности, в задаче снижения когнитивной нагрузки необходимо учитывать и оценку влияния МАС непосредственно на ЛПР. Для этого использовался метод субъективной оценки рабочей нагрузки *NASA TLX*, включающий набор шкал, по которым пользователь оценивает умственную и физическую нагрузки, нехватку времени, качество выполнения задачи, сложность и уровень стресса [17]. Данный метод показал достаточную достоверность в исследованиях когнитивной нагрузки в сравнении с более глубокими тестами [18-20]. В данном тестировании использовалась его сокращённая версия *RAW-TLX* без физической нагрузки, где каждому из пяти факторов соответствовала десятибалльная шкала от «очень низкий» (1) до «очень высокий» (10) (кроме качества выполнения задачи, которое оценивается инвертированной шкалой), а итоговый индекс рассчитывался как среднее арифметическое всех параметров [21]. Опросник заполнялся участниками сразу после выполнения задания в каждом из режимов (см. рисунки 6 и 7).

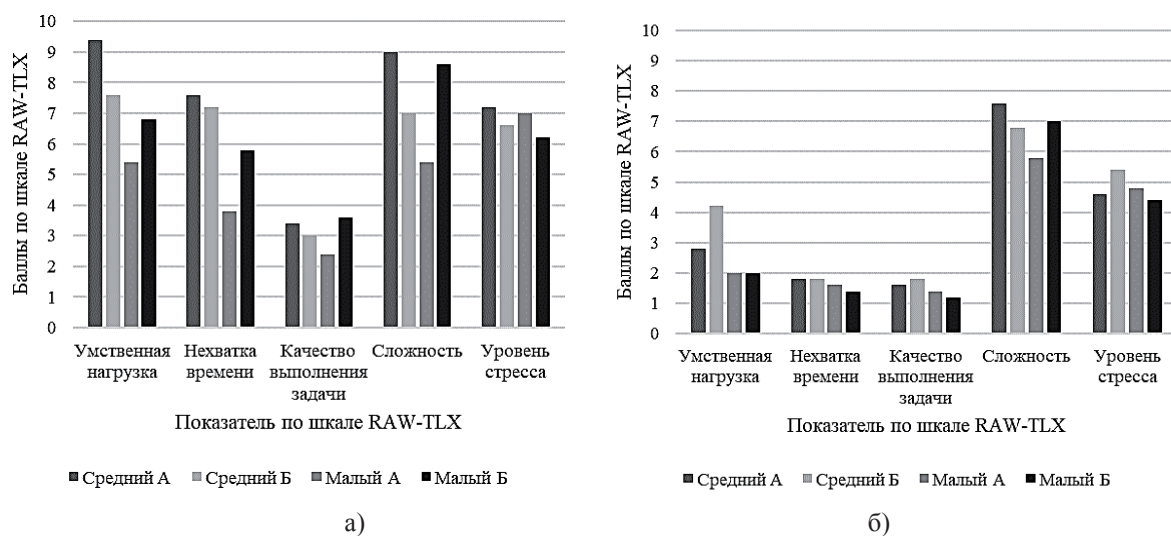


Рисунок 6 – Результаты субъективной оценки методом *RAW-TLX*: (а) базовый вариант и (б) МАС с ОМ

Можно отметить, что на сценариях с высокой дефицитностью ресурсов и более жёсткими ограничениями по Периодам преимущество МАС возрастало, что объясняется онтологическим отсечением несогласованных альтернатив, снижающим объём рассматриваемых альтернатив и число итераций. Данный эффект позволяет снизить k_{perc} и k_{comb} . Этот эффект проявляется и при увеличении объёма входных данных, помогая преодолеть комбинаторный рост числа вариантов, характерный для централизованных алгоритмов управления [16]. При этом k_{wm} снижается за счёт установленных по умолчанию правил разработанной ОМ, так как ЛПР освобождается от необходимости удерживания в своей памяти данных правил и может сосредоточиться на более важных элементах принятия решений.

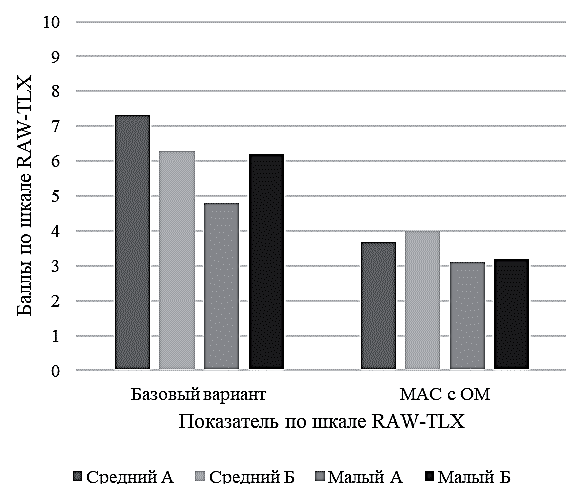


Рисунок 7 – Интегральный показатель субъективной оценки рабочей нагрузки методом *RAW-TLX*

Таким образом, можно отметить, что ОМ процесса ПР в сочетании с МАС позволила уменьшить комбинаторную сложность выбора, перцептивную нагрузку и нагрузку памяти ЛПР, при этом повысив основные метрики эффективности решения в сравнении с базовым вариантом процесса ПР.

Заключение

Разработана оригинальная ОМ процесса ПР на ПП, интегрированная в мультиагентную СППР и учитывающая когнитивную нагрузку на ЛПР.

Формализация процесса многокритериального ПР позволила определить требования к разрабатываемой СППР, а предложенная ОМ послужила единым информационным пространством, описывающим ключевые сущности и их взаимосвязи. Модульный подход, основанный на фрагментации онтологии в зависимости от специализации агентов, позволяет расширять данную модель и облегчить разработку СППР.

Разработанная модель отличается от существующих аналогов более глубоким учётом когнитивных аспектов ПР и адаптивностью. Показана возможность интеграции онтологии с коалиционно-холонической архитектурой МАС.

Практическая значимость полученных результатов подтверждается возможностью применения модели на ПП и успешно прошла апробацию в оборонно-промышленном комплексе при составлении расписаний работ сотрудников.

ОМ процесса ПР в сочетании с мультиагентной СППР позволяет эффективно решать задачи разработки оптимальных планов в динамических условиях с учётом нескольких критериев.

Список источников

- [1] *Karakikes M., Nathanael D.* The effect of cognitive workload on decision authority assignment in human–robot collaboration. *Cognition, Technology & Work*. 2023. Vol. 25. P.31-43. DOI:10.1007/s10111-022-00719-x.
- [2] *Манаськин А.В., Брунилин А.А., Саенко И.Б.* Онтологический подход к созданию систем поддержки принятия решений. *Технические науки – от теории к практике*. 2016. № 11. С.28-32.
- [3] *Скобелев П.О.* Ситуационное управление и мультиагентные технологии. *Онтология проектирования*. 2013. № 2(8). С.26-48.
- [4] *Тиханычев О.В.* Теория и практика автоматизации поддержки принятия решений. М.: Эдитус, 2018. 76 с.
- [5] *Gruber T.R.* Toward principles for the design of ontologies used for knowledge sharing. *Int. Journal of Human-Computer Studies*. 1993. Vol. 43. P.907-928.
- [6] *Guarino N., Oberle D., Staab S.* What Is an Ontology? *Handbook on Ontologies*. 2009. P.1-17.
- [7] *Микони С.В.* Понятность онтологической модели как характеристика её качества. *Онтология проектирования*. 2021. Т.11. №1(39). С.20-34. DOI:10.18287/2223-9537-2021-11-1-20-34.
- [8] *Skobelev P., Zhilyaev A., Larukhin V., Grachev S., Simonova E.* Ontology-based Open Multi-agent Systems for Adaptive Resource Management. *Proceedings of the 12th International Conference on Agents and Artificial Intelligence*. 2020. Vol.1. P.127-135. DOI:10.5220/0008896301270135.
- [9] *Шилов Н.Г.* Разработка мультиаспектной онтологии для поддержки принятия решений в производственных системах. *Информационные технологии и вычислительные системы*. 2024. № 2. С.52-64. DOI:10.14357/20718632240205.
- [10] *Meyers B. et al.* Towards a knowledge graph framework for ad hoc analysis in manufacturing. *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2024. Vol.35. P.3731-3752. DOI:10.1007/s10845-023-02319-6.
- [11] *Du J., Jing H., Choo K.R., Sugumaran V., Castro-Lacouture D.* An ontology and multi-agent based decision support framework for prefabricated component supply chain. *Information Systems Frontiers*. 2020. Vol.22. P.1467-1485. DOI:10.1007/s10796-019-09941-x.
- [12] *Shen Y., Jacquet-Andrieu A., Colloc J.* A multi-agent ontologies-based clinical decision support system. arXiv:2001.07374. 2012. DOI:10.48550/arXiv.2001.07374.
- [13] *Жиляев А.А.* Онтологии как инструмент создания открытых мультиагентных систем управления ресурсами. *Онтология проектирования*. 2019. Т.9. №2(32). С.261-281. DOI:10.18287/2223-9537-2019-9-2-261-281.

- [14] **Liu P., Xiao L.** Improving Clinical Decision Support: Architecture Design of a Multi-agent System based on an Argument Quality Assessment Ontology. *IEEE 22nd International Conference on Software Architecture* (Odense, Denmark, April, 2025). P.313-323. DOI:10.1109/ICSA65012.2025.00039.
- [15] **Кирьяков Ф.М., Скобелев П.О.** Мультиагентный метод повышения адаптивности и эффективности управления вычислительными ресурсами в реальном времени. *Онтология проектирования*. 2025. Т.15. №3(57). С.418-435. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-3-418-435.
- [16] **Hadzic M., Wongthongtham P., Dillon T., Chang E.** Ontology-Based Multi-Agent Systems. Berlin: Springer, 2009. 274 p. DOI: 10.1007/978-3-642-01904-3.
- [17] **Hart S.G., Staveland L.E.** Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of empirical and theoretical research. *Advances in Psychology*. 1988. Vol.52. P.139-183. DOI: 10.1016/S0166-4115(08)62386-9.
- [18] **Ramkumar A. et al.** Using GOMS and NASA-TLX to Evaluate Human-Computer Interaction Process in Interactive Segmentation. *International Journal of Human-Computer Interaction*. 2017. No.2. P.123-134. DOI:10.1080/10447318.2016.1220729.
- [19] **Grier R.A.** How High Is High? A Meta-Analysis of NASA-TLX Global Workload Scores. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*. 2015. No.59. P.1727-1731. DOI:10.1177/1541931215591373.
- [20] **Virtanen K. et al.** Weight watchers: NASA-TLX weights revisited. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*. 2022. No.6, P.725-748. DOI:10.1080/1463922X.2021.2000667.
- [21] **Said S. et al.** Validation of the Raw National Aeronautics and Space Administration Task Load Index (NASA-TLX) Questionnaire to Assess Perceived Workload in Patient Monitoring Tasks: Pooled Analysis Study Using Mixed Models. *Journal of Medical Internet Research*. 2020. 22(9):e19472. DOI: 10.2196/19472.

Сведения об авторах



Ляпунцева Елена Вячеславовна, 1963 г. рождения. Окончила Таганрогский радиотехнический институт им. В.Д. Калмыкова в 1985г., д.т.н. (1996). Профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана. Эксперт РАН, эксперт Фонда Сколково и эксперт АСИ. Основатель, руководитель проектов и председатель координационного совета МОО «Лига преподавателей Высшей Школы». Член диссертационного совета по техническим наукам МГТУ им. Н.Э. Баумана, доктор бизнес администрирования. В списке научных трудов более 150 работ в области информатики и вычислительной техники. ORCID ID: 0000-0002-3420-3805. Author ID (РИНЦ): 372736; Author ID (Scopus): 6507410840. lev86@bmstu.ru.



Чечнев Василий Борисович, 1999 г. рождения. Окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана (2023), направление «Организация и управление наукоёмкими производствами». Аспирант МГТУ им. Н.Э. Баумана, специальность «Когнитивное моделирование». В списке научных трудов 6 работ в области интеллектуальных систем и систем поддержки принятия решений. ORCID ID: 0009-0000-1523-3294. Author ID (РИНЦ): 1215414. gegrev@yandex.ru. ✉.

Поступила в редакцию 22.08.2024, после рецензирования 17.12.2025. Принята к публикации 14.01.2026.



Scientific article

DOI: 10.18287/2223-9537-2026-16-1-139-151

Ontological model of work planning processes at manufacturing enterprises within a multi-agent decision support system

© 2026, E.V. Lyapunceva, V.B. Chechnev ✉

Bauman Moscow State Technical University (BMSTU), Moscow, Russia

Abstract

This paper presents an ontological model of work planning processes at manufacturing enterprises, integrated into a multi-agent decision support system based on a modular approach. The multi-agent system utilizes a coalition-holonic

architecture representing a multi-level structure of agents grouped into static holons, managed by supervisors for recurring tasks and temporary coalitions, managed by coordinating agents for solving complex tasks. The ontology serves as a shared semantic space and a knowledge source for agents, ensuring cognitive coherence of their actions and serving as a means of coordinating holons and coalitions. Interaction with the ontology is implemented through specialized agents. The adjustment of decision criteria priorities is performed via weighting coefficients, which enhances the adaptability and controllability of the system. The cognitive load on decision makers is reduced through the ontological elimination of inconsistent alternatives and predefined rules. These effects are particularly pronounced with increasing resource scarcity and stricter constraints imposed on the generated plan. The results of the system's pilot testing suggest potential reductions in planning time, a more even distribution of workload among production personnel, and improved compliance with budget constraints during work planning. The practical significance of the proposed approach lies in accelerating the preparation and increasing the accuracy of production work plans, and reducing the cognitive load on decision makers when planning work for employees of small and medium-sized manufacturing enterprises.

Keywords: *ontological model, multi-agent systems, decision support, cognitive system, work planning.*

For citation: *Lyapuntsova EV, Chechnev VB. Ontological model of work planning processes at manufacturing enterprises within a multi-agent decision support system [In Russian]. Ontology of designing. 2026; 16(1): 139-151. DOI: 10.18287/2223-9537-2026-16-1-139-151.*

Authors' contribution: *Lyapuntsova E.V.* – problem formulation and analysis of results; *Chechnev V.B.* – development of the ontological model and experiment execution.

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.

List of figures

Figure 1 – Decision-maker workflow in a multi-agent decision support system (MAS DSS)

Figure 2 – Work planning process supported by a multi-agent DSS

Figure 3 – Class diagram for the work planning problem

Figure 4 – Examples of relations between classes and attributes for the classes: (a) "Operation" and (b) "Contract"

Figure 5 – Ontology integration scheme with the MAS

Figure 6 – Results of subjective assessment using the RAW-TLX method: (a) baseline configuration and (b) MAS with an ontological model

Figure 7 – Integral subjective workload index obtained using the RAW-TLX method

Table 1 – Key parameters of the test dataset

Table 2 – Performance indicators obtained for the two work planning process options

References

- [1] **Karakikes M, Nathanael D.** The effect of cognitive workload on decision authority assignment in human-robot collaboration. *Cognition, Technology & Work.* 2023; 25: 31-43. DOI: 10.1007/s10111-022-00719-x.
- [2] **Manaskin AV, Brunilin AA, Saenko IB.** Ontological approach to creation of decision-making support systems [In Russian]. *Technical sciences – from theory to practice.* 2016; 11: 28-32.
- [3] **Skobelev PO.** Situation-driven decision-making and multi-agent technology: finding solutions in dialogue [In Russian]. *Ontology of designing.* 2013; 2(8): 26-48.
- [4] **Tikhanychev OV.** Theory and practice of automation of decision support [In Russian]. Moscow: Editus, 2018. 76 p.
- [5] **Gruber TR.** Toward principles for the design of ontologies used for knowledge sharing. *Int. Journal of Human-Computer Studies.* 1993; 43: 907-928.
- [6] **Guarino N, Oberle D, Staab S.** What Is an Ontology? *Handbook on Ontologies.* 2009: 1-17.
- [7] **Mikoni SV.** Comprehensibility of an ontological model as a characteristic of its quality [In Russian]. *Ontology of designing.* 2021; 11; 1(39): 20-34. DOI:10.18287/2223-9537-2021-11-1-20-34.
- [8] **Skobelev P. et al.** Ontology-based Open Multi-agent Systems for Adaptive Resource Management. *Proceedings of the 12th International Conference on Agents and Artificial Intelligence.* 2020; 1: 127-135. DOI: 10.5220/0008896301270135.
- [9] **Shilov NG.** Development of a multi-aspect ontology to support decision-making in production systems [In Russian]. *Information technologies and computing systems.* 2024; 2: 52-64. DOI: 10.14357/20718632240205.
- [10] **Meyers B. et al.** Towards a knowledge graph framework for ad hoc analysis in manufacturing. *Journal of Intelligent Manufacturing.* 2024; 35: 3731-3752. DOI: 10.1007/s10845-023-02319-6.

- [11] **Du J, Jing H, Choo KR, Sugumaran V, Castro-Lacouture D.** An ontology and multi-agent based decision support framework for prefabricated component supply chain. *Information Systems Frontiers*. 2020; 22: 1467-1485. DOI: 10.1007/s10796-019-09941-x.
- [12] **Shen Y, Jacquet-Andrieu A, Colloc J.** A multi-agent ontologies-based clinical decision support system. arXiv:2001.07374. 2012. DOI: 10.48550/arXiv.2001.07374.
- [13] **Zhilyaev AA.** Ontology as a tool for creating open multi-agent resource management systems [In Russian]. *Ontology of designing*. 2019; 9; 2(32): 261-281. DOI: 10.18287/2223-9537-2019-9-2-261-281.
- [14] **Liu P, Xiao L.** Improving Clinical Decision Support: Architecture Design of a Multi-agent System based on an Argument Quality Assessment Ontology. *IEEE 22nd International Conference on Software Architecture* (Odense, Denmark, April, 2025). 2025: 313-323. DOI: 10.1109/ICSA65012.2025.00039.
- [15] **Kiriakov FM, Skobelev PO.** Multi-agent method to improving adaptive real-time management of computing resources [In Russian]. *Ontology of designing*. 2025; 15(3): 418-435. DOI:10.18287/2223-9537-2025-15-3-418-435.
- [16] **Hadzic M, Wongthongtham P, Dillon T, Chang E.** Ontology-Based Multi-Agent Systems. Berlin: Springer, 2009. 274 p. DOI: 10.1007/978-3-642-01904-3.
- [17] **Hart SG, Staveland LE.** Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of empirical and theoretical research. *Advances in Psychology*. 1988, 52. 139-183. DOI: 10.1016/S0166-4115(08)62386-9.
- [18] **Ramkumar A. et al.** Using GOMS and NASA-TLX to Evaluate Human-Computer Interaction Process in Interactive Segmentation. *International Journal of Human-Computer Interaction*. 2017, 2. 123-134. DOI: 10.1080/10447318.2016.1220729.
- [19] **Grier RA.** How High Is High? A Meta-Analysis of NASA-TLX Global Workload Scores. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*. 2015, 59. 1727-1731. DOI:10.1177/1541931215591373.
- [20] **Virtanen K. et al.** Weight watchers: NASA-TLX weights revisited. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*. 2022, 6. 725-748. DOI:10.1080/1463922X.2021.2000667.
- [21] **Said S. et al.** Validation of the Raw National Aeronautics and Space Administration Task Load Index (NASA-TLX) Questionnaire to Assess Perceived Workload in Patient Monitoring Tasks: Pooled Analysis Study Using Mixed Models. *Journal of Medical Internet Research*. 2020. 22(9):e19472. DOI: 10.2196/19472.

About the authors

Elena Vyacheslavovna Lyapunsova (b. 1963) graduated from the Taganrog Radiotechnical Institute named after V.D. Kalmykov in 1985, Doctor of Technical Sciences (1996). She is a Professor at BMSTU. Expert of the Russian Academy of Sciences, the Skolkovo Foundation, and the Agency of Strategic Initiatives. Founder, project manager, and Chair of the Coordinating Council of the International Public Organization «League of Higher Education Teachers». Member of the Dissertation Council for Technical Sciences at BMSTU. Doctor of Business Administration. She is a co-author of more than 150 publications in the fields of informatics and computer engineering. ORCID ID: 0000-0002-3420-3805. Author ID (RSCI): 372736; Author ID (Scopus): 6507410840. lev86@bmstu.ru.

Vasily Borisovich Chechnev (b. 1999) graduated from the BMSTU in 2023 with a degree in Organization and Management of High-Technology Manufacturing. Postgraduate student at BMSTU, specialization Cognitive modeling. He is a co-author of six scientific articles in the fields of intelligent systems and decision support system. ORCID ID: 0009-0000-1523-3294. Author ID (RSCI): 1215414. gegrev@yandex.ru. ✉

Received August 22, 2025. Revised December 17, 2025. Accepted January 14, 2026.