

Дурова Мария Александровна

ассистент кафедры вычислительных машин, систем и сетей, Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», Москва. ORCID: 0009-0005-8309-4982, Scopus AuthorID: 57563819400, SPIN-код: 7690-4326, AuthorID: 1203631

Электронный адрес: DurovaMA@mpei.ru

Maria A. Durova

Assistant at the Department of computing machines, systems and networks, National Research University “Moscow Power Engineering Institute”, Moscow. ORCID: 0009-0005-8309-4982, Scopus AuthorID: 57563819400, SPIN-code: 7690-4326, AuthorID: 1203631

E-mail address: DurovaMA@mpei.ru

Зейн Али Нажиевич

кандидат технических наук, доцент кафедры вычислительных машин, систем и сетей, Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт»; доцент кафедры интеллектуальных систем информационной безопасности, доцент кафедры цифровых технологий обработки данных, МИРЭА – Российский технологический университет, Москва. ORCID: 0000-0003-1725-6865, Scopus AuthorID: 57217248353, SPIN-код: 2284-0604, AuthorID: 1147908

Электронный адрес: ZeynAlN@mpei.ru

Ali N. Zein

Ph.D. of Engineering Sciences, Associate Professor at the Department of computing machines, systems and networks, National Research University “Moscow Power Engineering Institute”; Associate Professor at the Department of intelligent information security systems, Associate Professor at the Department of digital data processing technologies, MIREA – Russian Technological University, Moscow. ORCID: 0000-0003-1725-6865, Scopus AuthorID: 57217248353, SPIN-code: 2284-0604, AuthorID: 1147908

E-mail address: ZeynAlN@mpei.ru

=====

МНОГОАГЕНТНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ОБРАБОТКИ ВХОДЯЩИХ ПИСЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТАГРАФОВОЙ МОДЕЛИ

=====

Аннотация. В работе предложена гибридная интеллектуальная информационная система для классификации писем, основанная на метаграфовой модели знаний и холонической многоагентной архитектуре. Система сочетает статистические, лексико-семантические и глубокие семантические методы в единой структуре, что позволяет обеспечить как высокую точность, так и прозрачность решений. Предложен механизм самоорганизации на основе обратной связи от пользователя. Эксперименты на реальном корпусе университетских писем показали, что гибридный подход позволяет повысить точность классификации на 4...5 % по сравнению с однометодными системами. Результаты демонстрируют перспективность использования метаграфов для построения адаптивных и объяснимых информационных систем.

Ключевые слова: гибридная интеллектуальная система, метаграф, многоагентная система, BM25F, MinHash, LSH, SBERT, фактографический анализ текста.

Для цитирования: Дурова М.А., Зейн А.Н. Многоагентная организация системы обработки входящих писем с использованием метаграфовой модели // Вестник Российского нового университета. Серия: Сложные системы: модели, анализ, управление. 2025. № 3. С. 72 – 84. DOI: 10.18137/RNU.V9I187.25.03.P.72

MULTI-AGENT ORGANIZATION OF AN INCOMING MAIL PROCESSING
SYSTEM USING A METAGRAPH MODEL

Abstract. The article proposes a hybrid intelligent information system for letter classification based on a metagraphic knowledge model and a holonic multi-agent architecture. The system combines statistical, lexico-semantic and deep semantic methods in a single structure, which allows for both high accuracy and transparency of solutions. A mechanism of self-organization based on user feedback is proposed. Experiments on a real corpus of university letters have shown that the hybrid approach can improve classification accuracy by 4–5 % compared to single-method systems. The results demonstrate the promise of using metagraphs to build adaptive and explicable information systems.

Keywords: hybrid intelligent system, metagraph, multi-agent system, BM25F, MinHash, LSH, SBERT, factographic text analysis.

For citation: Durova M.A., Zein A.N. (2025) Multi-agent organization of an incoming mail processing system using a metagraph model. *Vestnik of Russian New University. Series: Complex Systems: Models, analysis, management*. No. 3. Pp. 72 – 84. DOI: 10.18137/RNU.V9I87.25.03.P.72 (In Russian).

Введение

Одной из актуальных задач автоматизации информационных систем в наши дни является обработка входящих писем электронной почты. Чаще всего требуется определение писем, относящихся к категории спама, однако в корпоративной среде возникает также потребность в дополнительной категоризации входящих писем. Эти категории зависят от специфики области. Например, для университетской среды необходимо разделять письма от студентов и от преподавателей, так как это определяет приоритет ответов. Однако традиционные методы классификации, как правило, не обеспечивают объяснимость при решении этой задачи, а также не позволяют пользователю задавать собственные правила обработки. Одним из способов устранения этого недостатка является разработка системы поддержки принятия решений, способной к дообучению и масштабируемости.

Цель настоящего исследования – изучение применимости к разработке такой системы холонического принципа организации агентов, а также метаграфовой модели знаний.

Объект исследования – процесс обработки и категоризации входящих электронных писем сотрудников и преподавателей университета.

Предмет исследования – гибридная интеллектуальная система, сочетающая NLP-обработку текста, поиск похожих документов через MinHash + LSH, точное ранжирование с помощью BM25F, семантическую коррекцию через SBERT, интерфейс сбора обратной связи и экспертные правила. Все эти компоненты объединены в холоническую структуру, где контейнерный агент управляет их работой и может менять порядок, веса и добавлять новые правила.

Постановка задачи

Предполагается, что применение гибридной системы, сочетающей несколько методов обработки естественного языка, позволит повысить точность и объяснимость классификации по сравнению с одноагентными решениями. С целью доказательства этой гипотезы были сформулированы следующие задачи:

- 1) исследовать возможность применения гибридного подхода к задачам анализа и классификации текстовых сообщений;
- 2) формализовать знания через метаграфовый подход;
- 3) реализовать систему, основанную на комбинированном использовании нескольких моделей машинного обучения и экспертных правил;
- 4) реализовать механизм самоорганизации системы на основе обратной связи;
- 5) протестировать эффективность на реальных данных.

Состояние вопроса по рассматриваемой проблеме

Гибридные интеллектуальные информационные системы. В области реализации современных интеллектуальных систем как интегрированных / гибридных систем распределенного искусственного интеллекта (далее – ИИ) применены и развиты идеи, выдвинутые Д.А. Поспеловым. Проблематике создания таких систем посвящены, в частности, ежегодные Всероссийские Поспеловские конференции с международным участием «Гибридные и синергетические интеллектуальные системы», проводимые в Калининградской области под председательством профессора БФУ имени И. Канта А.В. Колесникова [1]. Серьезный вклад в проработку теории разработки ГИС внесли А.В. Колесников [2], Н.Г. Ярушкина [3]. Как было сформулировано В.М. Черненьким и Ю.Е. Гапанюком, гибридные интеллектуальные информационные системы (далее – ГИИС) – это комбинированная система, где «интеллектуальные системы... встраиваются в виде модулей в традиционные информационные системы для решения задач, связанных с интеллектуальной обработкой данных и знаний» [4–6]. В работе [7] формулируется важное свойство ГИИС: в отличие от ансамблей методов машинного обучения, где несколько моделей участвуют в решении одной и той же задачи, например, повышая точность за счёт голосования или взвешивания, гибридная система строится на принципе разделения функций между её компонентами. Каждый модуль ГИИС решает свою подзадачу: предобработку текста, поиск похожих документов, семантическую коррекцию, точное ранжирование или интерфейс взаимодействия. Такая организация позволяет заменять или дообучать только те модули, которые связаны с изменённой предметной областью, оставляя остальные без изменений.

В рамках такого подхода возникает вопрос формального описания знаний, так как от способа хранения и организации информации зависит эффективность работы всей системы. В традиционных ИИ-системах знания могут быть представлены в виде правил, онтологий или графов, однако такие подходы зачастую ограничены либо уровнем абстракции, либо сложностью описания динамических изменений. Для преодоления этих ограничений может использоваться метаграфовый подход.

Метаграфовый подход к моделированию знаний. Метаграф как новый подход к представлению данных и знаний был предложен А. Базу и Р. Блэннингом еще в работе [8], однако Э.Н. Самохвалов, Г.И. Ревунков и Ю.Е. Гапанюк в своей работе [9] ввели новое определение. Оно достаточно близко к определению Базу и Блэннинга, но адаптировано для описания семантики и прагматики информационной системы. В частности, они дополнили концепт метаграфа понятием метаребра, отсутствующим в раннем определении, но необходимым для применения смысловых связей между элементами в контексте, а также при вызове действий, процессов и реакций. На сегодняшний день теория метаграфа как способа формализации данных и знаний в интеллектуальных системах продолжает развиваться.

Холонический принцип организации агентов. Как только модель знаний становится не просто статической, а взаимодействует с внешней средой, возникает потребность в иерархической и автономной организации её обработки.

Для этого при разработке может быть использован холонический принцип, предполагающий, что система строится из автономных, но взаимодействующих частей, каждая из которых может быть частью более крупной системы. Это идеальный подход для построения гибридной системы. Как указал в своей работе В.Б. Тарасов [10], холон – это целое, которое одновременно является частью более крупной системы. На сегодняшний день этот подход продолжает активно использоваться при построении интеллектуальных систем и систем поддержки принятия решений [11–17].

Метод решения и допущения

При постановке задачи были приняты следующие допущения:

- письма содержат достаточно информации для классификации;
- можно использовать гибридную модель, где каждая часть отвечает за свой уровень знаний;
- обратная связь от пользователя ограничена, поэтому важна самоорганизация;
- система не требует полного обучения, а работает на основе поиска похожих документов.

Формализация знаний через метаграфовый подход. Датасетом для обучения системы является набор входящих писем из корпоративной (университетской) почты, предварительно размеченных на семь категорий: «Внешнее: научная и публикационная деятельность», «Письмо по организации учебного процесса», «Письмо от студента», «Приглашение на мероприятие/курсы/etc», «Письмо по делам кафедры/университета», «Личная почта», «Внешнее: спам».

При стартовом запуске системы происходит формирование знаний согласно метаграфовому подходу:

- **вершины:** термины из писем (например: *барс, внести, оценки*);
- **рёбра:** шинглы (например: *барс выставить, выставить оценки*);
- **метавершины:** категории писем (например: *письмо от студента, внешнее: научная и публикационная деятельность*).

После первой итерации обучения системы метаграф пополняется **метарёбрами**, содержащими правила и веса, определяющие, какие шинглы с какой степенью уверенности влияют на выбор категории. Кроме того, при сравнении эффективности различных подходов к классификации метаребра использовались для фиксации каждого из методов относительно результата.

Использованные методы машинного обучения

Мера Жаккара

Для каждого документа строится множество всех его биграммных шинглов. Для двух документов A и B рассчитывается мера Жаккара между их множествами шинглов:

$$J_{sh}(A, B) = \frac{|S(A) \cap S(B)|}{|S(A) \cup S(B)|},$$

где $S(A)$ – множество шинглов документа A ; $S(B)$ – множество шинглов документа B . В качестве документа B выступает новое (классифицируемое) письмо. Число операций

растет квадратично от числа документов. Кроме того, полное сравнение всех пар неэффективно: время вычисления меры Жаккара для одной пары

$$T_{pair} = O(k^2),$$

где $k = \max(|S_q|, |S_d|)$, для всех пар $T_{all-pairs} = O(D^2 k^2)$, где D = число документов. Для решения этой проблемы существуют расширения меры Жаккара.

Алгоритм MinHash

В частности, алгоритм MinHash позволяет строить сигнатуры (хэши) для приближённой оценки меры Жаккара между множествами. Вероятность совпадения минимального значения хэша для двух множеств равна их мере Жаккара

$$P(\text{MinHash}_i(A) = \text{MinHash}_i(B)) = J(A, B).$$

Эту меру уже можно использовать для оценки сходства, однако тестирование показало, что этот метод плохо поддается масштабированию.

Алгоритм LSH

Для использования в растущем корпусе документов на основе сигнатур можно группировать документы в «близкие» с помощью LSH (Locality-Sensitive Hashing):

$$P(h(A) = h(B)) \propto J(A, B),$$

где A, B – два документа в виде множества шинглов; $h(A)$, $h(B)$ – значения хэшей для A и B ; $(h(A) = h(B))$ – вероятность того, что документы попадут в одну ячейку (бакет).

Сложность вычислений по этому принципу составляет $O(D + \log D)$.

Косинусное сходство

Одним из способов количественной оценки сходства между двумя документами d_1 и d_2 является вычисление косинусного сходства их векторных представлений $\vec{V}(d_1)$ и $\vec{V}(d_2)$:

$$\text{sim}(d_1, d_2) = \frac{\vec{V}(d_1) \vec{V}(d_2)}{\|\vec{V}(d_1)\| \|\vec{V}(d_2)\|},$$

где числитель представляет собой скалярное произведение векторов $\vec{V}(d_1)$ и $\vec{V}(d_2)$, а знаменатель – произведение их евклидовых длин. Этот подход компенсирует влияние длины документа.

Алгоритм TF-IDF

Другим подходом к оценке сходства документов является TF-IDF (Term Frequency – Inverse Document Frequency), работающий на преобразовании текстовых документов в числовые векторы. Этот метод является классическим в задачах обработки естественного языка [17], поэтому в рамках данной статьи мы не будем раскрывать подробности его применения.

Алгоритмы BM25 и BM25F

Большой интерес представляет нелинейный аналог TF-IDF – BM25 (Best Match 25). Модель представлена функцией ранжирования, которая не сохраняет полный вектор документа, а вычисляет релевантность запросу:

$$BM25(t, q, d) = IDF(t) \frac{TF(t, d)(k_1 + 1)}{TF(t, d) + k_1 \left(1 - b + b \frac{|df|}{avgdl} \right)},$$

где $TF(t, d)$ – количество вхождений слова t в письме d ;

$$IDF(t) = \frac{TF(t, d)(k_1 + 1)}{TF(t, d) + k_1 \left(1 - b + b \frac{|df|}{avgdl} \right)} -$$

мера уникальности слова t во всей коллекции писем, использование вероятностной формулы со сглаживанием добавляет устойчивость к редким словам: если $df(t) = 0$, то значение логарифма не становится бесконечным; N – общее число документов в корпусе; $|d|$ – длина письма d (число слов); $avgdl$ – средняя длина писем в коллекции; k_1 – насыщение по частоте: параметр, регулирующий влияние частоты термина (обычно $1,2 \leq k_1 \leq 2,0$); b – насыщение по длине документа: параметр нормализации длины документа (обычно $b = 0,75$).

В разрабатываемой системе использовалось расширение BM25 – BM25F, позволяющее учитывать в отдельности несколько полей документа и каждому из них присваивать свой вес, а также нормализовать длины по каждому полю отдельно.

SBERT

Еще одним современным способом решения задачи определения сходства текстов является предобученная модель SBERT, которая строит представления текста в виде векторов, где косинусное сходство между ними отражает семантическую близость [18]. В отличие от традиционных подходов, основанных на частоте слов или шинглах, SBERT позволяет учитывать смысл, а не только формальное совпадение терминов [19; 20]. В контексте решаемой задачи эта модель показала высокую точность, однако специфика ее применения в том, что каждое новое письмо должно встраиваться в заново создаваемое векторное пространство, так что при значительном росте количества писем время обработки становится неприемлемым для онлайн-системы. Кроме того, модель не поддерживает дообучения и совершенно не интерпретируема.

Поэтому было принято решение использовать эту модель для нейтрализации недостатка других методов – BM25F и LSH. Эти методы не учитывают контекста терминов, а потому схожие по смыслу документы могут быть не распознаны. SBERT открывает возможность семантической коррекции: при поступлении нового документа его словарь расширяется с помощью поиска синонимов по SBERT, и дальнейшая обработка происходит уже с учетом этих синонимов.

Разработка многоагентной системы с холонической организацией. Было принято решение реализовать систему как холоническую многоагентную систему (далее – МАС), где каждый агент выполняет свою функцию (см. Таблицу 1).

Такая организация позволяет менять или дообучать отдельные компоненты без полного пересчёта всей системы – это ключевое преимущество гибридного подхода (см. Рисунок).

Таблица 1

Структура разработанной МАС

Агент	Зона ответственности	Вход	Выход
AgNLP	Предобработка текста	Неочищенный текст	Токены, шинглы
AgSrch	Быстрый поиск похожих писем	Шинглы	top-K документов
AgML	Точное ранжирование через BM25F	top-K документов	Ранги документов
AgSem	Семантическая коррекция	Эмбединги SBERT	Расширенные шинглы
AgUI	Интерфейс сбора обратной связи	Новое письмо	Категория, пользовательский выбор
AgAdapt	Организация взаимодействия остальных агентов	–	–

Источник: таблица составлена авторами.

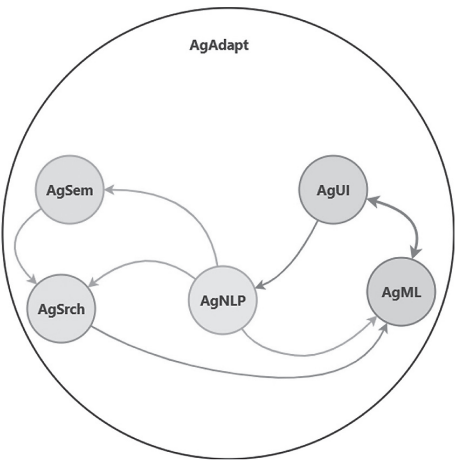


Рисунок. Взаимодействие агентов МАС

Источник: рисунок выполнен авторами.

Реализация самоорганизации через контейнерный агент

Для полноценной самоорганизации была реализована логика контейнерного агента. В рамках метаграфового подхода к моделированию гибридных интеллектуальных информационных систем контейнерный агент определяется как структура, содержащая:

- метаграф данных и знаний (MG_{data});
- множество правил (R);
- config – параметры, определяющие поведение и последовательность работы агентов;
- другие агенты в виде списка (G_{agents}).

Таким образом, контейнерный агент может быть формально представлен следующим образом:

$AgAdapt = (MG_{data}, R, config, G_{agents}).$

Многоагентная организация системы обработки входящих писем
с использованием метаграфовой модели

При получении сигнала о необходимости адаптации, например, на основе ошибок классификации

- агент анализирует статистику и обратную связь;
- находит новые паттерны;
- обновляет R;
- может создать новую метавершину (например, определить специфичную для предметной области синонимичность двух терминов);
- может изменить порядок выполнения агентов, в том числе и исключить выполнение одного из агентов.

Такой подход позволяет считать контейнерный агент центральным элементом организации системы, где он не просто хранит других агентов, но и управляет их поведением.

Результаты

Для тестирования была собрана выборка из 500+ писем сотрудников и студентов МЭИ. Данные были размечены вручную и сохранены в *xlsx*-файл. После этого была проведена серия экспериментов, целью которых являлось сравнение качества классификации моделей в различной комбинации друг с другом (см. Таблицу 2).

Таблица 2

Результаты тестирования возможных конфигураций системы

Метод	Precision	Recall	F1-score	Время на запрос, мс	Качество
TF-IDF	0,68	0,72	0,70	350	Базовое представление
BM25F	0,74	0,71	0,72	380	Учтены поля письма
Jaccard + шинглы	0,62	0,65	0,63	120	Быстро, но не точно
CosSim + SBERT	0,82	0,69	0,75	1200	Высокая точность, но требует GPU
BM25F + Jaccard	0,76	0,73	0,74	390	Позволяет комбинировать статистику и структуру
MinHash+LSH + BM25F	0,84	0,71	0,77	150	Баланс скорости и точности
MinHash+LSH + SBERT	0,92	0,88	0,90	1100	Высокая точность, но замедляет работу
MinHash+LSH + BM25F + SBERT	0,95	0,93	0,94	160	Наилучшая модель

Необходимо отметить, что тестирование качества классификации разных моделей является также и проверкой функционирования AgAdapt, так как с помощью контейнерного агента изменение конфигурации системы не требует внесения изменений в код, а только ее настройку.

Анализ полученных результатов

Результаты показали, что оптимальной является следующая структура системы: AgNLP проводит шинглирование терминов корпуса документов при обучении системы, формируя вершины метаграфа на первом уровне (термины) и метавершины (шинглы).

Взаимодействие этого агента с AgSem делает возможным дообучение системы, так как новые письма семантически расширяются с помощью SBERT. AgNLP также рассчитывает сигнатуры документов с помощью MinHash. AgSrch выполняет быстрый поиск с помощью LSH и формирует список из K наиболее подходящих документов. Этот список получает AgML, где BM25F уточняет релевантность документов:

$$c_q = \arg \max_c \sum_{d \in B_q(c)} score_d,$$

где $B_q(c)$ – документы из бакета B_q , относящиеся к категории c ; c_q – категория с наибольшим суммарным BM25F-рангом.

Такой гибридный подход превосходит одноагентные решения по F1-score, достигнув значения 0,94, при этом сохранив высокую степень объяснимости.

Заключение

В работе предложена, исследована и реализована многоагентная система классификации текстовых сообщений, основанная на метаграфовом подходе к формализации знаний. Гибридный подход к построению архитектуры системы позволил увеличить точность классификации на 4...5 % относительно аналогичных работ, использующих единственный метод (LLM [21] и метод опорных векторов [22]). При этом следует отметить, что возможность дообучения является отличительной чертой разработанной системы и не представлена в упомянутых разработках. Благодаря использованию контейнерного агента как средства организации предложенная система способна к обучению на различных данных и имеет гибкую структуру, а значит, может быть адаптирована для других предметных областей. Это делает её не только частным решением, но и научно обоснованным подходом к обработке текстовой информации.

Литература

1. Еремеев А.П. Инструментальный комплекс для разработки интеллектуальных систем реального времени: методы, модели и программные средства // VII Всероссийская Поспеловская конференция «Гибридные и синергетические интеллектуальные системы»: сборник статей по материалам научной конференции. Калининград, 03–07 июня 2024 г. Калининград, Санкт-Петербург : Русская христианская гуманитарная академия им. Ф.М. Достоевского, 2024. С. 8–21. EDN WSWGCH.
2. Колесников А.В. Технология разработки гибридных интеллектуальных систем : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.13.01. Санкт-Петербург, 2002. 32 с. EDN NIACZV.
3. Ярушклина Н.Г. Гибридные системы, основанные на мягких вычислениях: определение, архитектура, возможности // Программные продукты и системы. 2002. № 3. С. 5. EDN JVSRRH.
4. Черненький В.М., Гапанюк Ю.Е., Ревунков Г.И., и др. Метаграфовый подход для описания гибридных интеллектуальных информационных систем // Прикладная информатика. 2017. Т. 12. № 3. С. 57–79. EDN YTYNQN.
5. Черненький В.М., Терехов В.И., Гапанюк Ю.Е. Структура гибридной интеллектуальной информационной системы на основе метаграфов // Нейрокомпьютеры: разработка и применение. 2016. № 9. С. 3–13. EDN WWJXAX.
6. Алпеев В.С., Ли М. В., Савельев А.А. и др. Применение мультипредметных нейронных сетей и миварных экспертных систем для создания гибридных интеллектуальных информационных систем // Искусственный интеллект в автоматизированных системах управления и обработки дан-

ных : Сборник статей Всероссийской научной конференции. В 2 т. Москва, 27–28 апреля 2022 г. Т. 2. М. : Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, 2022. С. 35–42. EDN GPREEG.

7. Аладин Д.В. Подход к разработке модели цифрового двойника водителя высокоавтоматизированного транспортного средства на основе гибридной интеллектуальной информационной системы // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. 2022. № 2-2. С. 34. DOI: 10.37882/2223-2966.2022.02.01. EDN CDWPOV.

8. Basu A., Blanning R.W. Metagraphs and Their Applications. New York : Springer Science & Business Media, 2007. Vol. 15. 172 p. ISBN 978-0-387-37233-4. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-0-387-37234-1>

9. Самохвалов Э.Н., Ревунков Г.И., Гапанюк Ю.Е. Использование метаграфов для описания семантики и прагматики информационных систем // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия: Приборостроение. 2015. № 1 (100). С. 83–99. EDN TIVYUH.

10. Тарасов В.Б. От многоагентных систем к интеллектуальным организациям: философия, психология, информатика. М. : УРСС, 2002. 352 с. ISBN 5-8360-0330-0. EDN ZQQRPP.

11. Юлейси Г.П., Холод И.И. Взаимодействие в многоагентных системах интеллектуального анализа данных // Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ. 2020. № 3. С. 18–23. EDN CVWADI. URL: https://izv.etu.ru/assets/files/izvestiya-3_2020-18-23.pdf (дата обращения: 15.04.2025).

12. Лёвкина И.Н., Леденева Т.М. Общая структура многоагентной системы поддержки принятия решений // Евразийский Союз Ученых. 2020. № 5-5 (74). С. 43–46. EDN LAEUZS.

13. Принев М.А., Леденева Т.М., Гаршина В.В. Многоагентные системы: обзор современных подходов к моделированию и проектированию (часть 2) // Вестник ВГУ. Серия: Системный анализ и информационные технологии. 2025. № 4. С. 167–190. DOI: <https://doi.org/10.17308/sait/1995-5499/2024/4/167-190>

14. Гапанюк Ю.Е., Каганов Ю.Т., Оселедчик М.Б. Взаимодействие человека и ИИ на основе концептуального подхода // Бионика – 2023 : Материалы III Международной научно-практической конференции, Москва, 1–3 ноября 2023 г. / Ред. А.П. Карпенко. М. : МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2024. С. 20–22. EDN NEACZO.

15. Грунин Н.С., Молчанов А.В., Белоусов Е.А. и др. Реализация модуля взаимодействия со схемой метаграфовой БД // Искусственный интеллект в автоматизированных системах управления и обработки данных : Сборник статей Всероссийской научной конференции. В 2 т. Москва, 27–28 апреля 2022 г. Т. 1. М. : Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, 2022. С. 319–323. EDN LZVQLY.

16. Карякин В.В. Гибридные интеллектуальные системы как симбиоз естественного и искусственного интеллектов // Россия: тенденции и перспективы развития : Ежегодник. Материалы XXI Национальной научной конференции с международным участием, Москва, 16–17 декабря 2021 г. / Отв. ред. В.И. Герасимов. Вып. 17. Ч. 1. М. : Институт научной информации по общественным наукам РАН, 2022. С. 652–655. EDN ORLZRF.

17. Дунин И.В., Гапанюк Ю.Е. Реализация метаграфовых агентов на основе технологий больших данных // Искусственный интеллект в автоматизированных системах управления и обработки данных : Сборник статей Всероссийской научной конференции (ИИАСУ'22), Москва, 27–28 апреля 2022 г. В 2 т. Т. 1. М. : МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2022. С. 337–347. EDN ABMQBD.

18. Jamshidian M. Classifying Sentiment of Reviews by Using TF-IDF, BERT (Word Embedding),

SBERT (Sentence Embedding) with Support Vector Machine Evaluation : [Master's thesis]. Dublin : Technological University Dublin, 2022. 63 p. URL: <https://arrow.tudublin.ie/scschcomdis/274/> (Дата обращения: 15.04.2025).

19. Camacho-Collados J., Pilehvar M.T. From Word to Sense Embeddings: A Survey on Vector Representations of Meaning // *Journal of Artificial Intelligence Research*. 2018. Vol. 63. P. 743–788. DOI: 10.1613/jair.1.11259. EDN WYXFRB.

20. Reimers N., Gurevych I. Sentence-BERT: Sentence Embeddings Using Siamese BERT-Networks // *Proceedings of the 2019 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing and the 9th International Joint Conference on Natural Language Processing (EMNLP-IJCNLP)*. Hong Kong, China : Association for Computational Linguistics. P. 3982–3992. DOI: 10.18653/v1/D19-1410

21. Торшина О.А., Москвина Е.А., Блинова В.В. Автоматизация многокритериальной категоризации корпоративной почты при помощи сверточных нейронных сетей // *Актуальные проблемы современной науки, техники и образования*. 2021. Т. 12. № 1. С. 126–129. EDN RAAARP.

22. Савин П.О., Журавлев А.Д., Лукьянчиков О.И., Русаков А.М., Филатов В.В. Разработка программного средства для классификации писем электронной почты на основе метода опорных векторов // *Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки*. 2023. № 6. С. 134–137. DOI: 10.37882/2223-2982.2023.6-2.30. EDN IEYHHB.

References

1. Ereemeev A.P. (2024) Instrumental complex for development of real-time intelligent systems: Methods, models, and software tools. In: Kolesnikov A.V. (Ed) *Gibridnye i sinergeticheskie intellektual'nye sistemy* [Hybrid and Synergistic Intelligent Systems] : Proceedings of the VII All-Russian Pospelov Conference. Kaliningrad, 03–07 June 2024. Kaliningrad, St. Petersburg : F.M. Dostoyevsky Russian Christian Arts Academy Publ. Pp. 8–21. (In Russian).
2. Kolesnikov A.V. (2002) *Tekhnologiya razrabotki gibridnykh intellektual'nykh sistem* [Technology of Development of Hybrid Intelligent Systems] : Dr. Sci. Diss. Abstract (Engineering) : 05.13.01. Saint Petersburg. 32 p. (In Russian).
3. Yarushkina N.G. (2002) Hybrid systems based on soft computing: definition, architecture, capabilities. *Software & Systems*. No. 3. Pp. 5. (In Russian).
4. Chernenkiy V.M., Gapanyuk Yu.E., Revunkov G.I., et al. (2017) Metagraph approach for hybrid intelligent information systems description. *Journal of Applied Informatics*. Vol. 12. No. 3 (69). Pp. 57–79. (In Russian)
5. Chernenkiy V.M., Terekhov V.I., Gapanyuk Yu.E. (2016) The structure of the hybrid intelligent information system based on metagraphs. *Neurocomputers*. No. 9. Pp. 3–13. (In Russian).
6. Alpeev V.S., Li M.V., Savel'ev A.A., et al. (2022) Application of multiparadigm neural networks and mivar expert systems for creating hybrid intelligent information systems. In: *Iskusstvennyi intellekt v avtomatizirovannykh sistemakh upravleniia i obrabotki dannykh* [Artificial Intelligence in Automated Control and Data Processing Systems] : Proceedings of the All-Russian Scientific Conference. Vol. 2. Moscow : Bauman MSTU Publ. Pp. 35–42. (In Russian).
7. Aladin D.V. (2022) Approach to developing of driver's digital twin model of highly automated vehicle based on hybrid intelligent information system. *Modern Science: Actual Problems of Theory and Practice. Series: Natural and Technical Sciences*. No. 2-2. P. 34. DOI: 10.37882/2223-2966.2022.02.01 (In Russian).
8. Basu A., Blanning R.W. (2007) *Metagraphs and Their Applications*. Vol. 15. New York: Springer Sci-

ence & Business Media. 172 p. ISBN 978-0-387-37233-4. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-0-387-37233-4>

9. Samokhvalov E.N., Revunkov G.I., Gapanyuk Yu.E. (2015) Metagraphs for information systems semantics and pragmatics definition. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series: Instrument Engineering*. No. 1 (100). Pp. 83–99. (In Russian).

10. Tarasov V.B. (2002) *Ot mnogoagentnykh sistem k intellektual'nykh organizatsiiam: filosofia, psikhologiya, informatika* [From Multi-Agent Systems to Intelligent Organizations: Philosophy, Psychology, Informatics]. Moscow : URSS Publ. 352 p. ISBN 5-8360-0330-0. (In Russian).

11. Yuletsi G.P., Kholod I.I. (2020) Interoperability in Multiagent Systems Data Mining. *LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science*. No. 3. Pp. 18–23. URL: https://izv.etu.ru/assets/files/izvestiya-3_2020-18-23.pdf (accessed 15.04.2025). (In Russian).

12. Lyovkina I.N., Ledenyeva T.M. (2020) General structure of a multi-agent decision support system. *Eurasian Union of Scientists*. No. 5-5 (74). Pp. 43–46. (In Russian).

13. Prinev M.A., Ledenyeva T.M., Garshina V.V. (2025) Multi-agent systems: A review of modern approaches to modeling and projecting (Part 2). *Proceedings of Voronezh State University. Series: Systems Analysis and Information Technologies*. No. 4. Pp. 167–190. DOI: <https://doi.org/10.17308/sait/1995-5499/2024/4/167-190> (In Russian).

14. Gapanyuk Yu.E., Kaganov Yu.T., Oselyedchik M.B. (2024) Human-AI interaction based on a conceptual approach. In: Karpenko A.P. (Ed) *Bionika – 2023* [Bionika – 2023] : Proceedings of the III International Scientific and Practical Conference. Moscow : Bauman MSTU Publ. Pp. 20–22. (In Russian).

15. Grunin N.S., Molchanov A.V., Belousov E.A., et al. (2022) Metagraphs DB sheme interaction module implementation. In: *Iskusstvennyi intellekt v avtomatizirovannykh sistemakh upravleniia i obrabotki dannykh (IIASU'22)* [Artificial Intelligence in Automated Control and Data Processing Systems (IIASU'22)] : Proceedings of the All-Russian Scientific Conference. Moscow, 27–28 April 2022. Vol. 1. Moscow : Bauman MSTU Publ. Pp. 319–323. (In Russian).

16. Karyakin V.V. (2022) Hybrid intelligent systems as a symbiosis of natural and artificial intelligence. In: Gerasimov V.I. (Ed) *Rossia: tendentsii i perspektivy razvitiia* [Russia: Trends and Prospects of Development] : Yearbook. Proceedings of the XXI National Scientific Conference with international participation. Moscow, 16–17 December 2021. Issue 17. Part 1. Moscow : Institute of scientific information on public sciences RAS Publ. Pp. 652–655. (In Russian).

17. Dunin I.V., Gapanyuk Yu.E. (2022) Implementation of metagraph agents based on big data technologies. In: *Iskusstvennyi intellekt v avtomatizirovannykh sistemakh upravleniia i obrabotki dannykh (IIASU'22)* [Artificial Intelligence in Automated Control and Data Processing Systems (IIASU'22)] : Proceedings of the All-Russian Scientific Conference. Moscow, 27–28 April 2022. In 2 vols. Vol. 1. Moscow : Bauman MSTU Publ. Pp. 337–347. (In Russian).

18. Jamshidian M. (2022) *Classifying sentiment of reviews by using TF-IDF, BERT (Word Embedding), SBERT (Sentence Embedding) with Support Vector Machine Evaluation*, Master's thesis, Dublin : Technological University Dublin. URL: <https://arrow.tudublin.ie/scschcomdis/274/> (accessed 15.04.2025).

19. Camacho-Collados J., Pilehvar M.T. (2018) From word to sense embeddings: A survey on vector representations of meaning. *Journal of Artificial Intelligence Research*. Vol. 63. Pp. 743–788. DOI: 10.1613/jair.1.11259

20. Reimers N., Gurevych I. (2019) Sentence-BERT: Sentence embeddings using siamese BERT-networks. In : *Proceedings of the 2019 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing and the 9th International Joint Conference on Natural Language Processing (EMNLP-IJCNLP)*. Hong Kong,

China : Association for Computational Linguistics. Pp. 3982–3992. DOI: 10.18653/v1/D19-1410

21. Torshina O.A., Moskvina E.A., Blinova V.V. (2021) Automation of multi-criteria categorization of corporate mail using convolutional neural networks. *Aktual'nye problemy sovremennoi nauki, tekhniki i obrazovaniia* [Current Problems of Modern Science, Technology and Education]. Vol. 12. No. 1. Pp. 126–129. (In Russian)

22. Savin P.O., Zhuravlev A.D., Luk'yanchikov O.I., Rusakov A.M., Filatov V.V. (2023) Development of a software tool for email classification based on support vector machines. *Sovremennaya nauka: aktual'nye problemy teorii i praktiki. Seriya: Estestvennye i tekhnicheskie nauki* [Modern science: Actual problems of theory and practice. Series: Natural and Technical Sciences]. No. 6. Pp. 134–137. DOI: 10.37882/2223-2982.2023.6-2.30 (In Russian).

Поступила в редакцию: 25.07.2025

Received: 25.07.2025

Поступила после рецензирования: 27.08.2025

Revised: 27.08.2025

Принята к публикации: 10.09.2025

Accepted: 10.09.2025