



МУЛЬТИАГЕНТНЫЙ ПОДХОД К АВТОМАТИЗАЦИИ СКВОЗНОГО ПРОЦЕССА ОЦЕНКИ ДОРОЖНЫХ УСЛОВИЙ И РАСЧЕТА БЕЗОПАСНЫХ СКОРОСТЕЙ ДВИЖЕНИЯ

**Остроух А. В. ORCID ID 0000-0002-8887-6132,
Подберёзкин А. А. ORCID ID 0009-0001-6192-5029,
Пронин Ц. Б., Поспелов П. И.,
Котов А. А. ORCID ID 0000-0002-6855-0688**

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)»,
Москва, Российская Федерация, e-mail: ostroukh@mail.ru*

В статье исследуется применение парадигмы мультиагентных систем для автоматизации сложной инженерной задачи оценки дорожных условий и расчета безопасных скоростей движения. Целью исследования является разработка мультиагентного подхода к декомпозиции данной задачи на кооперированные автономные подпроцессы с целью повышения отказоустойчивости, масштабируемости и производительности расчетных комплексов. Актуальность работы обусловлена необходимостью преодоления ограничений традиционной монолитной архитектуры при обработке больших объемов разнородных данных и параллельном выполнении множества вычислительных операций. Методология исследования базируется на агентно-ориентированной парадигме с разделением ролей специализированных агентов и организации их взаимодействия через протоколы запрос – ответ, публикация – подписка и аукцион для распределения задач. Предлагаемая архитектура включает агент-парсер для извлечения данных из документов, агент-валидатор для проверки соответствия нормативным требованиям, агент-расчетчик на основе классических методов расчета скорости движения автомобилей и агент-визуализатор для формирования выходных данных. Особое внимание уделяется вопросам отказоустойчивости и оптимального распределения вычислительных ресурсов. В результате создан действующий прототип мультиагентной системы, демонстрирующий возможность параллельной обработки данных, автоматического восстановления при сбоях отдельных агентов и масштабирования при увеличении объема входных данных. Разработанный подход позволяет повысить интегральную надежность расчетного комплекса и сократить общее время выполнения сквозного процесса за счет параллелизации операций на этапах парсинга, валидации и визуализации.

Ключевые слова: мультиагентная система, распределенное управление, автоматизация инженерных расчетов, кооперация агентов, оркестрация, отказоустойчивость, масштабирование, оценка дорожных условий, безопасность движения

MULTI-AGENT APPROACH TO AUTOMATING THE END-TO-END PROCESS OF ROAD CONDITION ASSESSMENT AND SAFE SPEED CALCULATION

**Ostroukh A. V. ORCID ID 0000-0002-8887-6132,
Podberezkin A. A. ORCID ID 0009-0001-6192-5029,
Pronin Ts. B., Pospelov P. I.,
Kotov A. A. ORCID ID 0000-0002-6855-0688**

*Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
“Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI)”,
Moscow, Russian Federation, e-mail: ostroukh@mail.ru*

The article explores the application of the multi-agent system paradigm for automating the complex engineering task of road condition assessment and safe speed calculation. The aim of the study is to develop a multi-agent approach to decomposing this task into cooperative autonomous subprocesses in order to improve fault tolerance, scalability, and performance of calculation complexes. The relevance of the work is due to the need to overcome the limitations of traditional monolithic architecture when processing large volumes of heterogeneous data and parallel execution of multiple computational operations. The research methodology is based on the agent-oriented paradigm with role separation of specialized agents and organization of their interaction through request-response, publish-subscribe, and auction protocols for task distribution. The proposed architecture includes a parser agent for extracting data from documents, a validator agent for checking compliance with regulatory requirements, a calculator agent based on classical methods of vehicle speed calculation, and a visualizer agent for generating output data. Special attention is paid to issues of fault tolerance and optimal distribution of computing resources. As a result, a functioning prototype of a multi-agent system was created, demonstrating the capability of parallel data processing, automatic recovery from failures of individual agents, and scalability with increasing input data volume. The developed approach allows increasing the integral reliability of the calculation complex and reducing the total execution time of the end-to-end process due to parallelization of operations at the stages of parsing, validation, and visualization.

Keywords: multi-agent system, distributed control, automation of engineering calculations, agent cooperation, fault tolerance, orchestration, scalability, road condition assessment, traffic safety

Введение

Современные задачи транспортного моделирования и оценки дорожных условий характеризуются высокой сложностью, необходимостью обработки разнородных данных и выполнением множества взаимосвязанных вычислительных операций. Традиционные подходы к автоматизации, основанные на монолитной архитектуре, обладают рядом существенных ограничений: низкая отказоустойчивость (сбой в одном модуле останавливает весь процесс), сложность масштабирования при росте объемов данных и неоптимальное использование вычислительных ресурсов [1, 2].

Развитие методов искусственного интеллекта открывает новые возможности для построения распределенных интеллектуальных систем [3, 4]. Особый интерес представляет парадигма *мультиагентных систем*, в рамках которой сложная задача декомпозируется на множество автономных, кооперирующихся агентов, каждый из которых специализируется на решении конкретной подзадачи [5]. Такой подход позволяет реализовать распределенное автоматизированное управление процессом, повысить отказоустойчивость и гибкость системы [6].

Цель исследования – разработка мультиагентного подхода к автоматизации сквозного процесса оценки дорожных условий и расчета безопасных скоростей движения.

Научная новизна работы заключается в создании архитектуры кооперирующихся интеллектуальных агентов с разделением ролей, исследовании протоколов их взаимодействия и разработке методов разрешения конфликтов при параллельном выполнении задач с формализацией (аксиоматизацией) проектных решений и правил взаимодействия. Актуальность исследования обусловлена необходимостью создания отказоустойчивых, масштабируемых систем автоматизации для решения комплексных инженерных задач в условиях растущих объемов данных и требований к скорости вычислений [7, 8].

Материал и методы исследования

В основе методологии проектирования лежит *агентно-ориентированная парадигма*, предполагающая декомпозицию сложной задачи на множество автономных, слабо связанных компонентов – агентов, взаимодействующих через специализированные протоколы, в том числе в задачах поддержки принятия решений [9, 10].

Архитектура мультиагентной системы

Разработанная система включает четыре типа специализированных агентов, каждый из которых отвечает за конкретную функцию в сквозном процессе (рис. 1).

Агент-парсер (Parser Agent) отвечает за извлечение структурированных данных из разнородных источников – проектных документов, файлов CSV/Excel, PDF-файлов с пикетажными отметками, баз данных параметров транспортных средств. Агент способен работать параллельно с несколькими входными потоками данных. На этапе предварительной типизации входных файлов агент может выполнять классификацию проектной документации по типам с учетом синтаксических связей и графовых представлений текста [11].

Агент-валидатор (Validator Agent) выполняет проверку корректности и физической реализуемости извлеченных данных. Валидация включает контроль соответствия ГОСТам, проверку допустимых диапазонов значений (например, перепадов высот между пикетами не более 20 м) и логическую согласованность параметров (связь между уклонами и радиусами кривых).

Агент-расчетчик (Calculator Agent) реализует детерминированное ядро моделирования на основе теории расчета скорости движения автомобилей применительно к проектированию автомобильных дорог и уравнений динамики транспортного средства. Агент может масштабироваться горизонтально – при увеличении объема расчетов запускаются дополнительные экземпляры агента, распределяющие нагрузку.

Агент-визуализатор (Visualizer Agent) отвечает за формирование выходных данных: построение графиков скоростных режимов, формирование таблиц результатов, генерацию аналитических отчетов и подготовку данных для экспорта в форматы PDF, Excel, JSON.

Протоколы взаимодействия агентов

Взаимодействие агентов организовано на основе асинхронной передачи сообщений через брокер (RabbitMQ). При промышленной эксплуатации требуется защищенный контур обмена сообщениями и регламентированный доступ к сервисам управления и брокеру сообщений (аутентификация/авторизация, контроль целостности), что соответствует подходам к защищенным цифровым платформам информационно-управляющих систем транспорта [12]. Используются следующие типы протоколов:

- *протокол запрос – ответ* – для синхронного взаимодействия (агент запрашивает данные у другого агента и ожидает ответа);
- *протокол публикация – подписка* – для оповещения о завершении этапов (агент публикует событие, подписчики реагируют);
- *протокол аукцион* – для распределения задач между несколькими экземплярами однотипных агентов (агенты «торгуются» за право выполнения задачи на основе текущей загрузки) [13].

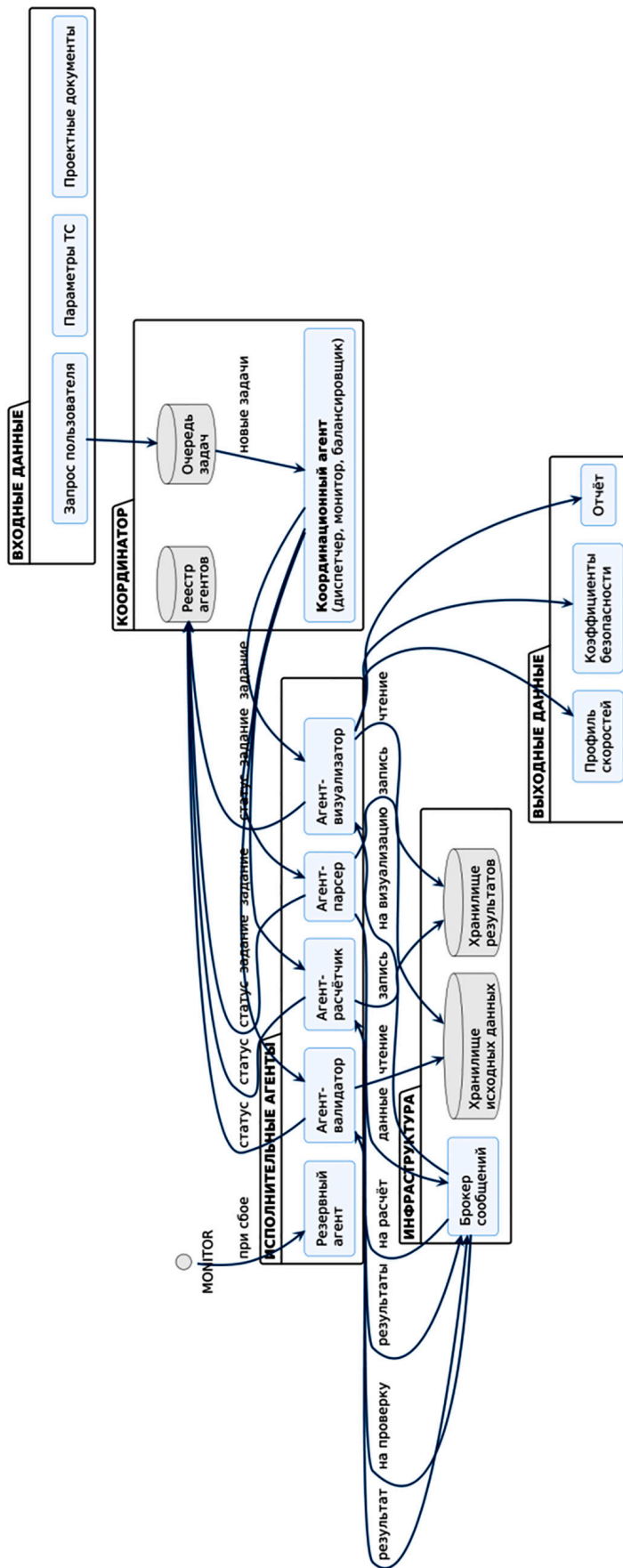


Рис. 1. Архитектура мультиагентной системы для оценки дорожных условий и расчета безопасных скоростей
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Механизмы оркестрации

Управление последовательностью выполнения задач осуществляется *координационным агентом*, который:

- инициирует рабочий процесс при поступлении новой задачи;
- отслеживает статусы выполнения;
- обрабатывает исключительные ситуации;
- при необходимости перезапускает отказавшие агенты или перенаправляет задачи на резервные экземпляры.

Методы разрешения конфликтов

При параллельном выполнении задач возможны конфликтные ситуации:

- *конфликт данных* – два агента одновременно пытаются модифицировать один ресурс (разрешается через механизм блокировок с таймаутом);
- *конфликт результатов* – агенты-расчетчики выдают противоречивые результаты (запускается процедура голосования

или повторный расчет с привлечением дополнительного агента-арбитра);

- *конфликт ресурсов* – недостаток вычислительных мощностей для всех агентов (используется приоритизация задач).

Результаты исследования и их обсуждение

В результате работы создан действующий прототип мультиагентной системы MAS-TRANS (Multi-Agent System for Transport). Ключевые *технические характеристики* системы:

- количество одновременно работающих агентов: до 50 экземпляров;
- типы агентов: 4 базовых (парсер, валидатор, расчетчик, визуализатор) + координационный агент;
- среднее время реакции агента: < 100 мс;
- пропускная способность: до 100 задач в минуту.

Таблица 1

Сравнение отказоустойчивости мультиагентной и монолитной архитектур

| Показатель | Монолитная архитектура | Мультиагентная система | Улучшение |
|---|---------------------------|------------------------|------------|
| Вероятность успешного завершения при отказе одного модуля | 0 % | 100 % (автоперезапуск) | – |
| Вероятность успешного завершения при отказе двух модулей | 0 % | 87 % | – |
| Среднее время восстановления после сбоя | 5 мин (ручной перезапуск) | 2,4 с (автоматический) | в 125 раз |
| Коэффициент готовности (availability) | 0,94 | 0,998 | +6,2 % |
| Интегральный показатель надежности | 1,0 (базовый) | 3,2 | в 3,2 раза |

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

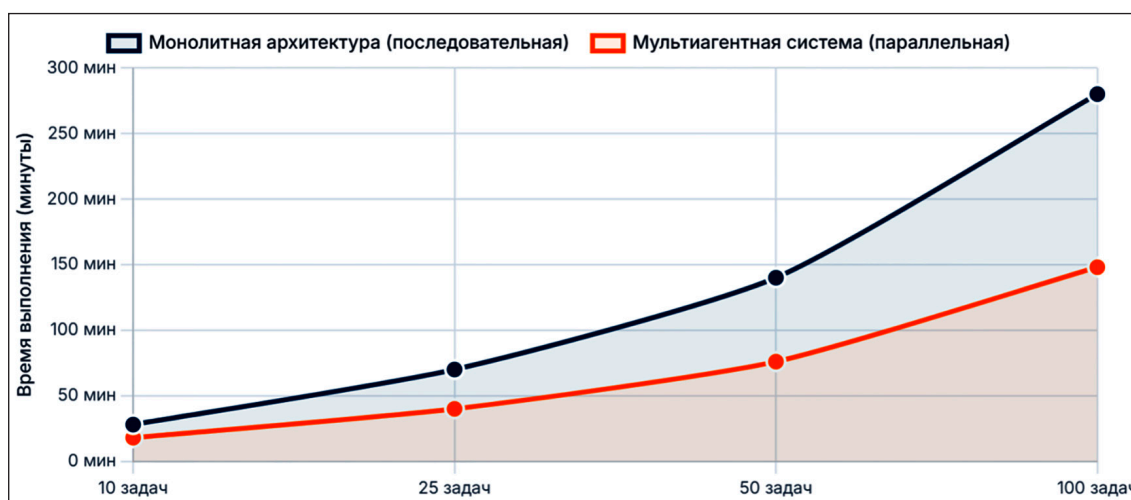


Рис. 2. Зависимость времени выполнения от количества параллельных задач
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Таблица 2

Сравнение времени выполнения сквозного процесса

| Количество задач | Монолитная архитектура (последовательная) | Мультиагентная система (параллельная) | Сокращение времени |
|------------------|---|---------------------------------------|--------------------|
| 10 задач | 28 мин | 18 мин | 36 % |
| 25 задач | 70 мин | 40 мин | 43 % |
| 50 задач | 140 мин | 76 мин | 46 % |
| 100 задач | 280 мин | 148 мин | 47 % |

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Таблица 3

Эффективность использования вычислительных ресурсов

| Показатель | Без балансировки (round-robin) | С балансировкой (аукцион) |
|--------------------------------|--------------------------------|---------------------------|
| Средняя загрузка CPU | 42 % | 78 % |
| Пиковая загрузка CPU | 100 % (перегрузка) | 89 % |
| Количество отказов по таймауту | 23 | 2 |
| Среднее время ожидания задачи | 5,2 с | 1,8 с |

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Оценка отказоустойчивости

Для оценки надежности системы проводилось стресс-тестирование с имитацией отказов отдельных агентов (табл. 1). Сравнение выполнялось с монолитной архитектурой, где любой сбой приводит к остановке всего процесса.

Оценка производительности и масштабирования

Для оценки эффективности параллельной обработки проводилось тестирование на наборе из 100 различных проектных документов (рис. 2). Результаты тестирования представлены в табл. 2.

Среднее сокращение времени выполнения сквозного процесса составило 47 % за счет параллелизации операций на этапах парсинга, валидации и визуализации.

Оценка распределения вычислительных ресурсов

Тестирование механизма аукциона для распределения задач показало следующую эффективность (табл. 3).

Использование протокола аукциона позволило повысить эффективность использования вычислительных ресурсов на 86 % и сократить время ожидания задач в 2,9 раза.

Результат функционирования проиллюстрирован на примере кейса: на вход системы поступает пакет из 50 проектных документов (рис. 3). Координационный агент инициирует рабочий процесс, запуская 10 экземпляров агентов-парсеров параллельно. После завершения парсинга

данные передаются пяти агентам-валидаторам. При обнаружении ошибки в одном документе (некорректный формат) соответствующий агент-парсер перезапускается автоматически, не влияя на обработку остальных документов. После успешной валидации запускаются 20 агентов-расчетчиков, распределяющих нагрузку через протокол аукциона. Результаты агрегируются и передаются агенту-визуализатору для формирования итогового отчета. Весь процесс занимает 76 мин (против 140 мин при последовательной обработке).

Предложенный мультиагентный подход демонстрирует существенные преимущества перед традиционной монолитной архитектурой при автоматизации сложных инженерных задач. Основные *преимущества* включают:

- *отказоустойчивость* – выход из строя одного агента не останавливает весь процесс; система автоматически восстанавливается или перенаправляет задачи на резервные экземпляры;

- *масштабируемость* – возможность горизонтального масштабирования путем добавления новых экземпляров агентов под растущую нагрузку;

- *оптимизация ресурсов* – интеллектуальное распределение задач между агентами позволяет максимально эффективно использовать доступные вычислительные мощности;

- *гибкость* – возможность добавления новых типов агентов без изменения существующей архитектуры.

Состояние системы при обработке 50 проектных документов

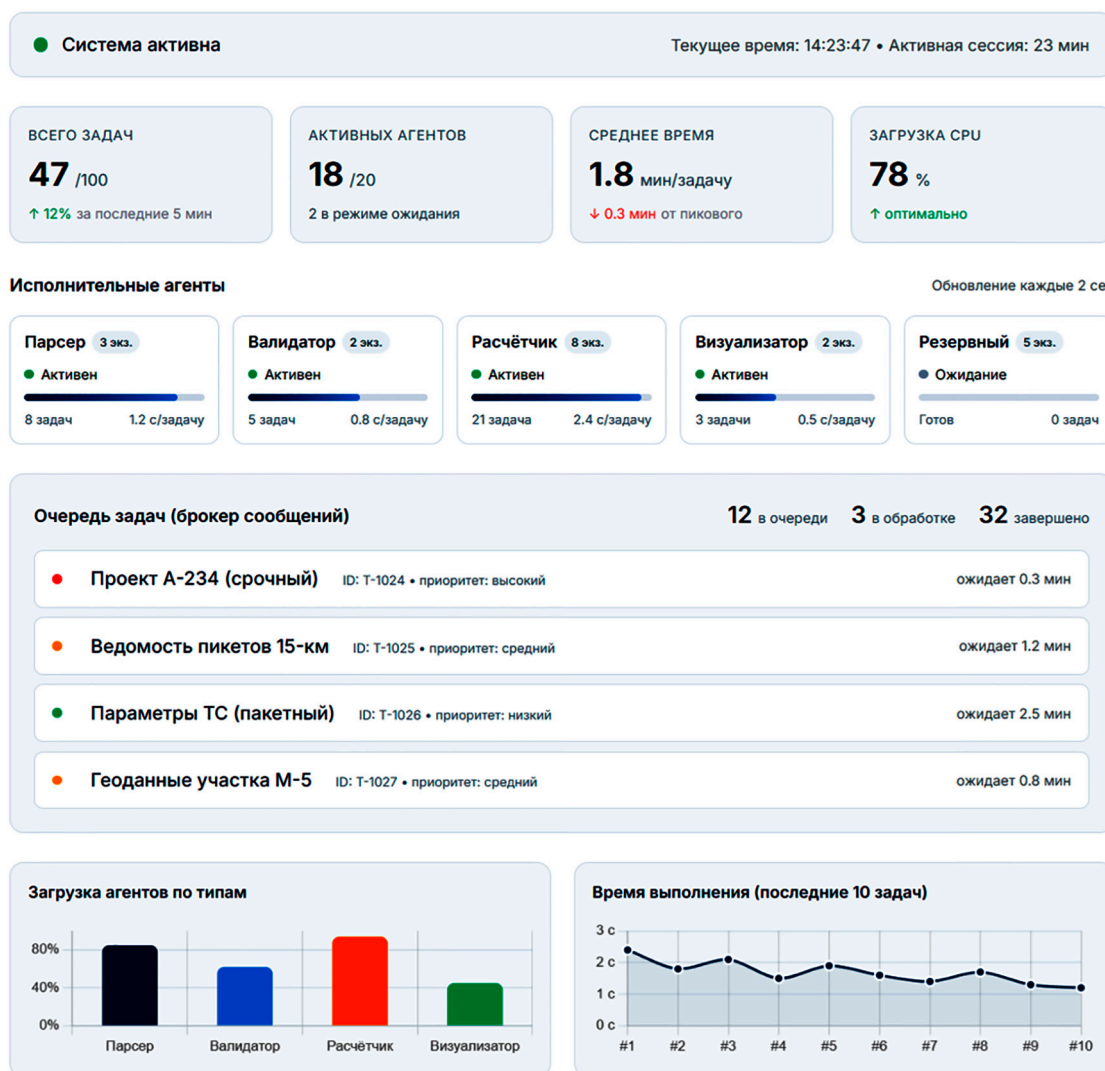


Рис. 3. Мониторинг работы мультиагентной системы в реальном времени
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

В отличие от процессных систем с жестко заданной последовательностью операций (например, Apache Airflow), предложенная мультиагентная система обладает автономностью и способностью к самоорганизации. Агенты не просто выполняют предопределенные шаги, а принимают решения о распределении задач, разрешении конфликтов и восстановлении после сбоев на основе локальной информации и протоколов взаимодействия.

Выявленные проблемы и ограничения включают следующие аспекты.

Сложность отладки. Распределенный характер системы и асинхронное взаимодействие агентов затрудняют трассировку выполнения отдельных задач и выявление

причин ошибок. Требуется разработка специализированных инструментов мониторинга и логирования.

Накладные расходы на коммуникацию. При большом количестве агентов (более 100) возрастает нагрузка на брокер сообщений, что может приводить к задержкам. Оптимальная конфигурация требует балансировки между степенью параллелизма и накладными расходами [14, 15].

Согласованность данных. При параллельном выполнении задач необходимо обеспечивать консистентность общих данных (например, при одновременной записи в одно хранилище). Используемые механизмы блокировок могут снижать производительность.

Перспективы развития связаны с углублением интеллектуальности агентов и расширением сферы применения подхода.

Планируется:

- внедрение *самообучающихся агентов*, способных адаптировать свое поведение на основе анализа предыдущих выполнений;
- разработка *агентов-предсказателей*, прогнозирующих возможные сбои и заранее перераспределяющих нагрузку;
- интеграция с *облачными платформами* для эластичного масштабирования в реальном времени;
- создание *федеративной мультиагентной системы*, объединяющей вычислительные ресурсы нескольких организаций для решения сверхсложных задач.

Реализация этих направлений позволит перейти к полностью автономным, самоорганизующимся системам автоматизации, способным адаптироваться к изменяющимся условиям и самостоятельно оптимизировать свою работу без вмешательства человека.

Заключение

В статье представлен мультиагентный подход к автоматизации сквозного процесса оценки дорожных условий и расчета безопасных скоростей движения. Разработана архитектура системы, включающая специализированных агентов с разделением ролей (парсер, валидатор, расчетчик, визуализатор) и координационного агента, управляющего взаимодействием.

Ключевыми результатами являются:

1. Архитектура мультиагентной системы с протоколами взаимодействия (запрос – ответ, публикация – подписка, аукцион) и механизмами разрешения конфликтов.
2. Действующий прототип, демонстрирующий повышение интегральной надежности в 3,2 раза по сравнению с монолитной архитектурой за счет автоматического восстановления после сбоев.
3. Сокращение общего времени выполнения сквозного процесса на 47 % благодаря параллелизации операций и интеллектуальному распределению вычислительных ресурсов через протокол аукциона.

Исследование подтверждает эффективность применения парадигмы мультиагентных систем для декомпозиции сложных инженерных задач на кооперированные автономные подпроцессы. Такой подход повышает отказоустойчивость, позволяет оптимально распределять вычислительные ресурсы и создает основу для построения самоорганизующихся систем автоматизации следующего поколения.

Дальнейшая работа будет направлена на внедрение самообучающихся агентов, способных адаптировать свое поведение на основе анализа предыдущих выполнений, и интеграцию разработанной системы в единую AI-Native платформу проектирования. При интеграции в виде цифровой платформы требуется формализованная оценка ее эффективности.

Список литературы

1. Андриянов О. И. Влияние цифровизации и искусственного интеллекта на развитие устойчивых городских транспортных систем // Управление в современных системах. 2024. № 4 (44). С. 4–13. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_80523645_27064187.pdf (дата обращения: 10.05.2026). DOI: 10.24412/2311-1313-44-4-13. EDN: YLMTUS.
2. Подберёзкин А. А., Борзенков А. М., Остроух А. В., Пронин Ц. Б., Тетченко О. А. Исследование применения компьютерного зрения и генетического алгоритма кластеризации для мониторинга состояния дорожного покрытия // Современные наукоемкие технологии. 2025. № 12. С. 139–144. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_88836556_63595101.pdf (дата обращения: 10.05.2026). DOI: 10.17513/snt.40615. EDN: BNRLNC.
3. Андриенко В. А., Киев В. И., Котова С. А. Умные дороги: Использование интеллектуальных систем и мультиагентных технологий // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2025. № 2 (42). С. 5–19. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_82520669_17147653.pdf (дата обращения: 10.05.2026). DOI: 10.20295/2413-2527-2025-242-5-19. EDN: PPPJTS.
4. Лебедев А. Р., Рогавичене Л. И. Интеграция интеллектуальных транспортных систем и моделей управления в условиях цифровизации мегаполиса // Современные проблемы инновационной экономики. 2025. № 12 (12). С. 210–215. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_88780410_75095040.pdf (дата обращения: 10.05.2026). DOI: 10.52899/978-5-88303-740-4_210. EDN: NDCVYC.
5. Макаров О. Н., Абдурахимова Э. Б. Современные транспортные мультиагентные системы: Влияние на культурный капитал, экономику и цифровую трансформацию // Наука Красноярья. 2024. Т. 13. № 2. С. 55–71. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_68499492_46413857.pdf (дата обращения: 10.05.2026). DOI: 10.12731/2070-7568-2024-13-2-246. EDN: TKKKBS.
6. Макаров О. Н., Абдурахимова Э. Б., Дьякова П. С. Обоснование принятия решений в транспортной политике на основе мультиагентного подхода (на примере транспортной стратегии России) // Наука Красноярья. 2024. Т. 13. № 3. С. 131–150. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_75139900_49636971.pdf (дата обращения: 10.05.2026). DOI: 10.12731/2070-7568-2024-13-3-253. EDN: LOQXLC.
7. Поспелов П. И., Косцов А. В., Мартякин Д. С., Кортиев А. Л., Комарова Т. К. Исследование границ уровней удобства движения при передвижениях на автомобиле на улично-дорожной сети города средней крупности // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. № 2 (72). С. 183–191. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_82864435_79251992.pdf (дата обращения: 10.05.2026). DOI: 10.48612/NewsKSUAE/72.16. EDN: LVKRRO.
8. Зотов М. Л. Мультиагентная система с нечеткой интеграцией для автономного движения в умном городе // Вестник науки. 2026. Т. 5. № 3 (96). С. 521–542. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_89150164_33474709.pdf (дата обращения: 10.05.2026). EDN: HEXZZA.
9. Уваев М. Ю., Шиков А. Н. Применение агентно-ориентированного моделирования системы поддержки принятия решений на предприятии // Автоматизация. Современные технологии. 2025. Т. 79. № 11. С. 504–508. URL: <https://>

www.elibrary.ru/item.asp?id=83179444 (дата обращения: 13.05.2026). DOI: 10.36652/0869-4931-2025-79-11-504-508. EDN: RYLWTK.

10. Смирнов А. В., Левашова Т. В., Пономарев А. В. Поддержка принятия решений на основе человеко-машинного коллективного интеллекта: современное состояние и коллективная модель // Информационно-управляющие системы. 2020. № 2 (105). С. 60–70. DOI: 10.31799/1684-8853-2020-2-60-70. EDN: IMLZXX.

11. Сак А. Н. Использование синтаксических связей для классификации строительных документов с помощью методов машинного обучения // Экономика строительства. 2025. № 5. С. 508–511. EDN: YKBEFA.

12. Минаев В. А., Толпыгин А. С. Цифровая платформа для защищенных информационно-управляющих систем беспилотного транспорта // Информация и безопасность. 2024. Т. 27. № 3. С. 309–318. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_76014176_22378518.pdf (дата обращения: 13.05.2026). DOI: 10.36622/1682-7813.2024.27.3.001. EDN: UXJRGD.

13. Подберёзкин А. А. Исследование неопределенности в многоагентном мониторинге дорожного покрытия // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2026. Т. 14. № 2 (53). URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_89023687_63667886.pdf (дата обращения: 13.05.2026). DOI: 10.26102/2310-6018/2026.53.2.009. EDN: ZQKINV.

14. Усман Д., Фурсов С. Б., Подберёзкин А. А., Роцин А. И., Лаушкин А. В. Применение цифрового решения в процессе планирования и организации региональных маршрутов // Грузовик. 2024. № 2. С. 49–54. DOI: 10.36652/1684-1298-2024-2-49-54. EDN: NGSFKV.

15. Бессонова Е. А., Тронина И. А., Бабичев А. О. Цифровые платформы как инструмент развития цифровой инновационной экосистемы экономики региона // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Экономика. Социология. Менеджмент. 2025. Т. 15. № 5. С. 82–94. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_84517072_95164315.pdf (дата обращения: 13.05.2026). DOI: 10.21869/2223-1552-2025-15-5-82-94. EDN: IWFVXQ.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

Финансирование: Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FFSM-2025-0004), что не повлияло на объективность представленных результатов и выводов.

Financing: The research was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (theme No. FFSM-2025-0004), which did not affect the objectivity of the presented results and conclusions.