

УДК 330.3

Умные дороги: использование интеллектуальных систем и мультиагентных технологий

- Андриенко Виктор Александрович**¹ — старший преподаватель кафедры системного программирования. Научные интересы: искусственный интеллект, интеллектуальные агенты, мультиагентные системы, автоматизация разработки и обеспечения качества сложных программных продуктов, архитектура и проектирование информационных систем, цифровая трансформация, интеллектуальные транспортные системы. E-mail: winwork@mail.ru
- Кияев Владимир Ильич**² — канд. физ.-мат. наук, профессор кафедры информатики. Научные интересы: разработка сложных систем, системный и процессный подходы, метрология и качество, умные агенты и мультиагентные системы, цифровая трансформация, гибридные системы. E-mail: kiyayev@mail.ru
- Котова София Александровна**² — магистрант 2-го курса направления 09.04.03 «Прикладная информатика». Научные интересы: искусственный интеллект, мультиагентные системы, интеллектуальные транспортные системы. E-mail: soniakotova2000@yandex.ru

¹Санкт-Петербургский государственный университет, Россия, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9

²Санкт-Петербургский государственный экономический университет, Россия, 191023, Санкт-Петербург, наб. канала Грибоедова, 30–32

Для цитирования: Андриенко В. А., Кияев В. И., Котова С. А. Умные дороги: использование интеллектуальных систем и мультиагентных технологий // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2025. № 2 (42). С. 5–19. DOI: 10.20295/2413-2527-2025-242-5-19

Аннотация. Представлен обзор международных проектов «умных дорог», показана роль технологий искусственного интеллекта и мультиагентных систем в управлении дорожно-транспортными системами. **Цель:** изучение и анализ международного опыта реализации проектов «умных дорог» и перспективы использования мультиагентных систем в данных проектах. **Результаты:** анализ показал разнообразие и значимость подобных проектов и позволил сгруппировать их по масштабу и направленности. Подтверждена перспективность использования искусственного интеллекта и мультиагентных систем в современной практике управления дорожно-транспортными системами. **Практическая значимость:** состоит в цифровизации и интеллектуализации дорожно-транспортной системы с целью повышения качества управления, эффективности и безопасности дорожного движения.

Ключевые слова: умные дороги, *Vehicle-to-Everything*, искусственный интеллект, интеллектуальный агент, мультиагентная система, *robotic process automation*, дорожно-транспортная система, логистика, интеллектуальная транспортная система, безопасность дорожного движения, *vision zero*

2.9.8 — интеллектуальные транспортные системы (технические науки)

Введение

Развитие технологий искусственного интеллекта (ИИ) повлияло практически на все сферы человеческой деятельности. Многие жители России имеют доступ к умным помощникам и ассистен-

там, таким как Алиса, Салют, Маруся, Секретарь, Робот Макс, и разнообразным чат-ботам. Компании все активнее стремятся использовать ИИ для автоматизации рутинных задач сотрудников с це-

лью экономии времени и затрат для существенно-го повышения эффективности ведения бизнеса. В последнее время известным примером широкого использования ИИ стал уникальный чат-бот ChatGPT, которым пользуются во многих странах. В первой трети 2023 года число пользователей ChatGPT превысило 130 миллионов человек по всему миру, что является рекордом пользовательского применения нейросетей.

Несмотря на растущую популярность и актуальность искусственного интеллекта, немногим известно, что в сфере логистического управления транспортными потоками и грузоперевозками ИИ стали постепенно внедрять еще около 15 лет назад. В статье проанализированы различные проекты «умных дорог», а также используемые в этих проектах технологии и решения.

Сравнение международных проектов «умных дорог»

Наиболее масштабными проектами являются предложение итальянских специалистов фирмы ANAS [1] и американский вариант «умной дороги» — Virginia Smart Roads [2] (табл. 1). Оба проекта имеют сложную и достаточно крупную инфраструктуру, включающую центр обслуживания и управления возникающими нестандартными ситуациями на трассах. При этом оба проекта имеют разные цели. Проект ANAS планирует добиться безопасного повышения предела скорости и общей безопасности на автотрассах. Американский проект направлен в первую очередь на тестирование эффективности современных технологий и разработок в области управления безопасностью на некоторых выделенных автодорогах. В будущем планируется открыть шоссе и для обычных автомобилистов. Достоинством итальянского проекта является наличие области с возобновляемой энергией (Green Land), которая будет подпитывать всю инфраструктуру, обеспечивающую эффективность и безопасность дороги. А Virginia Smart Roads имеет много технических средств, направленных на учет изменений погоды, освещенности и загруженности трассы, влажности дорожного покрытия и других условий.

В 2022 году в Чехии приступили к разработке стратегического проекта для городской среды. Проект получил название Mobile monitoring of selected elements of public space in the Capital City of Prague [3]. В рамках проекта создается система мониторинга городского транспортного движения, а также общественное пространство и его элементы с возможностью анализа изображений и возникающих ситуаций с использованием ИИ-технологий. Часть транспортных средств, которые регулярно перемещаются по Праге, будут оснащены видеокамерами, системой позиционирования (GNSS), вычислительным блоком, модулем передачи данных и другими датчиками и устройствами.

Собранные данные будут использованы для анализа текущей ситуации (транспортной инфраструктуры, парковки, остановок и т. д.). Система будет собирать необходимую информацию в режиме реального времени без вмешательства человека. Это достигается за счет распознавания конкретных элементов в общественном пространстве, их идентификации, обнаружения любых аномалий и отклонений, а также оценки конкретных инцидентов. Например, система позволит контролировать ширину проезда для транспорта экстренных служб, пространство вокруг контейнеров для отходов, парковку транспортных средств, работу мусороуборочных машин. На основе полученных данных будет создан аналитический интерфейс и специальные визуальные интерфейсы для администраторов элементов системы. Стоит отметить, что некоторые статистические данные из этой системы будут публиковаться на пражской информационной платформе Golemio, что повысит содержательность информации, предоставляемой населению Праги и других городов Чехии.

Выгоды от реализации данного проекта [3]:

- совершенствование управления общественным транспортом в Праге, в том числе упрощение и ускорение принятия решений;
- финансовая экономия;
- автоматизация технологических процессов;
- повышение безопасности граждан, их комфорта и осведомленности.

**Сравнение итальянского и американского видения
в части инфраструктуры «умных дорог»**

Категория	ANAS	Virginia Smart Roads
Статус	Национальное видение «умной дороги»	Транспортный исследовательский центр
Страна	Италия	США
Цель	Повышение безопасности дорог	Новое шоссе — прямой маршрут между I-81 и Блэксбургом. Исследовательская лаборатория для изучения автомобильных дорог и мостов, транспортных средств и транспортных систем, а также для разработки программных продуктов
Инфраструктура	Связь автомобиля с инфраструктурой: осуществляется за счет датчиков в автомобиле, мобильного телефона/ планшета водителя автомобиля и специально разработанной сети Intranet на территории «умной дороги»	Метеорологические башни: 75 башен для создания дождя, снега и тумана. Для их функционирования установлен резервуар с водой объемом 1 892 706 литров
		Испытательный стенд с переменным освещением
		Система сбора данных на месте (DAS)
	Система контроля ситуации для служб безопасности: система на основе Vehicle-to-Infrastructure (V2I). Обеспечивает постоянный мониторинг ситуации на территории «умной дороги» в режиме реального времени	Дифференциальная глобальная система позиционирования (GPS)
		Система наблюдения за дорогой: усовершенствованная система связи на основе локальной беспроводной сети, соединенной с волоконно-оптической магистралью. Управление фазами светофора и их синхронизация обеспечивается за счет пульта дистанционного управления и SPaT (Signal Phase and Timing)
Green Land: в этой области находятся системы производства и распределения возобновляемой энергии, которые питают всю инфраструктуру	Центр управления: обеспечивает контроль и обслуживание дороги. Он взаимодействует с автомобилями, отслеживает и управляет датчиками дорожного покрытия, электросенсорами, камерами наблюдения, системой прогнозирования погоды, освещением и дорожными знаками	
	7 блоков беспроводного придорожного оборудования	
	14 участков дорожного покрытия	
	Фрикционная трасса открытого типа	
		2 метеостанции

Существуют проекты, которые носят экологический и энергетический характер. Так, в Швеции [4], Великобритании [5] и Испании [6] уже используются дороги или элементы дорог, способные накапливать энергию и питать ею автомобили и окружающую инфраструктуру (табл. 2). Эти проекты имеют общую цель — альтернативный способ получения электроэнергии. Но если шведский проект прямо направлен на снабжение энергией электротранспорта, то в английском и испанском проектах предполагается снабжать электричеством окружающую дорожно-транспортную инфраструктуру.

Еще одной точкой приложения искусственного интеллекта стало его использование не только при

проектировании дорог, но и при проектировании туннелей.

В табл. 3 показаны реализованные проекты «умных туннелей». Такие туннели способны существенно повысить безопасность и сократить путь для автомобилистов или поездов. Среди данной группы проектов выделяется проект Малайзии SMART [7], так как это единственный «умный туннель», который имеет 3 этажа и 4 режима.

Режим № 1 используется при благоприятных погодных условиях. Если идет дождь, то туннель переходит в режим № 2 — на нижнем этаже скапливается вода, но оба верхних этажа открыты для проезда транспортных средств. Режим № 3 отличается от второго тем, что при сильных ливнях

Таблица 2

Энергетические «умные дороги» и технологические решения

	Компания-разработчик, название проекта		
	Electreon, Smartroad Gotland	Highway Energy Systems Ltd.	Repsol, Roads as energetics corps
Год реализации	2020	2009	2012
Страна	Швеция	Великобритания	Испания
Место	Дорога между аэропортом и центром города Висбю на острове Готланд	Автостоянка супермаркета в Глостере	—
Идея	Предкоммерческий демонстрационный проект электрифицированной дороги	Электрокинетические энергетические пандусы	Пьезоэлектрические дороги
Описание	Проезжая по такой дороге, электрические транспортные средства могут заряжаться прямо от «умной дороги». Дорога выступает аналогом беспроводной зарядки, поскольку автомобилям не потребуются тяжелые и дорогостоящие аккумуляторы. Использование такой дороги направлено на сокращение выбросов CO ₂ в атмосферу	Автомобили, проезжая по пандусу, вырабатывают кинетическую энергию, которая передается на специальный двигатель для преобразования кинетической энергии в электрическую	Устройства, встроенные в асфальт, перерабатывают давление и вибрацию от проезжающих по асфальту автомобилей в электрическую энергию из расчета 1 кВт·ч на 12 м дороги
Где используется энергия	Для зарядки электромобилей, электробусов и электрических грузовиков во время их движения	Двигатель вырабатывает энергию, которая питает все кассовые аппараты в магазине	Дороги с большим и постоянным потоком машин

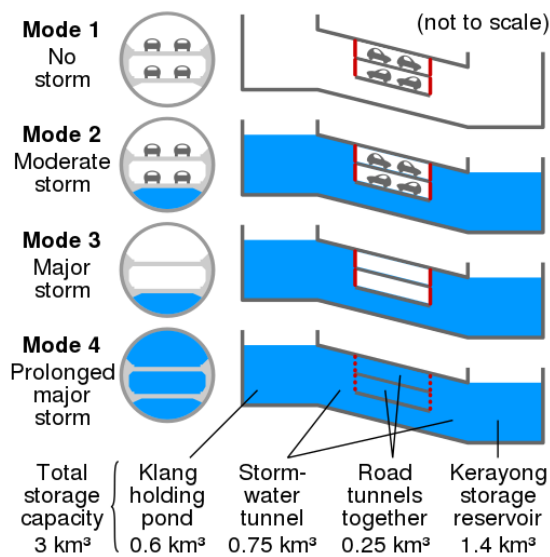


Рис. 1. Режимы «умного туннеля» SMART

проезд по первым двум этажам закрыт. А режим № 4 активируется при чрезмерных осадках: все три этажа наполняются водой и используются для сбора и отвода воды [7]. Иллюстрация режимов работы туннеля приведена на рис. 1.

На фоне развития «умных дорог» стали появляться решения и для общественного транспорта. На данный момент самые известные решения принадлежат Китаю [8] и Чехии [9] (табл. 4). Оба проекта схожи в том, что общественный транспорт предполагается снабдить автопилотом на осно-

ве ИИ. Это может привести к тому, что водитель в общественном транспорте нужен будет только для контроля управления и реагирования в критических ситуациях или необходимость в водителях может совсем исчезнуть.

Несколько лет назад появилась идея укладывать на дороги специальное покрытие, которое с помощью специальных устройств преобразовывало, накапливало и отдавало энергию солнечного света и тепла. Такие проекты разрабатываются как в США [10], так и в Европе — во Франции [5] и Голландии [6]. В США и во Франции в солнечные панели встраивают микропроцессоры, датчики и теплообменники. Такими панелями покрывают дороги с большой загруженностью. В Голландии же разработали специальное покрытие для велодорожек: велодорожку покрывают бетоном со встроенными фотоэлектрическими элементами. Сравнение проектов приведено в табл. 5.

Кроме того, во многих странах разрабатываются решения, устройства и системы, которые могут быть использованы в составе «умных дорог» [11] (табл. 6). Например: решения для анализа и контроля ситуации на дороге с воздуха, а также решения, встроенные в инфраструктуру (web-платформа, «умный светофор» и т. п.).

«Умные туннели»

	Название туннеля			
	SMART Tunnel	Cereixal tunnel	Gotthard Base Tunnel	Tunnel Markovec
Страна	Малайзия	Испания	Швейцария	Словения
Особенности	Двухъярусная дорожная инфраструктура сокращает время в пути, а также защищает от затопления во время сильных штормов благодаря 4 специальным режимам	Повышение эффективности управления инфраструктурой обеспечивается за счет связи между транспортными средствами при помощи технологий V2G (Vehicle-to-Grid) и 5G	Железнодорожный туннель проходит от Эрстфельда до Бодио через Альпы. Он является одним из самых оптимизированных туннелей, через который ходят сотни поездов	Безопасность обеспечивается за счет использования сотен датчиков и камер численностью более 90 штук

Таблица 4

Решения для общественного транспорта

	Название проекта	
	X-Bus	ЭМА
Компания-разработчик	Huawei	Skoda
Страна	Китай	Чехия
Описание	На основе информации от инфраструктуры автобус может ездить по маршруту, делать остановки, объезжать препятствия	Система управляет движением трамвая без участия водителя
Особенности	В инфраструктуру (светофоры, дорожные знаки и т. д.) встроены датчики, которые за счет двухсторонней связи обмениваются информацией с автобусом. Это позволяет предоставить автобусу приоритет на дороге и предотвратить нарушение расписания	Система управляет трамваем на сложных участках дороги, что позволит трамваю также ездить по кривым. Кроме того, она контролирует температуру воздуха в трамвае, уровень освещения, объявляет остановки и контролирует уровень шума колес

Таблица 5

Сравнение проектов по использованию солнечной энергии и тепла

	Название проекта			
	Solar Roadways	Дорога на основе технологии Wattaway от Colas	Power Road	SolaRoad
Страна	США	Франция	Франция	Голландия
Покрытие	Солнечные панели в виде шестиугольников со встроенными микропроцессорами	Солнечные панели, покрытые листами кремния	В дорожное покрытие встраиваются теплообменники	Бетонная велодорожка длиной в 70 метров. В бетон встроены фотоэлектрические элементы
Как используется солнечная энергия	В зависимости от температуры и освещенности микропроцессоры включают нагревательные элементы и настраивают яркость светодиодов	Панели улавливают солнечную энергию. Один километр такой дороги способен обеспечить энергией уличное освещение в городе с населением в 5000 человек	Благодаря теплообменникам дорога улавливает солнечную энергию, накапливает ее и с помощью тепловых насосов отправляет в близлежащие объекты инфраструктуры. Также за счет этой энергии можно нагревать дорожное покрытие для таяния снега зимой или охлаждения дороги летом	Солнечный свет поглощается солнечными батареями и преобразуется в электричество. Оно может быть использовано для питания окружающей инфраструктуры. За первые 6 месяцев такая велосипедная дорожка выработала электроэнергию в 3000 кВт·ч, которой может хватить для питания целого дома в течение года

Решения для «умных дорог»

Разработчик	Страна	Идея	Описание
Bergman	Латвия	Съемка дорожной ситуации с воздуха	Устройство является интеллектуальным решением для управления дорожным движением: отслеживание скорости автомобилей и нарушений правил дорожного движения. Блок управления перекрестками взаимодействует с транспортными средствами и другой инфраструктурой (Vehicle-to-Infrastructure, V2I)
Asimob	Испания	Система для мониторинга и анализа дорожной ситуации	Сервисы, разработанные на основе ИИ, отслеживают дорожные знаки и условия, сооружения и ремонтные работы. Кроме того, система автоматически распознает дорожные неровности и знаки опасностей для создания цифровой карты и более точного анализа дорог и дорожного движения
P3Mobility	Канада	«Умный светофор»	Проект предоставляет интеллектуальные сигналы светофора, а также управление движением по полосам, ориентированное на автономные транспортные средства, и другие решения для умного города. Система обеспечивает связь Vehicle-to-Everything (V2X)
Valerann	Израиль	Web-платформа для управления дорожным движением	Web-платформа использует данные с датчиков и транспортных средств, подключенных к системе. Она работает в режиме реального времени благодаря интеграции с беспроводными датчиками на основе технологии интернета вещей (IoT)
Road Sense Advanced Technologies	Израиль	Автономные датчики для интеллектуальных дорожных приложений	Датчики имеют вид дорожных шипов. Такой дизайн избавляет от необходимости портить дорожное покрытие для их установки. Автономные датчики, разработанные на основе IoT, собирают широкий спектр данных для минимизации рисков дорожного движения

Отечественные проекты «умных дорог»

В Российской Федерации также ведутся разработки в области «умных дорог». На сегодняшний день Центральная кольцевая автомобильная дорога (ЦКАД) является самой технически оснащенной трассой в России и стала самым масштабным проектом в области дорожной инфраструктуры в московском регионе. Трасса оснащена современной системой взимания платы, элементами технологии V2X, которая позволяет автомобилю «общаться» с различными управляющими устройствами, другими транспортными средствами и окружающей дорожной инфраструктурой. Вследствие этого число аварий снизилось в 2 с лишним раза, а скорость реагирования аварийных комиссаров не превышает 15 минут [12].

В конце 2020 года компании — участницы рынка Национальной технологической инициативы «Автонет» (AutoNet) провели первые в России испытания совместимости оборудования и программного обеспечения V2X, поддерживающего международные стандарты серии Intelligent Transport Systems (ETSI ITS-G5) [13]. Эти стандарты обеспечивают работу с программными приложениями и облачными сервисами в режимах передачи данных «авто-

мобиль — автомобиль» (Vehicle-to-Vehicle, V2V) и «автомобиль — обеспечивающая инфраструктура» (Vehicle-to-Infrastructure, V2I). Эти же стандарты определяют требования к оборудованию и программному обеспечению, предназначенным для обеспечения безопасности дорожного движения, повышения эффективности его организации и использования высокоавтоматизированных транспортных средств.

Летом 2022 года в Санкт-Петербурге начали реализацию первого в Российской Федерации коммерческого проекта по развертыванию сетей V2X на общественном транспорте. Основная задача — обеспечить приоритетный проезд общественному транспорту. В случае возникновения заторов сеть изменяет режим работы светофоров, что позволяет оптимизировать пассажиропоток и обеспечить минимально необходимое количество транспорта на линии. В сентябре 2022 года 35 перекрестков оснастили устройствами дорожной инфраструктуры вида Road Side Unit (RSU TEDIX-R1). Первые RSU были установлены в Калининском, Кировском, Красносельском и Приморском районах. Также до конца 2022 года администрация города планировала закупить 138 трамваев, в которых будут предустановлены устройства V2X. В дальней-

шем планируется оснастить таким оборудованием и троллейбусы [13].

Важным событием в развитии дорожно-транспортной инфраструктуры в России стал успешный запуск проезда беспилотных грузовиков большой вместимости 14 июня 2023 года по трассе М-11 из Санкт-Петербурга в Москву. Это событие может стать сильным толчком к развитию беспилотного транспорта по всей России.

Предложение о внедрении мультиагентной системы

Следует отметить, что наряду с применением технологий искусственного интеллекта все большую популярность в сфере управления логистическими процессами набирают мультиагентные системы (МАС). В 2024 году ассоциация ФинТех выделила развитие МАС как один из 10 основных трендов ИИ [14]. Это связано с тем, что МАС в режиме реального времени способна обрабатывать большое количество разнообразных данных, получаемых с различных физических датчиков и робототехнических устройств. Кроме того, внедрение МАС в сложные экономико-управленческие системы в логистике позволяет создать адекватное единое информационное пространство

для всех участников, использующих такую систему [15, 16].

Без использования мультиагентных систем реализация данных масштабных проектов была бы невозможна. В научной литературе понятие «мультиагентная система» отождествляют с такими терминами, как интеллектуальный агент, искусственный интеллект и т. п. [17–20] (табл. 7).

Рассматривая МАС как сложноструктурное образование, включающее несколько агентов, которые могут быть разных видов и выполнять различные функции, Х. Нвана (H. Nwana) предлагает следующую классификацию агентов [21]:

- Collaborative agents (сотрудничающие агенты);
- Collaborative agents with learning (memory) ability (сотрудничающие агенты со способностью к обучению (памяти));
- Interface agents (интерфейсные агенты);
- Truly intelligent agents (действительно (истинно) интеллектуальные агенты).

По экспертным оценкам, наиболее распространенным видом агентов являются сотрудничающие агенты со способностью к обучению. Но на текущий момент выявлено активное развитие и внедрение нового типа агентов — действительно интеллектуальных агентов.

Таблица 7

Подходы к определению сущности понятия МАС

Автор (источник)	Формулировка понятия
ГОСТ Р 59277—2020. Системы искусственного интеллекта. Классификация систем искусственного интеллекта [17]	Агент — «физический/программный объект, который оценивает собственное состояние, состояние других объектов и окружающей среды для выполнения действий, включая прогнозирование и планирование, которые максимизируют успешность, в том числе при неожиданном изменении оцениваемых состояний, достижения своих целей». Многоагентная система — «система, состоящая из множества взаимодействующих интеллектуальных агентов. Многоагентные системы могут решить проблемы, которые трудны или невозможны для отдельного агента или для единой (моноконтинентной) системы»
Л. А. Гуревич, А. Н. Вахитов [18]	«Мультиагентные системы созданы для решения различных задач искусственного интеллекта, в которых присутствует несколько участников. Основным понятием является агент». «Агент — нечто, что способно воспринимать свое окружение через сенсоры и изменять его своими действиями»
А. Э. Кокаев, Р. В. Суценья [19]	«Мультиагентные системы (МАС) — это системы, состоящие из нескольких взаимодействующих между собой автономных агентов. Каждый агент может взаимодействовать с другими агентами и окружающей средой для достижения определенных целей»
К. С. Амелин, Н. О. Амелина, О. Н. Граничин, В. И. Кияев [20]	«В основе мультиагентного подхода лежит понятие мобильного программного агента, который реализован и функционирует как самостоятельная специализированная компьютерная программа или элемент искусственного интеллекта»

Таблица 8

Проекты компании «Разумные решения»

Название проекта	Предметная область	Описание
Smart Airport	Управление наземными сервисами аэропорта	Система моделирует наземные сервисы, предоставляемые аэропортом, например подачу трапа, доставку багажа на борт самолета работниками аэропорта, доставку пассажиров на борт самолета и т. п.
Smart Truck	Управление грузоперевозками транспортно-экспедиционных компаний	Система предоставляет интеллектуальную помощь диспетчерам и заказчикам компании. Система способна распределять, планировать и оптимизировать заказы, контролировать местоположение ресурсов на электронной карте, помогать клиентам вводить заявки и отслеживать их выполнение с помощью электронной карты и многое другое
Smart Factory	Внутрицеховое планирование	Система способна проводить оперативное планирование и оптимизацию ресурсов цеха, включая трудовые и материальные ресурсы
Smart Aerospace	Планирование грузопотоков Международной космической станции	Система рассчитывает объемы и планирует поставки грузов на станцию с учетом их размещения. Кроме того, она способна планировать деятельность экипажа станции и разрабатывать программы полета
Smart Railways	Планирование движения поездов	На основе суточного графика система создает расписание движения поездов или пересчитывает уже существующие графики с учетом приоритетов поездов, закрытия перегонов или задержек движения

В настоящее время в России и за рубежом уже реализуются проекты по разработке МАС для управления дорожным движением и повышением его безопасности. В нашей стране, в частности, реализацией таких проектов занимается самарская научно-производственная компания «Разумные решения» [22, 23]. Проекты (табл. 8) охватывают многие сферы планирования и моделирования транспортного бизнеса: наземные сервисы аэропортов, грузоперевозки (в том числе для Международной космической станции), внутрицеховое планирование, планирование движения поездов и другие.

В Великобритании реализацией проектов на основе интеллектуальных агентов занимается компания Magenta Technologies [24]. Проекты в первую очередь направлены на управление заказами и перевозками (табл. 9).

Рассмотрим использование МАС, имеющих потенциал в области развития транспортно-логистических систем. К примеру, в систему ЦКАД в Москве можно внедрить «умного» агента со способностью к обучению (рис. 2), который будет отвечать за обработку дорожно-транспортных происшествий (ДТП): такой агент будет получать информацию с камер и датчиков на ЦКАД в режиме реального времени, оперативно устанавливать факт аварии и анализировать ее характеристики. При возникновении аварии агент будет заносить данные о происшествии в базу: дату, время, место, тяжесть аварии, количество участников аварии, причину аварии (при должном обучении агента), сохранять ссылки на записи с камер. Также агент может формировать и отправлять заявки/уведомления о ДТП оператору с характеристиками аварии и перечнем

Таблица 9

Проекты Magenta Technologies

Предметная область использования системы	Описание
Планирование и управление заказами в реальном времени	Система способна автоматически составлять расписание для выполнения заказов с учетом местоположения заказов и транспортных средств, смен прицепов, сложных перекрестных стыковок. Система планирования взаимодействует с онлайн-платформой, где клиенты могут формировать свои заказы и отслеживать их
Динамическое планирование перевозок пациентов	Система облегчает процесс заказа транспортировки пациентов медперсоналу больниц за счет автоматического динамического планирования в реальном времени
Управление перевозками	Система предоставляет поддержку для принятия решений при составлении расписаний. Кроме того, она обеспечивает защищенную среду для обмена информацией между клиентами и субподрядчиками

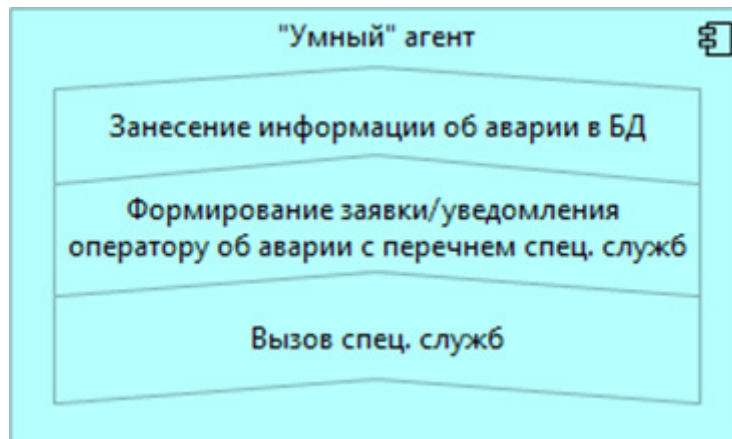


Рис. 2. Пример «умного» агента для ЦКАД

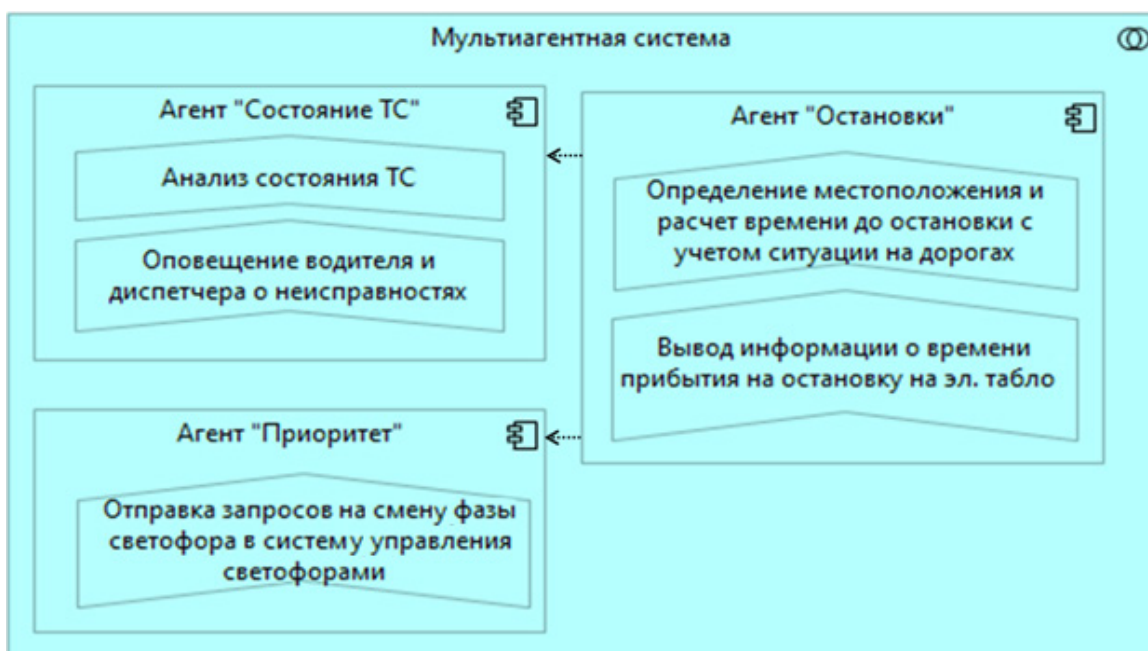


Рис. 3. Пример МАС для общественного транспорта

служб, которые необходимо вызвать. Более того, при дополнительном обучении такой агент сможет самостоятельно вызывать соответствующие службы для устранения последствий ДТП.

Для общественного транспорта можно разработать прототип мультиагентной системы (рис. 3).

Агент «Состояние ТС» анализирует состояние транспортных средств на наличие сбоев и поломок. При обнаружении неисправностей агент отправляет тип сбоя/поломки и их критичность водителю и диспетчеру. Всего можно определить 3 уровня критичности: 1) не критично — можно продолжить путь по маршруту; 2) критично — необходимо высадить пассажиров

на остановке и проследовать в автопарк; 3) особо критично — необходимо остановить транспортное средство, высадить пассажиров и вызвать ремонтную бригаду.

Агент «Остановки» определяет местоположение транспортного средства и рассчитывает время прибытия на следующую остановку с учетом текущей ситуации на дороге. Информацию о времени прибытия он будет отправлять на электронное табло внутри автобуса/троллейбуса/трамвая, а также на электронное табло на остановке.

Агент «Приоритет» при приближении общественного транспортного средства к светофору на определенном расстоянии отправляет запрос на

смену фазы светофора в систему управления светофорами.

В данном примере мы видим возможность использования истинно интеллектуальных агентов, которые самостоятельно принимают комплексные решения об управлении фазами светофора и информировании о времени прибытия на остановках общественного транспорта. При этом в рассмотренной МАС агент «Состояние ТС» является сотрудничающим агентом. Несмотря на то, что он не обучается самостоятельно, в случае поломки (в том числе в результате ДТП) этот агент оперативно передаст данные о происшествии агенту «Остановки», который пересчитает время и контрольные точки прохождения маршрута.

Агент «Приоритет» также участвует в работе агента «Остановки», так как при предоставлении приоритета общественному транспорту сокращается длительность маршрута, о которой агент «Остановки» должен проинформировать пассажиров и пешеходов.

Кроме того, в России активно развивается ряд разработок в сфере МАС. Первый — FractalGPT [25]. Это мультиагентный искусственный интеллект, позволяющий создавать ИИ-сотрудников, работа которых состоит из сложных задач, меняющихся в реальном времени. С его помощью можно разработать ИИ-оператора системы или ИИ-диспетчера автопарка.

Вторым является ROGEMA (Partially-Observable Grid Environment for Multiple Agents) от компании AIRI. Это открытый бенчмарк, предназначенный для оценки, анализа и сравнения алгоритмов для задач многоагентного планирования. Эта среда может быть адаптирована и настроена под различные PO-MAPF (задача поиска путей для множества агентов в условиях частичной наблюдаемости) [14].

Третий — Albato от компании Yandex. Это no-code-сервис, который позволяет настроить собственную интеграцию между сервисами, например amoCRM с «Яндекс Метрикой», «Битрикс24» с «Яндекс Аудиторией» и MindBox, Trello с YandexGPT и Google Sheets. На текущий момент Albato предлагает интеграцию с более чем 800 сервисами [14, 26].

Гибридное платформенное решение

Особый интерес в качестве дальнейшего развития данных идей может представлять гибридное платформенное решение (ГПР), объединяющее различные технологические подходы для повышения эффективности управления дорожно-транспортной инфраструктурой и состоящее из следующих компонентов:

- интеллектуальных агентов, взаимодействующих в мультиагентной системе;
- технологий искусственного интеллекта;
- технологий автоматизации бизнес-процессов с помощью программных роботов (Robotic process automation, RPA).

В таком гибридном платформенном решении МАС могла бы отвечать, в качестве центра управления, за мониторинг и диспетчеризацию, ИИ — за анализ данных и подготовку вариантов решений, RPA — за выполнение рутинных операций. При этом ГПР должно включать в себя весь необходимый набор инструментов и обеспечивать непрерывное взаимодействие компонентов на основе комплексной математической модели и микросервисной архитектуры.

Функционирование предлагаемого ГПР можно представить следующим образом. Мультиагентная система, выступая в роли распределенного центра управления, непрерывно получает данные о текущем состоянии дорожной инфраструктуры: с датчиков трафика, камер видеонаблюдения, интеллектуальных светофоров, транспортных средств, аварийных служб и от других агентов. Каждый агент в МАС отвечает за определенный участок дороги или тип информации, обменивается данными с другими агентами и принимает локальные решения на основе заданных правил и текущей дорожной обстановки. Полученные данные агрегируются и передаются модулям искусственного интеллекта для более глубокого анализа.

ИИ-компонент является аналитическим ядром системы и выполняет интеллектуальную обработку и анализ полученных данных, выявляя аномалии трафика, прогнозируя формирование заторов и вероятность возникновения аварийных ситуаций. На основе аналитических выводов ИИ предлагает

оптимальные сценарии реагирования, которые передаются обратно в мультиагентную систему. Взаимодействие ИИ- и МАС-компонентов позволяет интеллектуальным агентам адаптироваться к постоянно изменяющимся условиям, динамически корректируя свои стратегии поведения.

Интеллектуальные агенты МАС принимают полученные от ИИ-компонента рекомендации и, координируя между собой свои действия, организуют диспетчеризацию: перестраивают световые циклы, регулируют направление потоков транспорта, информируют водителей о сложной дорожной обстановке, оптимизируют движение общественного транспорта, инициируют вызов экстренных служб в случае инцидентов.

В свою очередь, RPA-компонент на основе полученного от ИИ анализа и непрерывно поступающей от МАС информации автоматизирует административные и операционные процессы, рассылая различные уведомления участникам дорожного движения, регистрируя и сопровождая аварийные заявки, уведомляя различные дорожные службы и выполняя прочие рутинные операции. Таким образом, RPA значительно ускоряет выполнение рутинных задач, снижая нагрузку на операторов и ускоряя процесс принятия решений.

Стоит отметить, что, несмотря на существование отдельных научных исследований, посвященных возможности частичной интеграции описанных компонентов (например, [27–29]), известное авторам комплексное решение, объединяющее все представленные компоненты (ИА в МАС, ИИ и RPA), подобное предложенному гибриднему платформенному решению, в настоящий момент отсутствует.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Smart Road Book — The Intelligent Road That Runs with Progress. 156 p. URL: [http://www.stradeanas.it/sites/default/files/pdf/Smart_Book_\(eng\).pdf](http://www.stradeanas.it/sites/default/files/pdf/Smart_Book_(eng).pdf) (дата обращения: 20.05.2023).
2. Virginia Smart Roads // Virginia Tech Transportation Institute. URL: <http://www.vtti.vt.edu/facilities/virginia-smart-roads.html> (дата обращения: 04.03.2025).
3. Mobile Monitoring of Selected Elements of Public Space in the Capital City of Prague // Smart Prague. URL: http://smartprague.eu/projects/mobile_monitoring_of_selected_elements_of_public_space_in_the_capital_city_of_prague (дата обращения: 10.06.2023).
4. Smartroad Gotland. URL: <http://www.smartroadgotland.com> (дата обращения: 20.05.2023).

Заключение

В процессе анализа международных проектов внедрения и использования интеллектуальных систем на транспорте было выявлено большое количество стратегически значимых проектов, направленных как на анализ и исследование дорожных ситуаций, так и на совершенствование дорожно-транспортной инфраструктуры, оптимизацию и повышение безопасности дорожного движения. Многие проекты нацелены не только на повышение безопасности, но и на улучшение экологии за счет использования альтернативных источников энергии.

Российская Федерация также является одним из лидеров внедрения и использования интеллектуальных систем на транспорте. Анализ зарубежного опыта в решении различных задач цифровизации и цифровой трансформации на транспорте позволит сформировать в России новый пул задач, определить направления инновационного развития и ускорить интеллектуализацию дорожно-транспортной системы в целом. Особенно интересен здесь опыт реализации инновационных проектов дорожно-транспортной инфраструктуры в Китайской Народной Республике. Благодаря наработкам иностранных и российских специалистов в будущем появится возможность запустить беспилотный общественный транспорт и в других странах, повысив общий уровень безопасности дорожного движения. Кроме того, подобные проекты способны обеспечить нас возобновляемыми источниками энергии, которые сократят количество выбросов вредных веществ в атмосферу.

5. Alonso T. Recovering Energy from Traffic: Positive Energy Roads // Tomorrow.City. 2020. 27 November. URL: <https://tomorrow.city/a/recovering-energy-from-traffic-positive-energy-roads> (дата обращения: 04.03.2025).
6. Pérez de Lema M. Nuevas Formas de Generación // Energética XXI. 2014. No. 146. Pp. 84–86.
7. Martínez Eukliadias M. Smart Tunnel: What Is It, How Does It Work and the Real Example of Malaysia // Tomorrow.City. 2021. 16 July. URL: <http://tomorrow.city/smart-tunnel> (дата обращения: 04.03.2025).
8. Now in China, Smart Roads That Talk to Driverless Cars // NDTV World. 2021. 14 January. URL: <http://www.ndtv.com/world-news/chinas-huawei-develops-smart-roads-that-talk-to-driverless-cars-2352262> (дата обращения: 04.03.2025).
9. В пражских трамваях появится автопилот // Винегрет. 2016. 14 апреля. URL: <http://www.vinegret.cz/29676/v-prazhskih-tramvayah-poyavitsya-avtopilot> (дата обращения: 19.08.2023).
10. Solar Roadways. URL: <http://solarroadways.com> (дата обращения: 20.05.2023).
11. 5 Top Smart Road Solutions impacting Smart Cities // StartUs Insights. URL: <http://www.startus-insights.com/innovators-guide/5-top-smart-road-solutions-impacting-smart-cities> (дата обращения: 20.05.2023).
12. Центральная кольцевая автомобильная дорога. URL: <http://centralroad.ru> (дата обращения: 20.05.2023).
13. Меньше пробок, выше безопасность: как в России внедряется V2X // NTI Platform. 2022. 26 сентября. URL: <http://vc.ru/transport/508506-menshe-probok-vyshe-bezopasnost-kak-v-rossii-vnedryaetsya-v2x> (дата обращения: 20.05.2023).
14. 10 трендов искусственного интеллекта 2024. Ассоциация ФинТех, 2024. 45 с. URL: http://cifrastroy.ru/uploads/files/10_Trendov_II.PDF (дата обращения: 26.02.2025).
15. Алибеков Б. И., Мамаев Э. А. Мультиагентные системы в логистике: информационно-аналитические аспекты // Вестник Дагестанского государственного университета. Серия 1. Естественные науки. 2017. Т. 32, Вып. 4. С. 56–62. DOI: 10.21779/2542-0321-2017-32-4-56-62.
16. Морозова Ю. А. Мультиагентные системы в логистике: анализ опыта и перспективы // Логистика и управление цепями поставок. 2015. № 2 (67). С. 69–76.
17. ГОСТ Р 59277—2020. Системы искусственного интеллекта. Классификация систем искусственного интеллекта = Artificial intelligence systems. Classification of artificial intelligence systems: национальный стандарт Российской Федерации: введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 23 декабря 2020 г. № 1372-ст: дата введения 2021-03-01. М.: Стандартинформ, 2021. 15 с.
18. Гуревич Л. А., Вахитов А. Н. Мультиагентные системы // Введение в Computer Science: открытый студенческий семинар (Санкт-Петербург, Россия, декабрь 2004 — май 2005). URL: http://masters.donntu.ru/2012/fknt/stropalov/library/pdf/multiagent_system.pdf (дата обращения: 17.03.2025).
19. Кокаев А. Э., Суценья Р. В. Области применения и платформы для разработки мультиагентных систем. Свойства мультиагентных систем // Вестник науки. 2023. № 7 (64), Т. 5. С. 219–222.
20. Разработка приложений для мобильных интеллектуальных систем на платформе Intel Atom: учебное пособие / К. С. Амелин, Н. О. Амелина, О. Н. Граничин, В. И. Кияев. 2-е изд. М.: ИНТУИТ, 2016. 201 с.
21. Nwana H. S. Software Agents: An Overview // Knowledge Engineering Review. 1996. Vol. 11, No. 3. Pp. 205–244. DOI: 10.1017/S026988890000789X.
22. Кияев В. И., Дятлов К. А. Использование IoT-технологий для мониторинговых систем в хозяйственной деятельности // Гипотеза. 2020. № 2 (11). С. 17–25.
23. Adaptive Planning for Supply Chain Networks / M. Andreev, G. Rzevski, P. Skobelev [et al.] // Holonic and Multi-Agent Systems for Manufacturing (HoloMAS 2007): Proceedings of the Third International Conference on Industrial Applications of Holonic and Multi-Agent Systems (Regensburg, Germany, 03–05 September 2007) / V. Mařík [et al.] (eds.). Heidelberg: Springer, 2007. Pp. 215–224. DOI: 10.1007/978-3-540-74481-8_21.
24. Solutions // Magenta Technology. URL: <http://magenta-technology.com/category/solutions> (дата обращения: 24.07.2023).
25. FractalAgentsAI. URL: <http://fractalagents.ai> (дата обращения: 26.02.2025).
26. Albato. URL: <http://albato.ru> (дата обращения: 26.02.2025).

27. Загорская К. Р., Иванова И. В. Синергия RPA и искусственного интеллекта // Дневник науки. 2023. № 11 (83). 11 с. DOI: 10.51691/2541-8327_2023_11_8.

28. A Comprehensive Review on Artificial Intelligence (AI) and Robotic Process Automation (RPA) for the Development of Smart Cities / J. K. Ray, R. Sultana, R. Bera [et al.] // Confluence of Artificial Intelligence and Robotic Process Automation / S. Bhattacharyya [et al.] (eds.). Singapore: Springer, 2023. Pp. 289–311. DOI: 10.1007/978-981-19-8296-5_12.

29. Van Tan V., Yi M.-J. A Multi-Agent System Based Approach to Intelligent Process Automation Systems // Principles of Practice in Multi-Agent Systems (PRIMA 2009): Proceedings of the 12th International Conference (Nagoya, Japan, 14–16 December 2009) / J.-J. Yang [et al.] (eds.). Heidelberg: Springer-Verlag, 2009. Pp. 428–442. DOI: 10.1007/978-3-642-11161-7_30.

Дата поступления: 19.03.2025

Решение о публикации: 02.04.2025

Smart Roads: The Use of Intelligent Systems and Multi-Agent Technologies

Viktor A. Andrienko¹ — Senior Lecturer, Department of System Programming. Research interests: artificial intelligence, intelligent agents, multi-agent systems, automation of development and quality assurance of complex software products, architecture and design of information systems, digital transformation, intelligent transportation systems. E-mail: winwork@mail.ru

Vladimir I. Kiyayev² — PhD in Physics and Mathematics, Professor of the Department of Computer Science. Research interests: development of complex systems, systems and process approaches, metrology and quality, smart agents and multi-agent systems, digital transformation, hybrid systems. E-mail: kiyayev@mail.ru

Sofiya A. Kotova² — 2nd year Master's Degree Student, 09.04.03 Direction of study “Applied computer science”. Research interests: artificial intelligence, multi-agent systems, intelligent transportation systems. E-mail: soniakotova2000@yandex.ru

¹Saint Petersburg State University, 7/9, Universitetskaya emb., Saint Petersburg, 190034, Russia

²Saint Petersburg State Economic University, 30–32, Griboyedov canal emb., Saint Petersburg, 191023, Russia

For citation: Andrienko V. A., Kiyayev V. I., Kotova S. A. Smart Roads: The Use of Intelligent Systems and Multi-Agent Technologies. *Intellectual Technologies on Transport*, 2025, No. 2 (42), Pp. 5–19. DOI: 10.20295/2413-2527-2025-242-5-19. (In Russian)

Abstract. An overview of international “smart road” projects is presented and the importance of using artificial intelligence and multi-agent systems for the further development of the road transport system is shown. **Purpose:** to study and analyze the international experience of implementing smart roads projects and their prospects for using multi-agent systems. **Results:** a comparative analysis of the existing projects has demonstrated their diversity and significance and allowed grouping them by scale and focus. Modern practices have demonstrated the effectiveness of artificial intelligence and multi-agent systems in road transport management. **Practical significance:** digitalization and intellectualization of the road transport system in order to increase traffic efficiency and road safety.

Keywords: smart roads, Vehicle-to-Everything, artificial intelligence, intelligent agent, multi-agent system, robotic process automation, road transport system, logistics, intelligent transport system, road safety, vision zero

REFERENCES

1. Smart Road Book — The Intelligent Road That Runs with Progress. 156 p. Available at: [http://www.stradeanas.it/sites/default/files/pdf/Smart_Book_\(eng\).pdf](http://www.stradeanas.it/sites/default/files/pdf/Smart_Book_(eng).pdf) (accessed: May 20, 2023).

2. Virginia Smart Roads, *Virginia Tech Transportation Institute*. Available at: <http://www.vtti.vt.edu/facilities/virginia-smart-roads.html> (accessed: March 04, 2025).
3. Mobile Monitoring of Selected Elements of Public Space in the Capital City of Prague, *Smart Prague*. Available at: http://smartprague.eu/projects/mobile_monitoring_of_selected_elements_of_public_space_in_the_capital_city_of_prague (accessed: 10.06.2023).
4. Smartroad Gotland. Available at: <http://www.smartroadgotland.com> (accessed: May 20, 2023).
5. Alonso T. Recovering Energy from Traffic: Positive Energy Roads, *Tomorrow.City*. Published online November 27, 2020. Available at: <https://tomorrow.city/a/recovering-energy-from-traffic-positive-energy-roads> (accessed: March 04, 2025).
6. Pérez de Lema M. Nuevas Formas de Generación, *Energética XXI*, 2014, No. 146, Pp. 84–86. (In Spanish)
7. Martínez Euklidiadas M. Smart Tunnel: What Is It, How Does It Work and the Real Example of Malaysia, *Tomorrow.City*. Published online July 16, 2021. Available at: <http://tomorrow.city/smart-tunnel> (accessed: March 04, 2025).
8. Now in China, Smart Roads That Talk to Driverless Cars, *NTDV World*. Published online January 14, 2021. Available at: <http://www.ndtv.com/world-news/chinas-huawei-develops-smart-roads-that-talk-to-driverless-cars-2352262> (accessed: March 04, 2025).
9. V prazhskikh tramvayakh poyavitsya avtopilot [Prague trams to have autopilot], *Vinegret*. Published online April 14, 2016. Available at: <http://www.vinegret.cz/29676/v-prazhskih-tramvayah-poyavitsya-avtopilot> (accessed: August 19, 2023). (In Russian)
10. Solar Roadways. Available at: <http://solarroadways.com> (accessed: May 20, 2023).
11. 5 Top Smart Road Solutions impacting Smart Cities, *StartUs Insights*. Available at: <http://www.startus-insights.com/innovators-guide/5-top-smart-road-solutions-impacting-smart-cities> (accessed: May 20, 2023).
12. Tsentralnaya koltsevaya avtomobilnaya doroga [Central Ring Road]. Available at: <http://centralroad.ru> (accessed: May 20, 2023). (In Russian)
13. Menshe probok, vyshe bezopasnost: kak v Rossii vnedryaetsya V2X [Fewer traffic jams, more safety: how V2X is being implemented in Russia], *NTI Platform*. Published online September 26, 2022. Available at: <http://vc.ru/transport/508506-menshe-probok-vyshe-bezopasnost-kak-v-rossii-vnedryaetsya-v2x> (accessed: May 20, 2023). (In Russian)
14. 10 trendov iskusstvennogo intellekta 2024 [10 Artificial Intelligence Trends 2024]. FinTech Association, 2024, 45 p. Available at: http://cifrastroy.ru/uploads/files/10_Trendov_II.PDF (accessed: February 26, 2025). (In Russian)
15. Alibekov B. I., Mamaev E. A. Multiagentnye sistemy v logistike: informatsionno-analiticheskie aspekty [Multi-Agent Systems of Logistics: Information and Analytical Aspects], *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 1. Estestvennyye nauki [Herald of Dagestan State University. Series 1. Natural Sciences]*, 2017, Vol. 32. Iss. 4, Pp. 56–62. DOI: 10.21779/2542-0321-2017-32-4-56-62. (In Russian)
16. Morozova Yu. A. Multiagentnye sistemy v logistike: analiz opyta i perspektivy [Multi-agent systems in logistics: analysis of experience and prospects], *Logistika i upravlenie tsepyami postavok [Logistics and Supply Chain Management]*, 2015, No. 2 (67), Pp. 69–76. (In Russian)
17. GOST R 59277—2020. Sistemy iskusstvennogo intellekta. Klassifikatsiya sistem iskusstvennogo intellekta [GOST R 59277—2020. Artificial intelligence systems. Classification of artificial intelligence systems]. Effective from March 01, 2021. Moscow, StandartInform Publishing House, 2021, 15 p. (In Russian)
18. Gurevich L. A., Vakhitov A. N. Multiagentnye sistemy [Multi-Agent Systems], *Vvedenie v Computer Science: otkrytyy studencheskiy seminar [Introduction to Computer Science: An Open Student Seminar]*, Saint Petersburg, Russia, December 2004–May 2005. Available at: http://masters.donntu.ru/2012/fknt/stropalov/library/pdf/multiagent_system.pdf (accessed: March 17, 2025). (In Russian)
19. Kokaev A. E., Sushchenya R. V. Oblasti primeneniya i platformy dlya razrabotki multiagentnykh sistem. Svoystva multiagentnykh sistem [Areas of Application and Platforms for the Development of Multi-Agent Systems. Properties of Multi-Agent Systems], *Vestnik Nauki*, 2023, No. 7 (64), Vol. 5, Pp. 219–222. (In Russian)

20. Amelin K. S., Amelina N. O., Granichin O. N., Kiyayev V. I. Razrabotka prilozheniy dlya mobilnykh intellektualnykh sistem na platforme Intel Atom: uchebnoe posobie [Developing Applications for Mobile Intelligent Systems on the Intel Atom Platform: A Tutorial]. Moscow, INTUIT, 2016, 201 p. (In Russian)
21. Nwana H. S. Software Agents: An Overview, *Knowledge Engineering Review*, 1996, Vol. 11, No. 3, Pp. 205–244. DOI: 10.1017/S026988890000789X.
22. Kiyayev V. I., Diatlov K. A. Ispolzovanie IoT-tekhnologiy dlya monitoringovykh sistem v khozyaystvennoy deyatelnosti [Use of IoT Technologies for Monitoring Systems in Economic Activity], *Gipoteza [Hypothesis]*, 2020, No. 2 (11), Pp. 17–25. (In Russian)
23. Andreev M., Rzhhevski G., Skobelev P., et al. Adaptive Planning for Supply Chain Networks. In: *Mařík V., et al. (eds.) Holonic and Multi-Agent Systems for Manufacturing (HoloMAS 2007): Proceedings of the Third International Conference on Industrial Applications of Holonic and Multi-Agent Systems, Regensburg, Germany, September 03–05, 2007*. Heidelberg, Springer, 2007, Pp. 215–224. DOI: 10.1007/978-3-540-74481-8_21.
24. Solutions, *Magenta Technology*. Available at: <http://magenta-technology.com/category/solutions> (accessed: July 24, 2023).
25. FractalAgentsAI. Available at: <http://fractalagents.ai> (accessed: February 26, 2025). (In Russian)
26. Albato. Available at: <http://albato.ru> (accessed: February 26, 2025). (In Russian)
27. Zagorskaya K. R., Ivanova I. V. Sinergiya RPA i iskusstvennogo intellekta [Synergy of RPA and Artificial Intelligence], *Dnevnik Nauki*, 2023, No. 11(83), 11 p. DOI: 10.51691/2541-8327_2023_11_8. (In Russian).
28. Ray J. K., Sultana R., Bera R., et al. A Comprehensive Review on Artificial Intelligence (AI) and Robotic Process Automation (RPA) for the Development of Smart Cities. In: *Bhattacharyya S., et al. (eds.) Confluence of Artificial Intelligence and Robotic Process Automation*. Singapore, Springer, 2023, Pp. 289–311. DOI: 10.1007/978-981-19-8296-5_12.
29. Van Tan V., Yi M.-J. A Multi-Agent System Based Approach to Intelligent Process Automation Systems. In: *Yang J.-J., et al. (eds.) Principles of Practice in Multi-Agent Systems (PRIMA 2009): Proceedings of the 12th International Conference, Nagoya, Japan, December 14–16, 2009*. Heidelberg, Springer-Verlag, 2009, Pp. 428–442. DOI: 10.1007/978-3-642-11161-7_30.

Received: 19.03.2025

Accepted: 02.04.2025