

Научная статья
УДК 004.89: 658.7

Аналитика и типизация агентов мультиагентной модели для логистической системы

Илья Андреевич Фролов¹, Валерия Владимировна Шевцова²,
Вячеслав Николаевич Белобжецкий³

¹Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ),
Москва, Россия

^{2,3}Общество с ограниченной ответственностью Передовые компрессорные технологии
(ООО «ПКТ»), г. Долгопрудный, Россия

¹if@incomair.ru

²vsh@incomair.ru

³vb@incomair.ru

Аннотация. В статье анализируются подходы к типизации агентов мультиагентных моделей в контексте комбинированных перевозок. Рассмотрены ролевой, функционально-архитектурный, поведенческий подходы и подход на основе цифровых двойников. Выявлена необходимость гибридной классификации, учитывающей бизнес-роли, функциональное назначение, уровень автономии, форму представления и уровень принимаемых решений. Предложена типологическая матрица агентов, позволяющая формализовать состав мультиагентной модели на этапе проектирования. Матрица может служить основой для разработки прикладных программных решений в логистике. Результаты исследования могут быть использованы при создании гибридных мультиагентных систем, сочетающих физические и виртуальные компоненты, что особенно актуально для цифровой трансформации логистической отрасли. Предложенный подход позволяет значительно повысить эффективность управления логистическими процессами за счёт децентрализации и адаптивности.

Ключевые слова: мультиагентные системы, типизация агентов, комбинированные перевозки, логистическая система, мультиагентное моделирование, типологическая матрица, цифровые двойники.

Для цитирования: Фролов И.А., Шевцова В.В., Белобжецкий В.Н. Аналитика и типизация агентов мультиагентной модели для логистической системы // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. 2026. № 1 (47).

Original article

Analytics and typification of agents of a multi-agent model for a logistics system

Ilya A. Frolov¹, Valeria V. Shevtsova², Vyacheslav N. Belobzhetsky³

¹Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow, Russia

^{2,3}Advanced Compressor Technologies LLC (PKT LLC), Dolgoprudny, Russia

¹if@incomair.ru

²vsh@incomair.ru

³vb@incomair.ru

Abstract. The article analyzes approaches to agent typification in multi-agent models in the context of combined transportation. The role-based, functional-architectural, behavioral approaches and the approach based on digital twins are considered. The necessity of hybrid classification taking into account business roles, functional purpose, level of autonomy, form of representation and level of decisions made is revealed. A typological matrix of agents is proposed, which makes it possible to formalize the composition of a multi-agent model at the design stage. The matrix can serve as a basis for the development of applied software solutions in logistics. The results of the study can be used in the creation of hybrid multi-agent systems combining physical and virtual components, which is especially relevant for the digital transformation of the logistics industry. The proposed approach can significantly increase the efficiency of logistics process management through decentralization and adaptability.

Keywords: multi-agent systems, agent typification, combined transportation, logistics system, multi-agent modeling, typological matrix, digital twins.

For citation: Frolov I.A., Shevtsova V.V., Belobzhetsky V.N. Analytics and typification of agents of a multi-agent model for a logistics system. *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura*. 2026. № 1 (47).

Введение

Современные логистические системы отличаются достаточно высокой степенью динамичности и стохастичности. Управление такими системами, особенно в сфере комбинированных перевозок, требует учета интересов множества независимых участников (грузовладельцев, перевозчиков, складов, терминалов), оперативного реагирования на сбои. Классические централизованные модели не всегда позволяют оперативно справляться с данными задачами, являются менее гибкими, а также исчерпали возможность повышения эффективности за счет процессов автоматизации.

Мультиагентный подход предлагает парадигму децентрализованного управления, где взаимодействие автономных программных единиц (агентов), обладающих знаниями и целями, позволяет эффективно моделировать и координировать сложные процессы. Где, в свою очередь мультиагентный подход будет выражаться в виде определённой мультиагентной модели, которая должна быть частью прикладного знания. С позиции

комбинированных перевозок данные термины можно определить следующим образом: мультиагентная система – это совокупность логистических агентов, которые находятся в единой сети, способны взаимодействовать друг с другом, принимать решения и координировать действия для достижения максимального выигрыша каждого агента. Мультиагентная модель находит выражение в качестве прикладного программного продукта, который за счёт принципов мультиагентной системы обеспечивает эффективность процесса организации мультимодальной или интермодальной перевозки, в реальном времени адаптируясь к изменениям во внешней среде и динамическим условиям для выбора наиболее эффективных схем маршрутов и типов транспортных средств.

Ключевым этапом проектирования любой мультиагентной системы является определение состава и ролей агентов – их типизация. От корректности типизации зависит адекватность модели, эффективность взаимодействий и, в конечном итоге, качество решений, получаемых с её помощью. Несмотря на достаточно обширную литературу по мультиагентным моделям, вопрос структурированной, прикладной типизации агентов именно для логистики остается открытым, что определяет актуальность данного исследования.

Целью данного исследования является аналитический обзор современных научных подходов к типизации агентов в мультиагентных моделях в части комбинированных перевозок. В ходе исследования необходимо решить задачи по анализу и систематизации основных критериев типизации агентов, а также разработать типологическую матрицу агентов для мультиагентных моделей в контексте комбинированных перевозок. В дальнейшем, данный подход по типизации необходимо применить непосредственно на этапе разработки самой модели, которая должна выражаться в виде прикладного ПО.

Методология и анализ подходов к типизации агентов

В ходе исследования применялись методы системного и сравнительного анализа для изучения мультиагентных подходов в части логистических систем как совокупности взаимосвязанных элементов и оценки различных подходов в части классификации агентов мультиагентных систем. Также можно выделить метод классификации, как инструмент матрицы типизации агентов мультиагентной модели.

Ранее было установлено, что агентами в мультиагентной системе с позиции комбинированных перевозок будут являться, объединённые субъекты представляющие интересы отдельных элементов всей цепи поставки. К агентам можно отнести, терминалы, склады, логистических провайдеров, порты, перевозчики и других участников перевозочного процесса. Каждый агент обладает определенными функциями, задачами и возможностями принятия решений, а также способностью взаимодействовать с другими агентами в рамках мультиагентной системы. Данное взаимодействие имеет определённое выражение, например, финансовое, которое в дальнейшем должно восприниматься мультиагентной моделью и оцениваться с позиции установленных ограничений. На рисунке 1 показана макро структура агентов в мультиагентной системе [6, с. 723-739].

Как можно заметить, автор [2, с. 662–667] выделяет множество видов агентов, а также критерии, по которым распределены агенты. С позиции логистики, данная структура не совсем подходит. Некоторые критерии и виды агентов нельзя выделить с позиции мультимодальных и интермодальных перевозок, но некоторые более чем подходят. Например, в качестве «статичных агентов» может использоваться СВХ с таможенным постом, так как данный объект-агент будет всегда находиться на одном месте с позиции многоагентной системы.

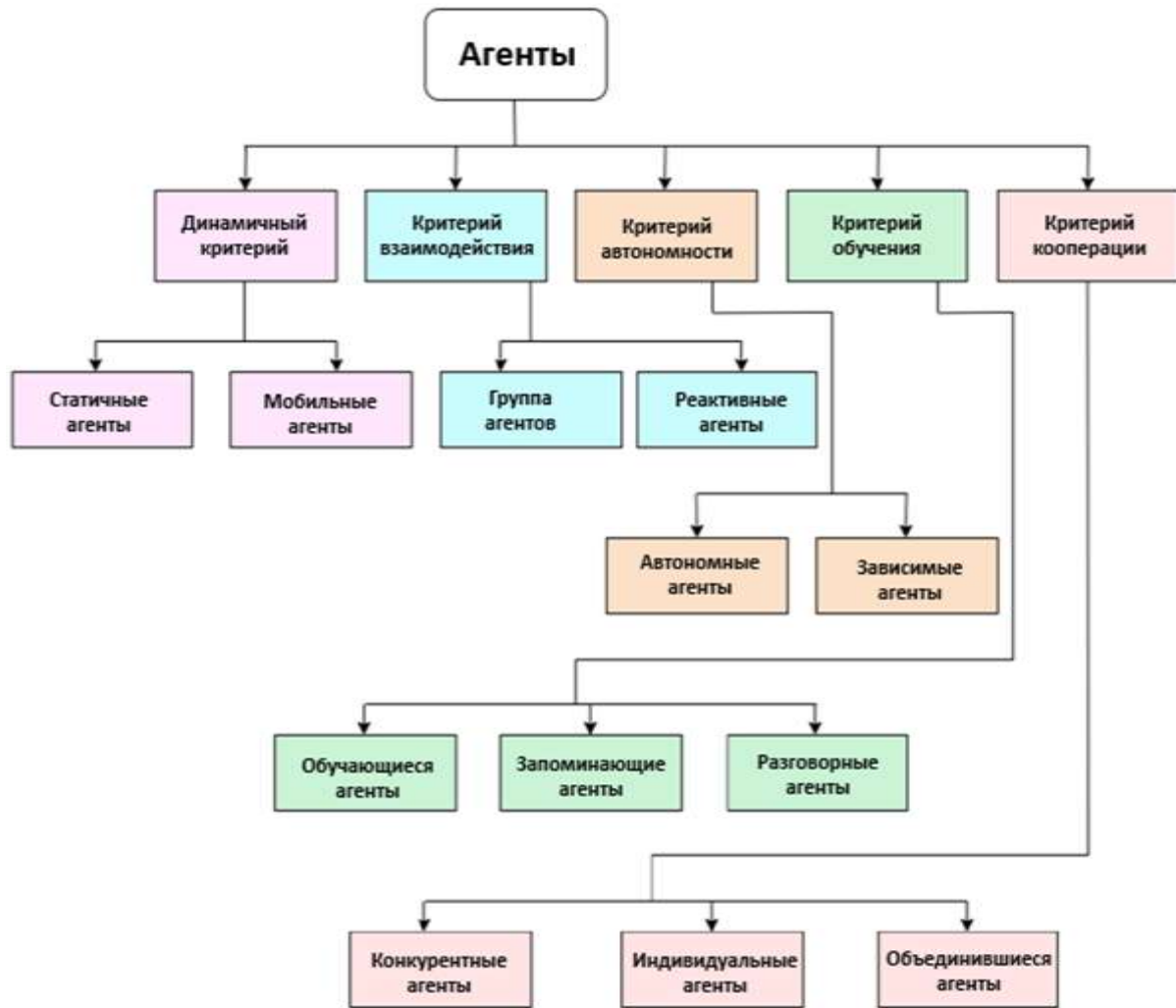


Рис. 1. Обобщённая структура видов агентов

В свою очередь, «мобильным агентом» может выступать порожний подвижной состав, который может использоваться в рамках организации комбинированной перевозки разными видами транспорта. С теоретической позиции, данная структура вполне логично описывает состав агентов и критерии распределения.

На рисунке 2 приведена схема функционирования агента.

Данная схема была приведена автором [3, с. 352] в работе про многоагентные системы с позиции «искусственного интеллекта». В целом, данная схема достаточно точно описывает основную логику работы агента, если рассматривать его как обособленную сущность.



Рис. 2. Схема функционирования агента

Возвращаясь к существующим подходам по типизации агентов в мультиагентных системах можно выделить следующие:

1. Подход на основе бизнес-ролей участников цепи поставок. Данный подход, широко применяемый в прикладных исследованиях, ориентирован на формальное представление реальных участников логистического рынка. Так, в работе [5, с. 2 405–2 415], посвящённой моделированию портовой логистики, в качестве агентов рассматриваются суда, терминальные объекты, службы буксировки и лоцманского сопровождения. В свою очередь, в исследованиях, посвящённых задачам городской логистики, агентная структура включает отправителей и получателей грузов, курьерские службы, а также логистических операторов.

2. Функционально-архитектурный подход. В данном подходе фокус смещается на роль агента внутри вычислительной системы. Выделяют:

интерфейсные агенты – взаимодействуют с пользователем или внешними системами. Например, агент оценки и принятия решения, агент конфигурации (виртуальная сущность), агент модели [1, с. 39–47]. Данные агенты являются виртуальным и представлены в виде программной части модели. Стоит отметить, что с позиции логистических систем, данные агенты не могут существовать обособленно от физических;

агенты-исполнители – являются физическими агентами, например, транспортный агент, складской агент или страховой агент;

управляющие агенты – отвечают за планирование, контроль, распределение задач [4, с. 75–82];

агенты-анализаторы – собирают данные, анализируют, формируют отчёты.

3. Подход, основанный на уровне автономии. Например, разделение агентов на реактивных и когнитивных. Где, реактивные агенты функционируют на основе простых правил, например, «стимул – реакция» и не обладают механизмами долгосрочного планирования. Когнитивные агенты, в свою очередь, реализуются в рамках архитектуры BDI (Beliefs, Desires, Intentions (модель убеждений, желаний и намерений)) и способны формировать цели, оценивать альтернативы и планировать собственные действия [7, с.170]. Для логистических систем характерно использование гибридных мультиагентных моделей, в которых ключевые участники процесса (например, агенты-перевозчики или планировщики) реализуются как когнитивные, тогда как вспомогательные агенты, представляющие ресурсы или объекты перевозки, обладают реактивным поведением.

4. Подход на основе цифровых двойников. Также, в некоторых исследованиях [5, с. 2 405–2 415] прослеживаются тенденции к реализации агентов через цифровых двойников (теневые агенты). Теневые агенты представляют собой цифровые копии физических объектов и используются для хранения и актуализации их состояния и параметров. Управляющие агенты, в отличие от них, не имеют прямого физического аналога и предназначены для реализации алгоритмов оптимизации и поддержки принятия решений. Воздействие таких агентов на физическую логистическую систему осуществляется опосредованно – через изменение состояний соответствующих теневых представлений [5, с. 2 405–2 415]. В данном контексте, скорее всего, речь про виртуальные агенты, которые могут

выполнять функции физических, но при этом оставаясь частью программного комплекса. Достаточно интересный подход, но на текущем этапе, особенно с позиции логистических систем, трудно представить реализацию данного подхода.

Разработка типологической матрицы агентов для мультиагентной модели

На основе анализа существующих подходов к типизации агентов в рамках данного исследования была разработана типологическая матрица агентов мультиагентной модели, ориентированной на задачи комбинированных перевозок. Предложенная матрица объединяет бизнес-ролевой, функционально-архитектурный, поведенческий и цифровой подходы к классификации агентов.

Каждый агент в модели описывается через совокупность характеристик, включая его роль в логистической системе, функциональное назначение внутри мультиагентной системы, уровень автономии принятия решений, форму цифрового представления и уровень управленческих решений. Данный подход позволяет отказаться от жёсткой однокритериальной классификации и формировать гибкие мультиагентные модели с позиции типизации агентов. В таблице 1 представлена типологическая матрица агентов.

Таблица 1

Типологическая матрица типизации агентов

Тип агента	Бизнес-роль	Функциональная роль	Уровень автономии	Форма представления	Уровень решений
Транспортный агент	Перевозчик	Исполнитель	Когнитивный	Физический	Операционный
Складской агент	Склад	Исполнитель	Гибридный	Физический	Операционный
Страховой агент	Страхование	Исполнитель	Реактивный	Физический	Операционный
Агент ТС	Транспорт	Исполнитель	Реактивный	Физический	Операционный
Агент логистического оператора	3PL	Управляющий	Когнитивный	Виртуальный	Тактический
Агент планирования	—	Управляющий	Когнитивный	Виртуальный	Тактический
Агент анализа	—	Аналитический	Когнитивный	Виртуальный	Тактический

Предложенная матрица в таблице 1 демонстрирует многомерный подход к типизации агентов. Такое структурирование позволяет дифференцировать физических агентов-исполнителей и виртуальных управляющих агентов, что обеспечивает гибкость мультиагентной модели применительно к задачам комбинированных перевозок.

Выводы. Проведённый анализ показал, что в современной научной литературе сформировалось несколько устойчивых подходов к типизации агентов в мультиагентных системах, включая ролевой, функционально-архитектурный, поведенческий и основанный на концепции цифровых двойников. Установлено, что данные подходы не являются взаимоисключающими, а дополняют друг друга, отражая различные аспекты одной и той же ситуации. Выявлена устойчивая тенденция к интеграции мультиагентного моделирования с концепциями киберфизических систем и цифровых двойников. Это обуславливает необходимость расширения традиционных классификаций агентов. В рамках исследования разработана типологическая матрица типизации агентов для мультиагентных моделей в контексте комбинированных перевозок.

Логистическая отрасль обладает достаточно выраженной предметной спецификой и описывать типизацию агентов мультиагентной системы в контексте логистической отрасли исключительно средствами вычислительных математических моделей невозможно. В отличие от, например, IT-систем, логистические процессы тесно связаны с физическими объектами, инфраструктурными ограничениями и регламентированными операциями, что обуславливает необходимость использования гибридного набора агентов, сочетающего реактивные, когнитивные, физически ориентированные и виртуальные управляющие компоненты в рамках одной мультиагентной модели. В связи с этим представляется целесообразным на последующих этапах исследований, посвящённых разработке мультиагентной модели логистических систем, включая прикладную программную часть, выделить отдельный методологический блок, направленный на формализацию и обоснование принципов гибридной типизации агентов. В

контексте мультиагентной модели в рамках логистических систем необходим конкретный гибридный набор агентов, задействованных в рамках функционирования модели.

Разработанная типологическая матрица агентов может быть использована на последующих этапах исследований в качестве методологической основы при проектировании мультиагентных моделей логистических систем, в том числе ориентированных на задачи комбинированных перевозок. Применение матрицы (типизации агентов мультиагентной модели) на концептуальной стадии разработки модели позволяет формализовать состав агентов, их роли, уровень автономии и форму цифрового представления до начала программной реализации, что снижает риск структурных ошибок и упрощает переход от аналитической модели к вычислительной.

Кроме того, предложенная типология может быть непосредственно использована при разработке прикладных программных решений, включая создание прототипов мультиагентных систем и цифровых двойников логистических процессов. Но также стоит учесть, что ранее представленный набор агентов может изменяться в ходе разработки. На более поздних этапах исследования матрица может быть расширена и уточнена с учётом результатов экспериментального моделирования.

Список источников

1. Белобжецкий, В. Н. Применение концепции мультиагентной модели для получения оптимальной конфигурации комбинированных перевозок / В. Н. Белобжецкий, И. А. Фролов // Логистика. – 2024. – № 7(212). – С. 39-47. – EDN EPGRHU.
2. Подкопаева, Д. А. Принятие решений в условиях риска и неопределенности в управлении / Д. А. Подкопаева, Л. Ф. Маслакова // Теория и практика современной науки. – 2017. – № 6(24). – С. 662-667. – EDN ZCNIQZ.
3. Тарасов, В. Б. От многоагентных систем к интеллектуальным организациям: философия, психология, информатика / В. Б. Тарасов. – Москва : УРСС, 2002. – 352 с. – (Науки об искусственном). – ISBN 5-8360-0330-0. – EDN ZQQRPP.
4. Dimitrov, R. Simulation Modelling of Multi-Agent Logistics Model in AnyLogistix Environment / R. Dimitrov // Science, Engineering and Education. – 2024. – Vol. 9, No. 1. – P. 75-82. – DOI 10.59957/see.v9.i1.2024.10. – EDN SZAMSE.

5. Digital Twin in Industry: State-of-the-Art / F. Tao, H. Zhang, A. Liu, A. Y. C. Nee // *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. – 2019. – Vol. 15, No. 4. – P. 2405-2415.
6. Goonatilleke, S. T. Past, Present and Future Trends in Multi-Agent System Technology / S. T. Goonatilleke, B. Hettige // *Journal Europeen des Systemes Automatises*. – 2022. – Vol. 55, No. 6. – P. 723-739. – DOI 10.18280/jesa.550604. – EDN HPOMKZ.
7. Digital transformation in the maritime transport sector / E. Tijan, M. Jović, S. Aksentijević, A. Pucihar // *Technological Forecasting and Social Change*. – 2021. – Vol. 170. – P. 120879. – DOI 10.1016/j.techfore.2021.120879. – EDN TRZOKH.

References

1. Belobzhetskiy V.N., Frolov I. A. *Logistika*, 2024, no. 7(212), pp. 39-47.
2. Podkopayeva D.A., Maslakova L. F. *Teoriya i praktika sovremennoy nauki*, 2017, no. 6(24), pp. 662-667.
3. Tarasov V.B. *Ot mnogoagentnykh sistem k intellektual'nym organizatsiyam: filosofiya, psikhologiya, informatika* (From Multi-Agent Systems to Intelligent Organizations: Philosophy, Psychology, Computer Science), Moscow, URSS, 2002, 352 p., ISBN 5-8360-0330-0.
4. Dimitrov R. Simulation Modelling of Multi-Agent Logistics Model in AnyLogistix Environment, *Science, Engineering and Education*, 2024, vol. 9, no. 1, pp. 75-82, doi 10.59957/see.v9.i1.2024.10.
5. Tao F., Zhang H., Liu A., Nee A.Y.C. Digital Twin in Industry: State-of-the-Art, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2019, vol. 15, no. 4, pp. 2405-2415.
6. Goonatilleke S.T., Hettige B. Past, Present and Future Trends in Multi-Agent System Technology, *Journal Europeen des Systemes Automatises*, 2022, vol. 55, no. 6, pp. 723-739, doi 10.18280/jesa.550604.
7. Tijan E., Jović M., Aksentijević S., Pucihar A. Digital transformation in the maritime transport sector, *Technological Forecasting and Social Change*, 2021, vol. 170, p. 120879, doi 10.1016/j.techfore.2021.120879.

Рецензент: Ю.А. Короткова, канд. техн. наук, доц., МАДИ

Информация об авторах

Фролов Илья Андреевич, аспирант, МАДИ.

Шевцова Валерия Владимировна, специалист по продажам, ООО «ПКТ».

Белобжецкий Вячеслав Николаевич, коммерческий директор, ООО «ПКТ».

Information about the authors

Frolov Ilya A., Postgraduate Student, MADI.

Shevtsova Valeria V., Sales Specialist, PKT LLC.

Belobzhetsky Vyacheslav N., Commercial Director, PKT LLC.

Статья поступила в редакцию 23.03.2026; одобрена после рецензирования 27.03.2026; принята к публикации 30.03.2026.

The article was submitted 23.03.2026; approved after reviewing 27.03.2026; accepted for publication 30.03.2026.