

Разработка архитектуры программного комплекса агентного моделирования интеллектуальных агроинженерных систем

М. И. Анчёков

Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук
360010, Россия, г. Нальчик, ул. Балкарова, 2

Аннотация. В статье представлена архитектура программного комплекса агентного моделирования для интеллектуальных сельскохозяйственных систем, ориентированная на моделирование взаимодействия роботов, растений и инфраструктуры в яблоневом саду. Система интегрирует физическую, сенсорную, эффекторную, энергетическую и вычислительную модели в единую дискретную трехмерную среду и поддерживает децентрализованное федеративное обучение без централизованного сервера. Особое внимание уделено автономности агентов, асинхронному выполнению симуляций и возможности интеграции с реальными датчиками и роботами.

Цель исследования – разработка архитектуры программного комплекса агентного моделирования, предназначенного для имитационного моделирования интеллектуальных интегрированных информационно-управляющих систем в условиях реальной, физически корректной, динамической и частично наблюдаемой среды.

Методы исследования. Основным методом исследования является агентное (мультиагентное) моделирование, которое позволяет имитировать взаимодействие автономных агентов в неопределенной и динамической среде. Для структурирования архитектуры и декомпозиции задач применяется объектно-ориентированное проектирование с использованием UML-нотации.

Результаты. Предложена архитектура программного комплекса, в которой учтены такие сущности, как моделируемый мир (World), агент (Agent), сущность (Entity), доска объявлений (Billboard) и вычислитель (Computer).

Выводы. Предложенная платформа обеспечит воспроизводимость экспериментов, масштабируемость и послужит основой для тестирования алгоритмов коллективного поведения в условиях неоднородной и ресурсоограниченной агросреды.

Ключевые слова: точное земледелие, имитационное моделирование, коллективная робототехника, федеративное обучение

Поступила 10.11.2025, одобрена после рецензирования 27.11.2025, принята к публикации 10.12.2025

Для цитирования. Анчёков М. И. Разработка архитектуры программного комплекса агентного моделирования интеллектуальных агроинженерных систем // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2025. Т. 27. № 6. С. 135–141. DOI: 10.35330/1991-6639-2025-27-6-135-141

MSC: 93A16

Original article

Development of a software architecture for agent-based modeling of intelligent agricultural systems

M.I. Anchekov

Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences
2, Balkarov street, Nalchik, 360010, Russia

Abstract. This article presents the architecture of an agent-based modeling software package for intelligent agricultural systems, focused on modeling the interactions between robots, plants, and infrastructure in an apple orchard. The system integrates physical, sensor, effector, energy, and computational models into a single discrete 3D environment and supports decentralized federated learning without a centralized server. Particular attention is paid to agent autonomy, asynchronous simulation execution, and the ability to integrate with real sensors and robots.

Aim. The study aims to develop the architecture of an agent-based modeling software package designed for simulating intelligent integrated information and control systems in a real, physically correct, dynamic, and partially observable environment.

Research methods. The primary research method is agent-based (multi-agent) modeling, which allows simulating the interaction of autonomous agents in an uncertain and dynamic environment. Object-oriented design using UML notation is used to structure the architecture and decompose tasks.

Results. A software architecture is proposed that takes into account entities such as a simulated World, Agent, Entity, Billboard, and Computer.

Conclusions. The proposed platform ensures the reproducibility of experiments, scalability, and serves as a basis for testing collective behavior algorithms in heterogeneous and resource-limited agricultural environments.

Keywords: precision agriculture, simulation modeling, collaborative robotics, federated learning

Submitted 10.11.2025,

approved after reviewing 27.11.2025,

accepted for publication 10.12.2025

For citation. Anchekov M.I. Development of a software architecture for agent-based modeling of intelligent agricultural systems. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2025. Vol. 27. No. 6. Pp. 135–141. DOI: 10.35330/1991-6639-2025-27-6-135-141

ВВЕДЕНИЕ

Глобализация оказывает существенное влияние на сельское хозяйство, ставя новые вызовы перед агропроизводителями. Одним из решений, повышающим эффективность процессов производства сельскохозяйственной продукции, является роботизация. Несмотря на то, что процесс роботизации способен существенно снизить себестоимость продукции, его внедрение является достаточно сложным и дорогим. Это в первую очередь связано с тем, что наибольший эффект проявляется при комплексной роботизации технологических цепочек. В такой ситуации возрастает актуальность систем пространственного моделирования, которые позволяют моделировать не только единичных роботов, но и коллективы роботов, выполняющих несколько видов сельскохозяйственных работ. Хотя в данной работе в качестве объекта моделирования выбран яблоневый сад, предложенная архитектура является предметно-независимой и может быть адаптирована для других агроэкосистем, включая зерновые культуры, как это рассматривалось ранее [1].

Предметом исследования является архитектура программной среды агентного моделирования, ориентированная на имитацию взаимодействия роботов, растений и инфраструктуры в яблоневом саду с поддержкой федеративного обучения.

Объектом исследования является процесс коллективного функционирования и распределенного обучения интеллектуальных агентов в агроинженерной экосистеме, включающей роботизированные комплексы, сенсорные станции, растения и элементы инфраструктуры яблоневого сада.

Целью исследования является разработка архитектуры программного комплекса агентного моделирования, предназначенного для имитационного моделирования интеллектуальных интегрированных информационно-управляющих систем в условиях реальной, физически корректной, динамической и частично наблюдаемой среды.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

На данный момент существует несколько систем агентного моделирования, позволяющих решать в том числе и задачи моделирования в сельском хозяйстве: NetLogo [2], MASON [3], Mesa [4], Repast [5], AnyLogic [6], JADE [7]. Однако эти системы имеют ряд недостатков: так, плохо реализуется возможность моделирования с помощью высокопроизводительных вычислителей, используются узкоспециализированные языки разработки, поддержка 3D-графики если и есть, то осуществляется через сторонние библиотеки, и т.д.

На содержательном уровне разрабатываемый программный комплекс должен:

- осуществлять имитационное моделирование таких активных сущностей, как роботы, сенсорные станции, деревья, сорняки, вредители, болезни, функционирующие как в одином режиме, так и в режиме коллектива, и взаимодействующие с окружающей средой;
- позволять интегрировать системы принятия решений активных сущностей через программный интерфейс и не привязываться к конкретным формализмам;
- интегрировать в единую архитектуру физическую, сенсорную, эффекторную, энергетическую и вычислительную модели;
- обеспечивать асинхронное, пошаговое и воспроизводимое выполнение симуляций, включая возможность сохранения и загрузки промежуточных состояний, удаленного мониторинга и управления через пользовательский интерфейс, а также последующую интеграцию с реальными аппаратными платформами и датчиками.

Для дальнейшей формализации разработки опишем функциональные требования к программному комплексу в виде моделей.

Модель пространства. Все моделируемые сущности должны находиться в 3D-пространстве с целочисленными координатами. Предельные размеры определяются в процессе инициализации вычислительного эксперимента.

Каждая ячейка пространства может быть занята одним или несколькими объектами, при этом система отслеживает пространственную семантику: тип поверхности (грунт, асфальт, вода), высоту рельефа, микроклиматическую зону (тень/солнце), тип почвы и другие атрибуты, влияющие на поведение агентов. Для повышения вычислительной эффективности могут использоваться иерархические структуры хранения (например, октодерево или хэш-карта по координатам), обеспечивающие быстрый доступ к соседним ячейкам и проверку коллизий. Модель пространства должна поддерживать динамическое создание и удаление объектов, что позволяет имитировать рост растений, появление вредителей или размещение новых роботов в ходе симуляции.

Модель времени. Время должно быть дискретным, разбитым на такты, каждый из которых соответствует фиксированному интервалу модельного времени. Все активные сущности (агенты) функционируют в рамках этого времени, но выполнение их действий происходит асинхронно: агенты могут обрабатывать свои циклы восприятия, принятия решений и действия независимо, с учетом внутренних задержек, энергетических ограничений или приоритетов задач. Такой подход позволит избежать жесткой синхронизации, которая в масштабных симуляциях может приводить к искусственным задержкам и снижению реалистичности поведения. При этом система должна гарантировать консистентность состояния мира на каждом такте: все изменения, инициированные агентами в рамках одного шага, применяются атомарно или через механизм транзакций, чтобы избежать гонки данных. Модель времени также должна поддерживать управление скоростью симуляции, а также сохранять временные метки для всех событий, данных и решений, что важно для последующего анализа, воспроизведения экспериментов и синхронизации с потоками реальных данных из внешней среды.

Физическая модель основывается на том, что моделируемые объекты могут быть как активными сущностями (агенты) и передвигаться по пространству (роботы, вредители, болезни, сорняки и т.д.), так и пассивными сущностями, которые не проявляют динамическое

поведение, связанное с перемещениями в пространстве. Физическая модель описывает материальное воплощение всех объектов в пространстве и определяет правила их взаимодействия. Каждый объект должен обладать формой (множество занятых ячеек), массой, прочностью, подвижностью и другими физическими свойствами, необходимыми для симуляции. Для агентов, способных к перемещению, должна учитываться динамика: ограничения скорости, ускорения, проходимость ландшафта. При взаимодействии с объектами должны выполняться механические условия: сила захвата, упругость плода, вероятность повреждения.

Пассивные сущности (ограды, деревья, непроходимые участки поля и т.д.) должны обладать физическими характеристиками: геометрическими размерами, положением и ориентацией в пространстве. Модель должна поддерживать пространственные конфликты (коллизии), перенос объектов и изменение состояния среды. Каждое физическое действие должно потреблять энергию, а ограничения эффекторов должны определять допустимые взаимодействия.

Сенсорная модель. Агенты должны быть оснащены сенсорной системой, включающей как интерорецепторы (датчики внутреннего состояния, например уровня заряда и т.д.), так и экстерорецепторы (камеры, датчики влажности и т.д.). В зависимости от целей моделирования сенсорные данные могут сопровождаться характеристиками реальных устройств: шумом, задержкой, доверительным интервалом и т.п.

Эффекторная модель. Определяет, как агенты должны воздействовать на окружающую среду. Эффекторная модель может рассматриваться как часть физической модели, но часто уточняется для конкретных действий. Например, при сборе урожая задается сила, с которой манипулятор воздействует на яблоко, чтобы избежать его повреждения.

Энергетическая модель. Предполагается, что активность агентов должна быть связана с энергозатратами. Расход энергии происходит при перемещении, манипуляциях с объектами и взаимодействии с другими агентами. Источниками энергии могут выступать аккумуляторы, солнечные панели, топливные элементы и другие системы.

Модель вычислений. С целью моделирования федеративного обучения каждый агент снабжается вычислителем с заданными характеристиками как по производительности, так и по энергопотреблению.

Система моделирования должна поддерживать не только вычисления на CPU и GPU, но и распределенное вычисление. С целью минимизации проблем, связанных с синхронизацией циклов моделирования активных сущностей, программная реализация должна быть асинхронной.

Модель данных. Данные, получаемые активными сущностями, должны храниться на самих устройствах. В системе необходимо предусмотреть возможность «записи» потоков данных. Каждая активная сущность должна обладать локальным хранилищем данных, в котором сохраняются как сырые показания сенсоров (изображения, температура, влажность, уровень заряда и другие), так и производные признаки, включая классификации состояния листьев, оценки зрелости плодов или прогнозы энергопотребления. Туда же записывается история действий и решений агента: перемещения, манипуляции с объектами, обмен сообщениями, а также метаданные, такие как временные метки, точность измерений, источник данных и уровень доверия к ним.

Коммуникационная модель. Агенты должны иметь возможность обмениваться информацией. В зависимости от целей моделирования и свойств агентов радиус коммуникации может быть глобальным (все агенты взаимодействуют независимо от расстояния) или ограниченным (взаимодействие возможно только в заданном радиусе).

Модель федеративного обучения. В разрабатываемой системе федеративное обучение [8, 9] реализуется в децентрализованной архитектуре, исключая централизованный сервер-оркестратор. Вместо этого все агенты должны быть оснащены вычислительными модулями, взаимодействующими напрямую друг с другом по принципу peer-to-peer, формируя самоорганизующуюся сеть. Такой подход устраняет единую точку отказа, повышает отказоустойчивость системы.

Модель взаимодействия с пользователем. Разрабатываемая система должна иметь возможность удаленного подключения. В случаях если моделирование занимает достаточно продолжительное время, необходимо предусмотреть возможность сохранения промежуточных результатов, с которых в дальнейшем можно продолжить процесс моделирования.

Модель интеграции с реальной средой. Процесс разработки и внедрения агротехнических систем должен иметь возможность синтеза моделируемых объектов и процессов с реальными системами, а также постепенного перехода моделируемых сущностей в реальный мир. Например, пользователь, желающий промоделировать реальный сад с метеостанцией и роботизированными системами, должен иметь возможность воссоздать цифровую копию сада в имитационной среде, интегрировать в нее потоки данных от реальных датчиков и использовать эту виртуальную модель для тестирования и отладки программного обеспечения своих роботов до их развертывания в реальных условиях.

ПРОГРАММНАЯ АРХИТЕКТУРА СРЕДЫ ДЛЯ АГЕНТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Программная архитектура среды для агентного моделирования построена на принципах объектно-ориентированного проектирования (ООП), что обеспечивает четкое структурирование системы, гибкость и расширяемость. Основные сущности, такие как мир, агенты, пассивные объекты и коммуникационные механизмы, реализованные в виде классов, инкапсулирующих данные и поведение, представлены на рисунке 1. Наследование позволяет единообразно описывать разнородные активные и пассивные объекты, а компоновка (composition) используется для моделирования сложных систем, таких как агенты с сенсорами, эффекторами и встроенными вычислителями. Такой подход не только упрощает разработку и сопровождение кода, но и естественным образом отражает иерархию и взаимодействие элементов в симулируемой среде яблоневого сада.

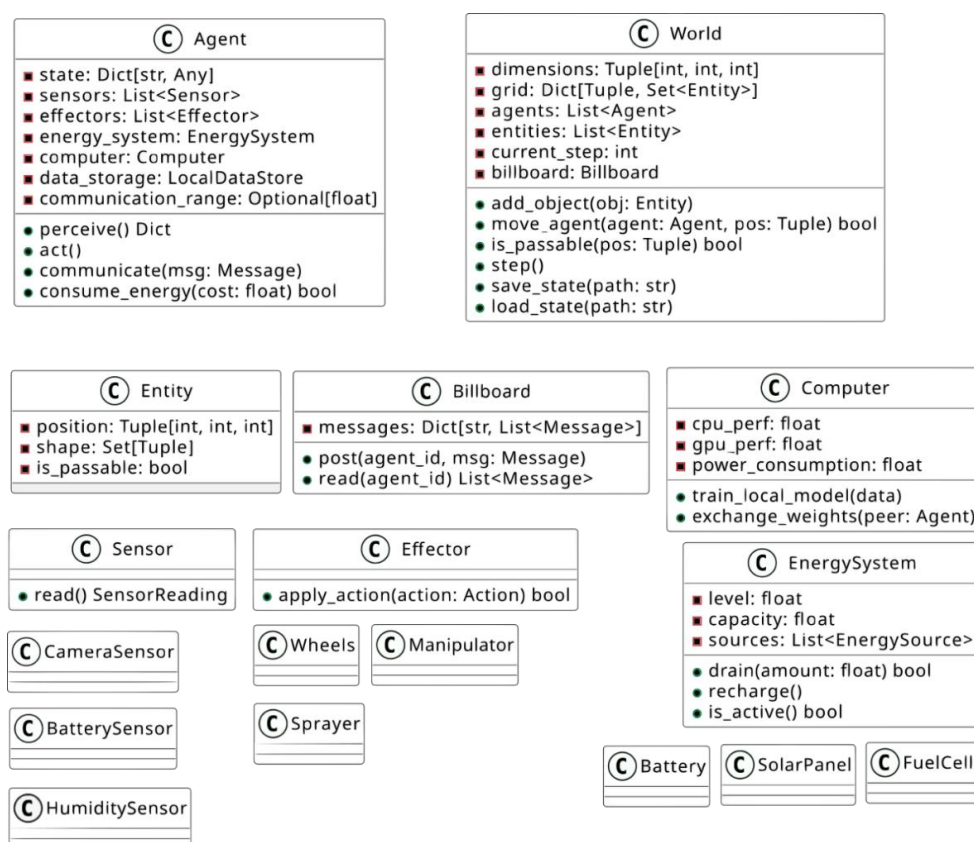


Рис. 1. UML-диаграмма классов агентной среды моделирования агроинженерных систем
Fig. 1. UML class diagram of an agent-based environment for modeling agricultural engineering systems

Класс World представляет собой трехмерное дискретное пространство с целочисленными координатами x, y, z . Размеры мира задаются при инициализации и могут быть изменены в процессе моделирования. World хранит все объекты сцены: агентов и пассивные сущности. Также World содержит экземпляр класса Billboard, обеспечивающий глобальную коммуникативную среду, доступную всем агентам без пространственной фильтрации.

Класс Agent является базовым классом для всех активных сущностей. К агентам относятся роботы, дроны, люди, деревья, сорняки, болезни, вредители и т.д. Агенты могут быть статическими (например, дерево) или динамическими (например, робот). Каждый агент занимает одну или несколько ячеек трехмерного пространства и может перемещаться по миру, если он не статический. Агент обладает внутренним состоянием, может отправлять и получать сообщения через Billboard и содержать экземпляр класса Computer. Сенсоры (камера, датчики температуры и влажности) и эффекторы (манипуляторы, колеса) реализованы как компоненты агента и не являются отдельными агентами.

Класс Billboard реализует доску объявлений. Любой агент может разместить в ней сообщение, и любой другой агент может прочитать все имеющиеся сообщения. Радиус распространения сообщений задается на этапе инициализации эксперимента и может варьировать от глобального, когда все сообщения доступны всем, до минимального, когда радиус распространения равен нулю. Разные группы агентов могут иметь свои экземпляры класса Billboard.

Класс Entity является базовым для пассивных объектов, не обладающих поведением. К ним относятся ограды, столбы, участки почвы, а также плоды (яблоки). Плоды моделируются как отдельные объекты класса Entity, размещенные в пространстве рядом с деревом. Entity не имеют вычислительных возможностей, не могут перемещаться самостоятельно и не участвуют в обмене сообщениями, но могут менять свое внутреннее состояние: например, спелость яблок может изменяться со временем.

Класс Computer моделирует встроенные вычислительные устройства агентов. Он предназначен для поддержки сценариев федеративного обучения: агент может накапливать локальные данные (например, данные о спелости плодов, наличии вредителей и т.д.), обучать локальные системы принятия решений и управления и обмениваться ими с другими агентами через сообщения. Компьютер является компонентом агента.

ВЫВОДЫ

Представленная архитектура агентной среды моделирования автономного яблоневого сада представляет собой целостную и расширяемую платформу для исследования интеллектуальных распределенных систем в условиях реалистичных ограничений. Разработанная модель интегрирует физическое взаимодействие, сенсорное восприятие, энергетические ограничения, мобильность и вычислительные возможности в единую семантически насыщенную среду, что позволит достоверно имитировать поведение агентов в сложной агроэкосистеме. Архитектура четко разделяет активные и пассивные сущности, избегая концептуальных противоречий, что упрощает логику и повышает прозрачность системы. При этом предусмотрена гибкость для будущего расширения: поддержка адаптивной топологии коммуникаций, персонализированных моделей, управления задачами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Анчëков М. И., Лешкенов А. М. Система виртуального моделирования робототехнических систем сельскохозяйственного назначения // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2023. No. 6(116). С. 125–131. DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-125-131

Anchekov M.I., Leshkenov A.M. System for virtual modeling of robotic systems for agricultural purposes. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2023. No. 6(116). Pp. 125–131. DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-125-131. (In Russian)

2. Osorio-Antonia J., Rivas-Tovar L.A., Juárez-Pérez F. Simulation of corn production in chicontepec veracruz with agent-based modeling. *Computación y Sistemas*. 2025. Vol. 29. No. 1. Pp. 529–544. DOI: 10.13053/CyS-29-1-5293
3. Luke S., Cioffi-Revilla C., Panait L. et al. Mason: a multiagent simulation environment. *Simulation*. 2005. Vol. 81. No. 7. Pp. 517–527. DOI: 10.1177/0037549705058073
4. Lopez-Jimenez J., Quijano N., Vande Wouwer A. An agent-based crop model framework for heterogeneous soils. *Agronomy*. 2021. Vol. 11. No. 1. P. 85. DOI: 10.3390/agronomy11010085
5. North M.J., Collier N.T., Vos J.R. Experiences creating three implementations of the repast agent modeling toolkit. *ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation (TOMACS)*. 2006. Vol. 16. No. 1. Pp. 1–25. DOI: 10.1145/1122012.112201
6. Konkina V., Martynushkin A. Forecasting the size of the dairy market in AnyLogic environment. *E3S Web of Conferences*. EDP Sciences, 2021. Vol. 282. P. 01002. DOI: 10.1051/e3sconf/202128201002
7. Ltaief H., Karaduman B., Boussaid et al. Agent based implementation of a robot arm and smart production line using jade framework. 2022 11th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO). *IEEE*, 2022. Pp. 1–12. DOI: 10.1109/MECO55406.2022.9797162
8. Yu X., Queralta J.P., Westerlund T. Towards lifelong federated learning in autonomous mobile robots with continuous sim-to-real transfer. *Procedia Computer Science*. 2022. Vol. 210. Pp. 86–93. DOI: 10.1016/j.procs.2022.10.123
9. Na S., Rouček T., Ulrich J. et al. Federated reinforcement learning for collective navigation of robotic swarms. *IEEE Transactions on cognitive and developmental systems*. 2023. Vol. 15. No. 4. Pp. 2122–2131. DOI: 10.1109/TCDS.2023.3239815

Финансирование. Исследование проведено без спонсорской поддержки.

Funding. The study was performed without external funding.

Информация об авторе

Анчёков Мурат Инусович, заведующий лабораторией «Имитационное моделирование фенотипических процессов» НИЦ «Интеллектуальные генетические системы», Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук;

360010, Россия, г. Нальчик, ул. Балкарова, 2;

murat.antchok@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8977-797X>, SPIN-код: 3299-0927

Information about the author

Murat I. Anchekov, Head of the Laboratory of Simulation Modeling of Phenogenetic Processes of the Scientific and Innovation Center “Intelligent Genetic Systems”, Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences;

2, Balkarov street, Nalchik, 360010, Russia;

murat.antchok@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8977-797X>, SPIN-code: 3299-0927