

Мультиагентное моделирование в биологии растений

М. И. Анчёков[✉], Ж. Х. Курашев

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

Аннотация. Традиционные методы, такие как системы алгебраических или дифференциальных уравнений, L-системы или функционально-структурные модели, зачастую не способны в полной мере моделировать динамическое взаимодействие растений со средой. Мультиагентные системы позволяют представить моделируемый объект как коллектив автономных агентов, представляющих отдельные функциональные части, каждая из которых следует локальным правилам, обеспечивающим принятие решения и взаимодействие с внешней средой.

Цель исследования – анализ современных подходов к мультиагентному моделированию в биологии растений.

Проведенный анализ ряда публикаций показал, что моделирование на основе мультиагентного подхода воспроизводит рост апельсинового дерева, архитектуру корневой системы, морфологическую адаптацию черной ольхи, поведенческую пластичность животных в растительных экосистемах и позволяет реализовать цифровые двойники пшеницы. В рассмотренных работах особое внимание уделяется эмерджентным свойствам предложенных моделей, которые проявляются без явного задания глобальных правил. Результаты проведенного анализа демонстрируют высокий потенциал мультиагентного подхода как инструмента моделирования морфологических и физиологических процессов биологических систем, а также его перспективность в задачах цифрового земледелия, селекции и прогнозирования урожайности в условиях изменяющегося климата. Этот подход способен учитывать пространственную неоднородность среды и временные изменения условий.

Представленный обзор исследований показывает, что подход на основе мультиагентных систем успешно применяется для моделирования роста деревьев, корневых систем, популяционной динамики, цифровых двойников сельскохозяйственных культур.

Ключевые слова: мультиагентное моделирование, фенотипическая пластичность, цифровой двойник, агентно-ориентированное моделирование, эмерджентные свойства

Поступила 03.09.2025, одобрена после рецензирования 29.09.2025, принята к публикации 06.10.2025

Для цитирования. Анчёков М. И., Курашев Ж. Х. Мультиагентное моделирование в биологии растений // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2025. Т. 27. № 5. С. 26–33. DOI: 10.35330/1991-6639-2025-27-5-26-33

Multi-agent modeling in plant biology

M.I. Anchekov[✉], Zh.Kh. Kurashev

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

Abstract. Traditional methods, such as systems of algebraic or differential equations, L-systems, or functional-structural models, are often unable to fully simulate the dynamic interactions of plants with their environment. Multi-agent systems allow the modeled object to be represented as a collective of autonomous agents representing individual functional parts, each of which follows local rules that ensure decision-making and interaction with the external environment.

Aim. The study is to analyze modern approaches to multi-agent modeling in plant biology.

An analysis of several publications revealed that multi-agent modeling reproduces orange tree growth, root system architecture, the morphological adaptation of black alder, and the behavioral plasticity of animals in plant ecosystems, enabling the implementation of digital twins of wheat. The reviewed studies place particular emphasis on the emergent properties of the proposed models, which manifest themselves without explicitly defining global rules. The results of the analysis demonstrate the high potential of the multi-agent approach as a tool for modeling the morphological and physiological processes of biological systems, as well as its potential for digital farming, breeding, and yield forecasting in a changing climate. This approach is capable of accounting for spatial heterogeneity of the environment and temporal changes in conditions.

The presented review of research shows that the approach based on multi-agent systems is successfully applied to modeling tree growth, root systems, population dynamics, and digital twins of agricultural crops.

Keywords: multi-agent modeling, phenotypic plasticity, digital twin, agent-based modeling, emergent properties

Submitted on 03.09.2025,

approved after reviewing on 29.09.2025,

accepted for publication on 06.10.2025

For citation. Anchekov M.I., Kurashev Zh.Kh. Multi-agent modeling in plant biology. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2025. Vol. 27. No. 5. Pp. 26–33. DOI: 10.35330/1991-6639-2025-27-5-26-33

ВВЕДЕНИЕ

Современное растениеводство, генетика и биология растений все чаще сталкиваются с необходимостью интеграции морфологических, физиологических и экологических данных в единые динамические модели, способные отражать сложность реальных растительных систем. Традиционные подходы к моделированию роста растений, такие как L-системы, фрактальные модели или функционально-структурные модели зачастую ограничены в способности отражать динамическое взаимодействие растения со средой, особенно на уровне локальных реакций и самоорганизации. В этом контексте мультиагентное моделирование предлагает мощную альтернативу: оно позволяет рассматривать растение как совокупность автономных взаимодействующих элементов (агентов), каждый из которых обладает собственными правилами восприятия, принятия решений и поведения. Такой подход естественным образом воспроизводит эмерджентные свойства без необходимости задавать их в явном виде.

Целью настоящего исследования является анализ современных подходов к мультиагентному моделированию в биологии растений.

В статье [1] моделируют рост апельсинового дерева на основе мультиагентной модели ORASIM. В этой модели метамеры и сегмент корневой системы представлены в виде отдельных агентов, интегрирующих геометрию и физиологические процессы.

Взаимодействие агентов реализовано через передачу сообщений. Наземная часть растения (*метамер*) состоит из следующих элементов: междоузлие, представленное цилиндром; лист, представленный эллипсом; плод, представленный сферой. Геометрическая структура корня состоит из трех зон: апикальная и базальная зоны представлены цилиндрами, а ветвления усеченным конусом. Такое представление метамера и корня обеспечивает высокую визуальную и морфологическую достоверность трехмерной модели апельсинового дерева.

С функциональной точки зрения агент-метамер состоит из элементов: датчика для восприятия внешних стимулов и получения сообщений, отправляемых соседними агентами; эффектора для выполнения физиологических правил и отправки сообщений соседним агентам; интерфейса пользовательских операций для получения команд или сообщений с панели управления; коммуникационного модуля для обработки и анализа сообщений; памяти для хранения данных; контроллера для управления модулями и доступа к памяти; краткосрочного планировщика и арбитра.

Для параметризации модели было высажено 50 деревьев: 4 дерева использовались для анализа состояний меристемы, 30 деревьев для измерений углеродного обмена, роста и 16 для валидации модели.

Процесс валидации модели показал, что визуально форма кроны, ветвление и общая структура симулированного дерева хорошо соответствовали реальным апельсиновым деревьям, также совпадали такие количественные показатели, как высота, площадь листовой и общая биомасса.

Далее были проведены четыре эксперимента по моделированию роста деревьев: при оптимальных условиях, низкой температуре, низком уровне освещенности, водном стрессе. Реакция измерялась на трех временных масштабах: краткосрочный (1 месяц), среднесрочный (1 год) и долгосрочный (6 лет). Авторы проанализировали реакции и сделали выводы, что реакции возникали спонтанно как следствие локальных взаимодействий агентов без централизованного управления, что подтверждает способность модели воспроизводить фенотипическую пластичность как эмерджентное свойство.

В статье [2] авторы моделируют экологические системы с учетом фенотипической пластичности и косвенных взаимодействий организмов. С помощью разработанной вычислительной системы COIN (Complex Interaction Network), основанной на агентном моделировании, авторы проверяют две гипотезы, что фенотипическая пластичность [3] играет центральную роль в динамике экосистем и экологические процессы в значительной степени определяются не только прямыми, но и косвенными взаимодействиями, включая плотностно-опосредованные (*density-mediated indirect interactions*) и опосредованные признаками (*trait-mediated indirect interactions*) эффекты.

В основе работы COIN лежит агентное моделирование. Каждый организм представлен как автономный агент со своим набором поведенческих и физиологических правил. Агенты взаимодействуют не только друг с другом, но и с пространственно-неоднородной и изменяющейся средой, включающей такие компоненты, как температура, освещенность, ресурсы и ландшафт.

Агенты, изначально обладающие одинаковым набором правил и параметров, демонстрируют различия в фенотипе из-за стохастических отклонений в начальных условиях и локальных особенностей среды, с которой они взаимодействуют. Особенность COIN заключается в том, что фенотипическая пластичность не задается в модели напрямую,

как фиксированная функция, а возникает эмерджентно, как результат самоорганизации. Для проверки сформулированных гипотез авторы провели три модельных эксперимента: дифференциация размеров у плотвы (*Rutilus rutilus*), изменение поведения европейской малиновки (*Erithacus rubecula*) в условиях потепления и морфологическая адаптация черной ольхи (*Alnus glutinosa*) к изменению света и температуры.

В первом эксперименте показано, что в модельной среде обитания озера площадью около $1,1 \text{ км}^2$ с разрешением сетки $50 \times 50 \text{ м}$, в которой учтены такие параметры, как температура воды и продолжительность дня, обилие пищи в литоральной и пелагиальной частях, а также биоэнергетика и развитие биомассы отдельных рыб, изначально однородный по размеру годовой класс рыб спонтанно разделяется на две подгруппы: одни особи остаются мелкими, другие достигают пороговой длины (примерно 13 см), что позволяет им использовать моллюсков как дополнительный источник пищи, ускоряя рост и способствуя достижению половой зрелости раньше. Это явление возникает за счет стохастических различий в доступе к пище и усиливается через локальные взаимодействия со средой.

Во втором эксперименте моделируется репродуктивное поведение европейской малиновки (*Erithacus rubecula*) в зависимости от изменений температуры и доступности пищи. Модельная среда была ограничена участком в 25,6 га с разрешением $4 \times 4 \text{ м}$. Моделирование основывалось на двух сценариях: стандартные климатические условия и сценарий с глобальным потеплением. Каждый сценарий запускался 50 раз с разными случайными начальными условиями для учета стохастичности. В условиях потепления малиновки начали размножаться раньше, а сезон стал длиннее и равномернее. Среднее число яиц на самку выросло с 10,6 до 15,6, а выводков – с 2,0 до 2,7 в год. Это стало возможным благодаря перераспределению родительских обязанностей: самцы увеличили время кормления птенцов с 68 до 124 мин./день, позволяя самкам начинать новое гнездование до полной независимости предыдущего выводка. Время, затрачиваемое самками на репродукцию, выросло со 137 до 219 мин./день. Такое поведение, ранее редкое и наблюдаемое лишь в отдельные теплые годы, по модели может стать нормой при устойчивом потеплении. Все изменения возникли самоорганизованно, без различий в «генотипе» агентов, за счет стохастичности и локального взаимодействия со средой.

В третьем эксперименте моделировалась морфологическая пластичность черной ольхи (*Alnus glutinosa*) с помощью индивидуально-ориентированной модели ALMIS [4]. Дерево представлялось как совокупность модулей: листьев, междоузлий, меристем и корней, каждый из которых обладал собственными физиологическими процессами, такими как фотосинтез, дыхание и транспорт веществ. В модели учитывается пространственное расположение органов и их взаимное влияние, включая затенение и конкуренцию за ресурсы. В сценариях с пониженной температурой и освещенностью деревья демонстрировали значительное снижение роста: при низком свете они достигали лишь половины высоты контрольных, имели меньше побегов и листьев, а при низкой температуре – меньший объем и биомассу. Эти результаты показали, как локальные физиологические реакции на уровне отдельных модулей приводят к выраженным фенотипическим изменениям на уровне всего растения.

В статье [5] представлена модель роста корневой системы растений на основе Swarm Grammars [6] гибридного формализма, объединяющего L-системы [7, 8] и агентное моделирование.

Авторы утверждают, что такая архитектура модели позволяет воспроизводить сложные элементы корневой архитектуры, включая тропизмы, зональное ветвление и пластичность роста, при этом сохраняя возможность прямого взаимодействия пользователя со симуляцией в реальном времени. Среда, в которой находятся корни, представляет собой облако

точек, позволяющее задавать неоднородное распределение различных элементов модели, такие как почва, препятствия, питательные вещества, вредные металлы и соль. В модели используются два типа агентов. Водные агенты не управляются продукционными правилами, а лишь реагируют на данные окружающей среды. Под действием гравитации они движутся вниз и отдают воду ближайшим точкам почвы, пока не исчерпают свой запас. Корневые агенты расположены на кончиках растущих корней и способны реагировать на множество внешних стимулов: гравитацию, соль, химические вещества, магнитные поля, механические препятствия и воду. Направление роста выбирается стохастически из конуса возможных направлений таким образом, чтобы минимизировать или максимизировать функцию, соответствующую конкретному тропизму. Итоговое ускорение агента рассчитывается как взвешенная сумма всех активных тропизмов и силы, предотвращающей столкновения. Рост корней регулируется вероятностными продукционными правилами, заимствованными из L-систем, но адаптированными для агентного подхода: с определенной вероятностью агент может сменить тип или породить новый боковой корень. Для верификации модели использовался экспертный метод.

В статье [9] предлагают новую парадигму моделирования роста растений на основе агентно-ориентированного подхода. Основная гипотеза исследования заключается в том, что традиционные методы виртуального моделирования роста растений, такие как L-системы, АМАР-модели и фрактальные подходы, недостаточно учитывают динамическое взаимодействие растений с окружающей средой, а также процессы конкуренции и эволюции на уровне популяций. Авторы предполагают, что внедрение концепции интеллектуального агента [10] позволит преодолеть эти ограничения за счет наделения виртуальных растений свойствами автономности, реактивности, инициативности, коммуникабельности и способности к обучению.

Для реализации того подхода предложена агентная архитектура, включающая три ключевые подсистемы: систему поведения (conduct system), перцептивную систему (perceptual system) и систему эволюции (evolution system).

Система поведения включает морфологическую и физиологическую модели. Морфология учитывает генетические и экологические факторы. Физиологическая модель делит жизненный цикл на три фазы: рост, пик развития и угасание. Перцептивная система реализована с помощью каскадной процессной нейронной сети, способной обрабатывать временные последовательности входных данных (температура, освещенность).

В предложенной модели каждое внешнее воздействие, такое как изменение температуры или освещенности, воспринимается системой принятия решений как стимул. В ответ на этот стимул растение выбирает определенное поведение. Выбор конкретного поведенческого действия осуществляется вероятностно: вероятность выполнения того или иного действия определяется соответствующим элементом вектора весов. После реализации действия веса обновляются в зависимости от эффективности реакции, что обеспечивает способность модели к обучению на основе накопленного опыта взаимодействия со средой.

Эволюционная система моделирует способность растения адаптироваться к среде через изменение степени приспособленности в течение его жизни. Эта степень низка в начале (слабый рост), максимальна в середине жизненного цикла (пик развития и размножения) и снова снижается к концу (старение).

Для упрощения модель игнорирует изменчивые внешние факторы и использует идеализированную функцию приспособленности. Эта функция позволяет встроить биологически правдоподобную динамику жизнеспособности в агентную модель растения.

С целью демонстрации предложенной модели была выбрана соя. Экспериментальная фаза включала выращивание сои на опытных полях с вариацией плотности посева и характеристики почвы. Фаза извлечения параметров была необходима для калибровки модели. В фазе моделирования были добавлены перцептивная и поведенческая системы. Опыты показали практическую реализуемость предложенной агентной архитектуры. Хотя валидация ограничена описанием методики (без количественных метрик точности), авторы четко связывают теоретическую модель с реальными биологическими и агрономическими данными, что повышает доверие к подходу и открывает путь для применения в цифровом земледелии и селекции.

В работах [11, 12] авторы указывают, что подходы, основанные на системах алгебраических или дифференциальных уравнений, а также на методах машинного обучения, не подходят для решения задач моделирования роста и развития растений. Они не учитывают дискретную природу фаз развития растений, в ходе которых системные параметры изменяются скачкообразно.

Авторы предлагают концепцию цифрового двойника (Digital Twin [13]) пшеницы, построенного на основе онтологической модели и мультиагентной системы. В рамках этой архитектуры каждый этап развития представлен автономным программным агентом, который при поступлении новых данных в динамическом режиме пересчитывает прогноз урожайности. Далее авторы [14] предлагают рассматривать цифровой двойник растения для управления точным земледелием в рамках кибер-физической системы (Cyber-Physical System [15]). В качестве модельного объекта для демонстрации подхода была выбрана пшеница, которая в процессе развития проходит порядка 100 микростадий, объединенных в 10 макростадий (например, прорастание, кущение, колошение, цветение, созревание и т.д.).

Каждая стадия развития растения моделируется отдельным программным агентом, который получает данные о погоде (фактические и прогнозные), вычисляет длительность своей стадии, пересчитывает выходные параметры (например, влияние на урожайность) и передает результаты агентам следующих стадий по цепочке. Данный подход позволяет динамически обновлять весь план развития растения при любом изменении условий. Для функционирования агентов требуется структурированная база знаний, описывающая граф переходов между микростадиями, параметры каждой стадии, временные характеристики, признаки нормального и отклоняющегося развития.

Авторы демонстрируют работоспособность предложенного подхода в симуляции на примере озимой пшеницы в условиях Самарской области, показывая различия в сроках созревания и урожайности в зависимости от микроклимата.

Выводы

Мультиагентное моделирование открывает новые возможности для понимания сложных, самоорганизующихся процессов в биологии растений, позволяя воспроизводить адаптацию и взаимодействие с окружающей средой на основе локальных правил агентов. Представленный обзор исследований показывает, что подход на основе мультиагентных систем успешно применяется для моделирования роста деревьев, корневых систем, популяционной динамики, цифровых двойников сельскохозяйственных культур. Эмерджентные свойства, возникающие без централизованного управления, делают мультиагентные модели особенно ценными для изучения адаптивного поведения растений и разработки решений в области точного земледелия и селекции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Qu H., Wang Yo., Cai Lg, Wang T. Orange tree simulation under heterogeneous environment using agent-based model ORASIM. *Simulation Modelling Practice and Theory*. 2012. Vol. 23. Pp. 19–35. DOI: 10.1016/j.simpat.2011.12.005
2. Reuter H., Jopp F., Hölker F., Eschenbach Ch.A. The ecological effect of phenotypic plasticity – Analyzing complex interaction networks (COIN) with agent-based models. *Ecological Informatics*. 2008. Vol. 3. No. 1. Pp. 35–45. DOI: 10.1016/j.ecoinf.2007.03.010
3. Иорданский Н. Н. Фенотипическая пластичность организмов и эволюция // Русский орнитологический журнал. 2024. Т. 33. № 2385. С. 294–303. EDN: HTMMOX
Iordansky N.N. Phenotypic plasticity of organisms and evolution. *Russkiy ornitologicheskii zhurnal* [Russian Ornithological Journal]. 2024. Vol. 33. No. 2385. Pp. 294–303. EDN: HTMMOX. (In Russian)
4. Eschenbach C. The effect of light acclimation of single leaves on whole tree growth and competition – an application of the tree growth model ALMIS. *Annals of Forest Science*. 2000. Vol. 57. No. 5. Pp. 599–609. DOI: 10.1051/forest:2000145
5. Mußmann M., Hofstadler D.N., Mammen S. von. An Agent-based, Interactive Simulation Model of Root Growth. *The 2024 Conference on Artificial Life*. 2024. DOI: 10.1162/isal_a_00718
6. Raies Y., von Mammen S. A Swarm Grammar-Based Approach to Virtual World Generation. *Lecture Notes in Computer Science*. 2021. Pp. 459–474. DOI: 10.1007/978-3-030-72914-1_30
7. Lindenmayer A. Mathematical models for cellular interactions in development II. Simple and branching filaments with two-sided inputs. *Journal of Theoretical Biology*. 1968. Vol. 18. No. 3. Pp. 300–315. DOI: 10.1016/0022-5193(68)90080-5
8. Prusinkiewicz P. Pillars of theoretical biology: Mathematical models for cellular interaction in development. I and II. *Journal of Theoretical Biology*. 2025. No. 609. P. 112142
9. Li X., Su Zh., Sun H., Zheng P. Agent-based plant growth modeling. *ICICSE '09: Proceedings of the 2009 Fourth International Conference on Internet Computing for Science and Engineering*. 2009. Pp. 6–11. DOI: 10.1109/ICICSE.2009.8
10. Garro A., Falcone A., Baldoni M. et al. Intelligent agents: multi-agent systems. *Encyclopedia of Bioinformatics and Computational Biology*. 2025. Pp. 379–385.
11. Skobelev P., Laryukhin V., Simonova E. et al. Multi-agent approach for developing a digital twin of wheat. In *2020 IEEE International Conference on Smart Computing (SMARTCOMP)*. 2020. Pp. 268–273. DOI: 10.1109/smartcomp50058.2020.00062
12. Тихонов А. А., Головатый В. С. Модели планирования развития растения для сервиса цифрового двойника сельскохозяйственных культур // Modern Science. 2022. № 2-2. С. 278–283. EDN: IYEJFS
Tikhonov A.A., Golovaty V.S. Plant development planning models for digital twin services for crops. *Modern Science*. 2022. No. 2-2. Pp. 278–283. EDN: IYEJFS. (In Russian)
13. Grieves M. Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication. White Paper. 2015.
14. Skobelev P., Mayorov I., Simonova E. et al. Development of digital twin of plant for adaptive calculation of development stage duration and forecasting crop yield in a cyber-physical system for managing precision farming. *Studies in Systems, Decision and Control*. Springer. 2021. Pp. 83–96. DOI: 10.1007/978-3-030-67892-0_8
15. Lee E.A. Cyber physical systems: design challenges. *2008 11th IEEE international symposium on object and component-oriented real-time distributed computing (ISORC)*. 2008. Pp. 363–369. DOI: 10.1109/ISORC.2008.25

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflict of interest.

Финансирование. Исследование проведено без спонсорской поддержки.

Funding. The study was performed without external funding.

Информация об авторах

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

360002, Россия, г. Нальчик, ул. Балкарова, 2;

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

Курашев Жираслан Хаутиевич, заведующий НИЦ «Интеллектуальные генетические системы», Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук;

360002, Россия, г. Нальчик, ул. Балкарова, 2;

kurashev-j@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9442-6122>, SPIN-код: 8549-2620

Information about the authors

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

Zhiraslan Kh. Kurashev, Head 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;

kurashev-j@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9442-6122>, SPIN-code: 8549-2620