

УДК 004.89

## Перспективы использования мультиагентных систем искусственного интеллекта для оптимизации биотехнологических процессов

Лапшин Леонид Алексеевич

leonid.lapshin.a@gmail.com

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

*В работе рассматриваются перспективы использования мультиагентных систем искусственного интеллекта (МАС ИИ) для оптимизации биотехнологических процессов. Основное внимание уделено роли мультиагентных систем в оптимизации работы биореакторов. Проведен анализ современных биотехнологических процессов и выявлены их особенности. Разработана архитектура мультиагентной системы. Предложено использовать методы машинного обучения и цифровые двойники для прогнозирования и адаптации режимов ферментации в реальном времени. Результаты исследования подтверждают, что мультиагентные системы искусственного интеллекта обладают высоким потенциалом в задачах цифровизации, мониторинга и оптимизации биотехнологических процессов, обеспечивая децентрализованное, гибкое и устойчивое управление на основе самоорганизации и адаптации.*

**Ключевые слова:** биотехнологические процессы, мультиагентные системы, искусственный интеллект, оптимизация процессов, биореактор, автоматизация производства, машинное обучение

**Введение.** В современном мире биотехнологические процессы становятся все более сложными и требуют высокой степени автоматизации и оптимизации для повышения их эффективности и качества продукции. Традиционные методы управления и моделирования часто оказываются недостаточно гибкими и адаптивными, особенно при работе с распределенными и динамическими системами, характерными для биореакторов и других биотехнологических установок. В связи с этим возрастающий интерес вызывает применение мультиагентных систем искусственного интеллекта (МАС), способных обеспечивать децентрализованное, адаптивное и параллельное управление сложными процессами.

Мультиагентные системы представляют собой совокупность автономных интеллектуальных агентов, взаимодействующих друг с другом и с окружающей средой для достижения общих или согласованных целей. Благодаря своей архитектуре МАС способны моделировать сложные динамические процессы, обеспечивать самоорганизацию, а также адаптироваться к изменяющимся условиям без необходимости централизованного контроля. Это открывает широкие перспективы для их использования в биотехнологии, где управление технологическими параметрами требует учета множества взаимозависимых факторов и быстрого реагирования на изменения.

В данной работе рассматриваются перспективы применения мультиагентных систем для оптимизации биотехнологических процессов. Особое внимание уделяется анализу архитектуры МАС, механизмам взаимодействия агентов, а также возможностям интеграции таких систем с современными средствами сбора и обработки данных, включая методы искусственного интеллекта и машинного обучения. Работа содержит аналитическую часть с расчетами, иллюстрирующими эффективность подхода, а также обзор современных примеров использования МАС в биотехнологической сфере.

Цель исследования — выявить ключевые преимущества и ограничения мультиагентных систем при управлении биотехнологическими процессами и предложить направления для дальнейших исследований и разработки эффективных цифровых решений на их основе.

**Анализ биотехнологических процессов и их особенностей.** Биотехнологические процессы представляют собой совокупность технологических операций, основанных на использовании живых клеток, микроорганизмов или ферментов для получения продукции с заданными свойствами [1]. Они включают разнообразные методы, от ферментации и культивирования клеток до синтеза белков и производства биофармацевтических препаратов.

Специфика биотехнологических процессов определяется высокой чувствительностью к параметрам среды (температура, pH, концентрация кислорода, скорость перемешивания), длительностью циклов и необходимостью строгого контроля качества продукции.

Основные сложности при управлении биотехнологическими процессами связаны с их нелинейностью, мультифакторностью и динамическими изменениями.

К ключевым проблемам относятся:

- неоднородность и изменчивость биологических систем, что требует постоянного мониторинга и корректировки параметров;
- задержки в измерениях и управлении, вызванные длительностью биохимических реакций;
- высокие требования к безопасности и соблюдению нормативов;
- ограниченные возможности предсказания поведения систем при нестандартных условиях.

Современные цифровые системы управления биотехнологическими процессами должны удовлетворять жестким нормативным требованиям для обеспечения безопасности, качества и прослеживаемости производства [2].

Эффективное управление этими процессами требует интеграции множества сенсоров, алгоритмов адаптивного управления и анализа больших данных, что открывает перспективы для применения мультиагентных систем искусственного интеллекта.

Теоретические основы мультиагентных систем. Мультиагентная система (Multi-agent system, MAS) представляет собой совокупность двух или более автономных интеллектуальных агентов, которые взаимодействуют между собой для достижения общей или взаимосвязанных целей. Каждый агент

в системе обладает собственным набором знаний, умений и правил поведения, позволяющих ему решать задачи и координировать действия с другими агентами [3].

Интеллектуальные агенты обычно представлены программными модулями, но в состав МАС могут входить также физические роботы, люди или смешанные коллективы. Такая архитектура позволяет решать задачи, которые сложно или невозможно эффективно реализовать с помощью единого централизованного управления.

Преимущества мультиагентных систем [4]:

- параллельность обработки: Агенты работают одновременно, что сокращает время решения задач по сравнению с последовательными методами;
- гибкость и масштабируемость: Система может легко дополняться новыми агентами и модифицироваться без значительных изменений в архитектуре;
- устойчивость к сбоям: Локальное управление и децентрализация повышают надежность и способность системы к самовосстановлению;
- работа с локальными данными: вместо моделирования системы целиком, МАС позволяет оперировать на уровне отдельных элементов, что повышает точность и информативность решений;

Агенты в МАС могут объединяться в классы, основываясь на общих целях или функциях.

В отличие от классических методов моделирования, основанных на целостных интегральных характеристиках исследуемой системы, мультиагентные системы оперируют отдельными элементами и их взаимодействиями. Это позволяет точнее отражать сложные динамические процессы и учитывать локальные особенности, что особенно важно для моделирования биотехнологических процессов с их высокой сложностью и изменчивостью.

В современном биотехнологическом производстве возрастающая сложность процессов и высокая требовательность к качеству продукции требуют внедрения интеллектуальных систем управления. Мультиагентные системы искусственного интеллекта (МАС ИИ) играют ключевую роль в цифровизации и оптимизации биотехнологических процессов, позволяя создавать гибкие и адаптивные решения.

**Цифровые двойники биотехнологического процесса.** Цифровой двойник представляет собой детализированную цифровую копию реального биотехнологического процесса, которая позволяет моделировать динамику протекания реакций, рост и поведение клеточных культур в биореакторах. Использование МАС ИИ в цифровых двойниках обеспечивает [5]:

- непрерывный сбор и обработку многомерных данных с датчиков;
- адаптивное моделирование и прогнозирование на основе исторических и текущих данных;
- возможность виртуального тестирования различных сценариев управления без остановки реального производства.

Таким образом, цифровые двойники становятся основой для принятия решений и повышают надежность управления биотехнологическими процессами.

**Отслеживание заражения биореакторов с помощью анализа временных рядов.** Одной из ключевых задач контроля качества является раннее выявление заражения и других нарушений в биореакторе. МАС ИИ анализируют временные ряды данных, такие как показатели pH, температуры, концентрации метаболитов, используя алгоритмы обнаружения аномалий и машинное обучение. Это позволяет:

- своевременно распознавать отклонения от нормального режима;
- минимизировать влияние заражения на качество и выход продукции;
- оперативно принимать меры по коррекции процесса.

Данный подход существенно повышает безопасность и устойчивость биотехнологического производства.

**Оптимизация технологических параметров и состава питательной среды.** МАС ИИ способны в режиме реального времени оптимизировать ключевые параметры биореактора — температуру, скорость перемешивания, аэрацию, концентрацию питательных веществ. Особое внимание уделяется составу питательной среды, которая напрямую влияет на рост клеток и выход целевого продукта [6]. Использование мультиагентных систем для управления параметрами обеспечивает:

- автоматический подбор и корректировку состава среды в зависимости от текущего состояния культуры;
- динамическую адаптацию технологических режимов для максимизации продуктивности;
- снижение энергозатрат и расхода реагентов.

**Результаты внедрения МАС в биотехнологии.** Применение мультиагентных систем ИИ в биотехнологических процессах обеспечивает:

- оптимизацию времени лабораторных экспериментов за счет быстрого выявления оптимальных параметров и снижения числа итераций;
- снижение брака продукции благодаря своевременному обнаружению и предотвращению заражения и других отклонений;
- повышение стабильности и управляемости процессов за счет автоматизации мониторинга и адаптивного управления;
- экономию ресурсов за счет точной настройки состава питательной среды и параметров ферментации.

**Архитектура мультиагентной системы для мониторинга и оптимизации биотехнологических процессов.** Представлена возможная архитектура мультиагентной системы (МАС), предназначенной для решения ключевых задач биотехнологического производства: отслеживания заражения биореакторов на основе анализа временных рядов данных и оптимизации состава питательной среды и технологических параметров.

**Компоненты и роли агентов.** В основе архитектуры лежит распределенная структура, состоящая из специализированных агентов, структура которых показана на рис. 1. Каждый из агентов выполняет четко определенные функции [7].

*Агент сбора данных (Data Collector Agent).* Роль: непрерывно собирает данные с датчиков биореактора (температура, pH, концентрация метаболитов,

скорость перемешивания и др.) и внешних источников (например, лабораторных анализов). Особенности: обеспечивает предварительную фильтрацию и нормализацию данных для дальнейшей обработки.

*Агент мониторинга состояния* (Health Monitoring Agent). Роль: анализирует временные ряды данных, выявляет аномалии и признаки заражения, используя методы машинного обучения и статистического анализа. Особенности: оповещает другие агенты при обнаружении потенциальных проблем.

*Агент оптимизации технологических параметров* (Process Optimization Agent). Роль: на основе данных мониторинга и текущих условий подбирает оптимальные параметры биореактора (температуру, скорость перемешивания, аэрацию). Особенности: использует модели цифрового двойника и методы оптимизации для определения наиболее эффективных режимов.

*Агент оптимизации питательной среды* (Nutrient Optimization Agent). Роль: контролирует и корректирует состав питательной среды, исходя из текущих потребностей клеточных культур и стадии процесса. Особенности: применяет адаптивные алгоритмы, учитывающие динамику роста и метаболизма.

*Агент координации и управления* (Coordination Agent). Роль: управляет взаимодействием между агентами, распределяет задачи, согласовывает действия и принимает решения по корректировке процесса. Особенности: обеспечивает целостность работы системы и взаимодействие с внешними системами.

*Агент взаимодействия с внешними системами* (Integration Agent). Роль: обеспечивает обмен данными с SCADA, MES, ERP и другими корпоративными системами для сбора данных, передачи команд и отчетности. Особенности: поддерживает протоколы API, обмен по электронной почте, интеграцию с Jira и т. д.

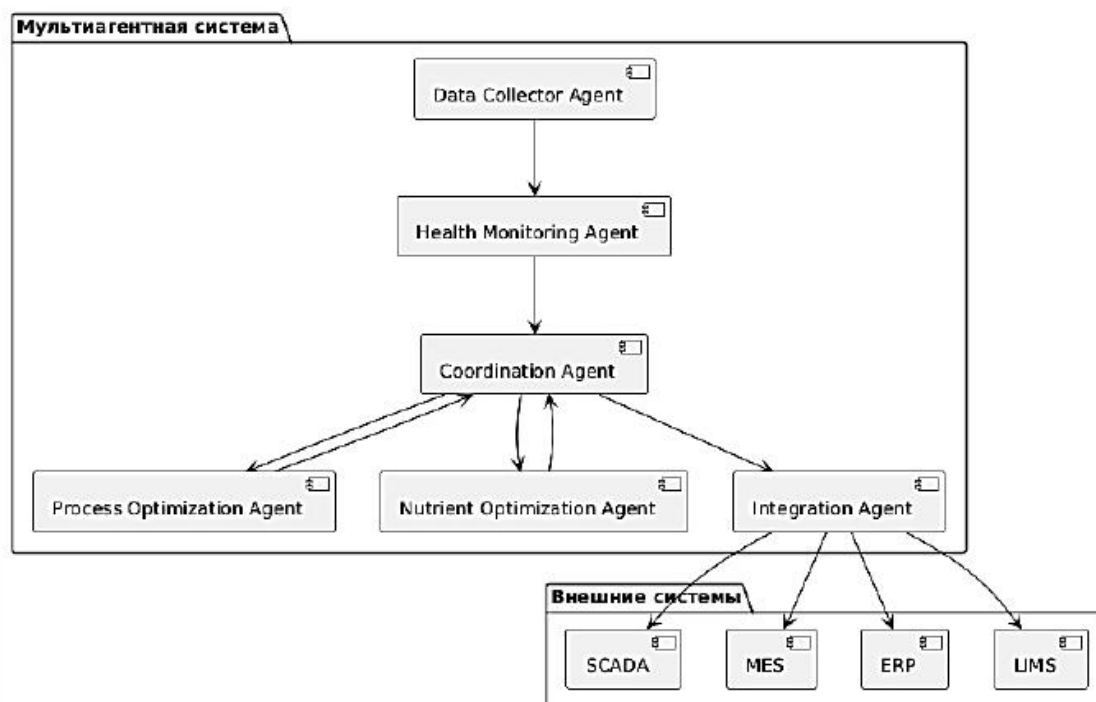


Рис. 1. Структура системы

**Сценарий взаимодействия агентов.** Сценарий взаимодействия агентов показан на рис. 2. Алгоритм состоит из следующих шагов.

**Сбор и обработка данных.** Агент сбора данных получает поток данных с датчиков и лабораторий, фильтрует и нормализует их, передавая в мониторинговый агент.

**Диагностика состояния.** Агент мониторинга анализирует временные ряды, выявляет отклонения и подозрения на заражение. При обнаружении угрозы он сигнализирует агенту координации.

**Принятие решений и оптимизация.** Агент координации инициирует запуск алгоритмов оптимизации технологических параметров и состава питательной среды, направляя соответствующие задачи агентам оптимизации.

**Корректировка процесса.** Оптимизационные агенты рассчитывают новые параметры и отправляют команды агенту координации, который интегрирует их в общий план работы.

**Взаимодействие с производственными системами.** Агент интеграции передает команды и отчеты в SCADA/MES/ERP для исполнения и контроля на уровне предприятия.

**Обратная связь и адаптация.** По мере изменения состояния биореактора, данные вновь собираются, и цикл повторяется, обеспечивая непрерывное улучшение процесса.

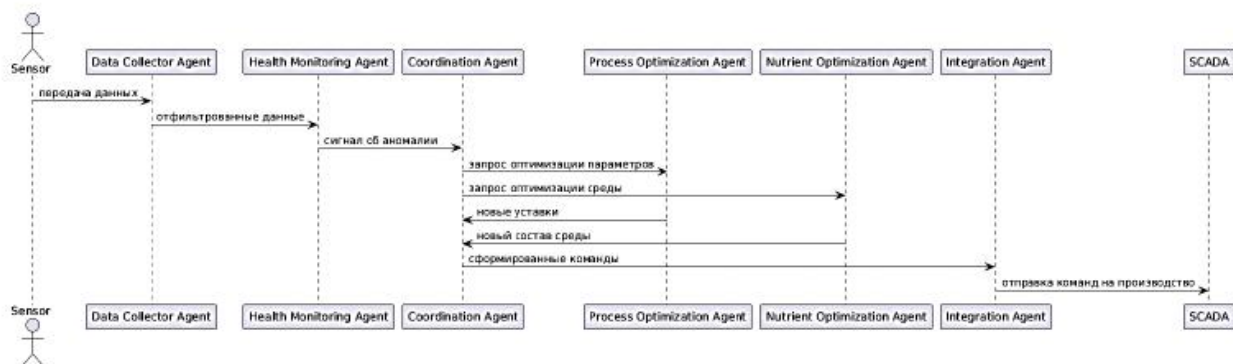


Рис. 2. Взаимодействие агентов системы

Варианты интеграции с другими системами:

- SCADA-системы: получение реального времени данных о технологических параметрах и управление оборудованием на уровне автоматизации;
- MES-системы: планирование, контроль и оптимизация производственных операций с учетом данных мультиагентной системы;
- ERP-системы: интеграция с бизнес-процессами, учет ресурсов, анализ затрат и логистика;
- лабораторные информационные системы (LIMS): обмен результатами лабораторных анализов для уточнения модели цифрового двойника;
- системы управления качеством (например, системы на основе GMP и PAT): обеспечение соответствия нормативным требованиям и автоматизация контроля качества;

– системы оповещения и управления инцидентами (например, Prometheus, Zabbix): автоматизация процесса реагирования на сбои и инциденты;

Таким образом, предложенная архитектура мультиагентной системы представляет собой модульную, масштабируемую и гибкую структуру, способную эффективно решать задачи мониторинга и оптимизации биотехнологических процессов, интегрируясь с существующими корпоративными системами для обеспечения комплексного управления и повышения производительности.

**Возможные эффекты внедрения.** В настоящее время мультиагентные ИИ-системы для управления биотехнологическими процессами еще не получили широкого практического применения и не описаны подробно в публичных источниках. Поэтому конкретные количественные показатели эффективности внедрения можно лишь оценивать на основе моделирования и аналогий с другими индустриями. Тем не менее, можно выделить несколько ключевых экономических эффектов, которые такие системы способны обеспечить:

– Сокращение времени реакции на инциденты. В отличие от классических регуляторов, которые работают по жестким алгоритмам и не могут адаптироваться к новым условиям без вмешательства оператора, мультиагентные системы на основе ИИ непрерывно анализируют свое влияние на процесс и подстраивают стратегию управления в реальном времени. Это позволяет оперативно выявлять и устранять отклонения, предотвращать развитие критических ситуаций и тем самым снижать время простоя оборудования и потери продукции. Благодаря способности к самообучению и адаптации система минимизирует риск «разгона» нештатных процессов, характерного для традиционных ПИД-регуляторов.

– Снижение влияния человеческого фактора. Ошибки оператора при введении уставок или неправильная интерпретация данных приводят к необходимости перезапуска установок, потере дорогостоящих реактивов и искажению результатов экспериментов. Использование мультиагентной ИИ-системы, способной автономно контролировать параметры и своевременно корректировать их, позволяет уменьшить зависимость от человеческого фактора и повысить стабильность и воспроизводимость технологического процесса.

– Повышение гибкости и адаптивности. Многоагентная система обеспечивает динамическую настройку режимов работы с учетом текущего состояния среды и биологической активности. Это позволяет учитывать уникальные особенности каждого цикла ферментации, адаптироваться к изменениям в составе питательной среды, температуре, pH и другим параметрам, что в конечном итоге повышает качество продукции и эффективность процесса.

Предполагается, что за счет вышеописанных улучшений время реагирования на инциденты может сократиться в 3–5 раз, а доля брака снизиться на 15–25 %. В финансовом выражении это может означать экономию от нескольких тысяч до миллионов долларов в год на одной производственной линии, в зависимости от масштабов производства и стоимости продукта.

**Заключение.** Мультиагентные системы искусственного интеллекта выступают многообещающей технологией, способной преодолеть существующие ограничения.

МАС обеспечивают децентрализованное, гибкое и масштабируемое управление благодаря совокупности автономных агентов, которые взаимодействуют между собой и с внешней средой, что позволяет эффективно моделировать и контролировать сложные биотехнологические процессы. Их способность к самоорганизации и адаптации открывает новые возможности для точного мониторинга, своевременного выявления отклонений и оптимизации ключевых параметров технологического процесса.

В ходе исследования была разработана архитектура мультиагентной системы, способная решать задачи отслеживания заражения биореактора, оптимизации состава питательной среды и параметров процесса. Предложенные сценарии взаимодействия агентов и методы интеграции с существующими системами управления демонстрируют потенциал значительного повышения производственной эффективности и качества продукции.

Таким образом, мультиагентные системы искусственного интеллекта представляют собой перспективный инструмент цифровизации и оптимизации биотехнологических процессов. Их дальнейшее развитие и практическая реализация способны существенно повысить конкурентоспособность биотехнологических предприятий и ускорить внедрение инноваций в отрасли.

## Литература

- [1] Загоскина Н.В., Назаренко Л.В. *Биотехнология*. Москва, Юрайт, 2024, 384 с.
- [2] Зубов Д.В., Толченев А.А. Автоматизированная система управления процессом биосинтеза ферментов. *Известия МГТУ МАМИ*, 2013, № 1 (15), с. 255–259.
- [3] Бондаренко А.С., Королев Д.В. Исследование эффективности использования мультиагентных моделей в современных микросервисных архитектурах. *International Journal of Open Information Technologies*, 2024, № 8, с. 48–55.
- [4] Бессмертный И.А. *Искусственный интеллект. Введение в многоагентные системы*. Москва, Юрайт, 2025, 148 с.
- [5] Лapidус Л.В., Кравченко А.А. Внедрение цифровых двойников в производственные циклы биотехнологических компаний в контексте концепции Pharma 4.0. *Интеллект. Инновации. Инвестиции*, 2024, № 5. <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2024-5-11>
- [6] *Моделирование, оптимизация и интенсификация производственных процессов и систем. Междунар. науч.-техн. конф.: матер.* Вологда, ВоГТУ, 2001, 249 с.
- [7] Ватьян А.С., Гусарова Н.Ф., Добренко Н.В. *Системы искусственного интеллекта*. Санкт-Петербург, Университет ИТМО, 2022, 186 с.

## Prospects for using multi-agent artificial intelligence systems to optimize biotechnological processes

Lapshin Leonid Alekseevich

leonid.lapshin.a@gmail.com

BMSTU, Moscow, Russia

*The paper examines the prospects for using multi-agent artificial intelligence systems (MAS) to optimize biotechnological processes. Primary attention is given to the role of multi-agent systems in optimizing bioreactor operations. An analysis of contemporary biotechnological processes has been conducted, and their key characteristics have been identified. The architecture of a multi-agent system has been developed. It is proposed to use machine learning methods and digital twins to forecast and adapt fermentation regimes in real time. The research results confirm that multi-agent artificial intelligence systems have high potential in tasks related to digitalization, monitoring, and optimization of biotechnological processes, enabling decentralized, flexible, and resilient management based on self-organization and adaptation.*

**Keywords:** *biotechnological processes, multi-agent systems, artificial intelligence, process optimization, bioreactor, production automation, machine learning*