

ФИЗИЧЕСКИЙ ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ: НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ И УГРОЗЫ

Основные понятия и области применения



Сергей Абламейко,
профессор механико-
математического факультета
Белорусского государственного
университета, академик



Рихард Богуш,
заведующий кафедрой факультета
информационных технологий
Полоцкого государственного
университета им. Евфросинии
Полоцкой, доктор технических
наук, профессор



Мария Абламейко,
доцент юридического факультета
Белорусского государственного
университета, кандидат
юридических наук, доцент

В последние десятилетия технологии искусственного интеллекта (ИИ) трансформировались из области теоретических исследований в ключевой фактор социально-экономического развития. ИИ проникает практически во все сферы человеческой деятельности: от промышленного производства и здравоохранения до систем интеллектуального анализа данных и информационной безопасности [1]. Столь стремительная экспансия стала возможной благодаря синергии трех фундаментальных компонентов: экспоненциального роста вычислительных мощностей, доступности колоссальных массивов данных (Big Data) и прорывных достижений в алгоритмике, в частности в методах глубинного обучения и обучения на базе многообразий. Осознание трансформационного потенциала искусственного интеллекта привело к признанию его приоритета в государственной политике более чем в 30 странах мира. Принятие национальных стратегий в этой области свидетельствует о понимании ИИ как фундаментальной основы новой цифровой экономики, что особенно актуально для Республики Беларусь в контексте ее технологической модернизации [2].

В широком научном смысле искусственный интеллект представляет собой совокупность методов и технологий создания систем, способных к выполнению интеллектуальных функций, традиционно считавшихся прерогативой человека. Современная классификация цифрового ИИ включает генеративные, перцептивные и агентные системы [3], которые на данном этапе преимущественно относятся к категории «слабого» ИИ. Однако научное сообщество активно работает над концепцией общего искусственного интеллекта (AGI), способного к автономному решению междисциплинарных задач и самообучению, что в долгосрочной перспективе гипотетически может привести к появлению сверхинтеллекта [4].

Наиболее динамичным вектором развития современных технологий в последние годы стала конвергенция цифрового интеллекта и робототехники. Если промыш-

ленные роботы XX в. были ориентированы на выполнение жестко заданных алгоритмов в стабильных условиях, то интеграция ИИ открыла новую эру универсальности и автономности. Результатом этого слияния стало возникновение физического ИИ – систем, интеллект которых проявляется не только в обработке данных, но и в адаптивном взаимодействии с физическим миром (рис. 1). Эта статья посвящена анализу эволюции робототехнических систем от пассивных исполнителей к интеллектуальным автономным агентам, способным функционировать в динамически меняющейся среде.

Концептуальные основы физического ИИ

Физический ИИ является следующим поколением искусственного интеллекта, объединяющим нейросети с робототехникой и мехатроникой и интегрированным с физическими системами –

роботами, машинами, датчиками и периферийными устройствами, которые могут воспринимать информацию, действовать и обучаться в реальных условиях. Это позволяет интеллектуальным системам обрабатывать данные, принимать решения и взаимодействовать с окружающей средой. Иными словами, физический ИИ – это искусственный интеллект, который не просто анализирует данные, а понимает материальный мир, взаимодействует с ним осмысленно [5]. В рамках этого цикла выделяют 6 базовых принципов, формирующих структурную основу физического ИИ [6]:

- **воплощенность** – интеллект возникает в процессе влияния материального тела на окружающую среду, а не в абстрактных вычислениях;
- **сенсорное восприятие** – преобразование физических сигналов (свет, звук, давление) в осмысленное представление о мире;
- **динамическая компетентность** – способность адаптировать движения под требования среды и цели, обеспечивая стабильность, точность и безопасность действий;
- **способность к обучению** – непрерывная модификация внутренних моделей и стратегий поведения на основе опыта взаимодействия со средой;
- **автономность** – самостоятельное формирование целей и регулирование действий в рамках заданных безопасных границ без постоянного внешнего контроля;
- **контекстная чувствительность** – учет социального, пространственного и ситуативного контекста при планировании и исполнении действий.

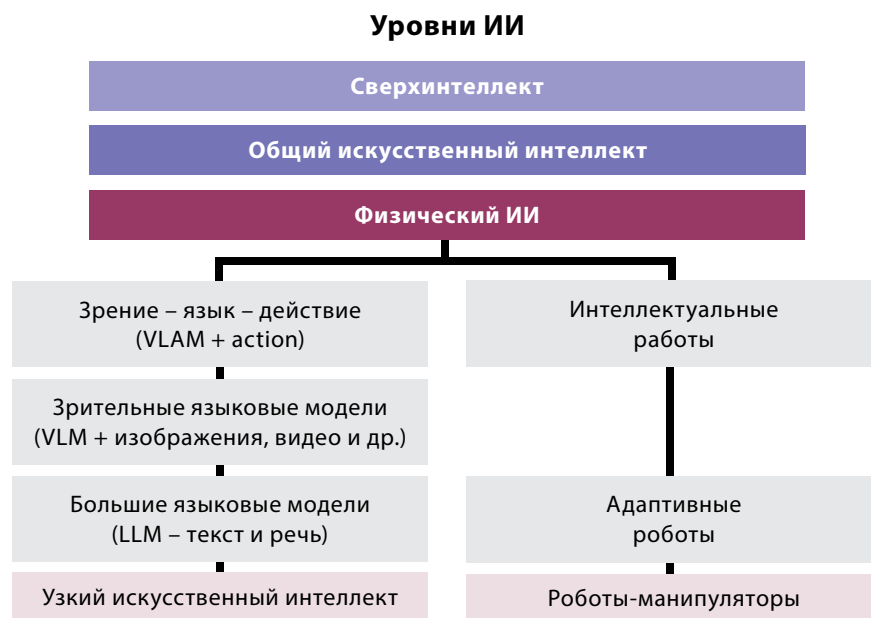


Рис. 1. Эволюция ИИ и появление физического ИИ

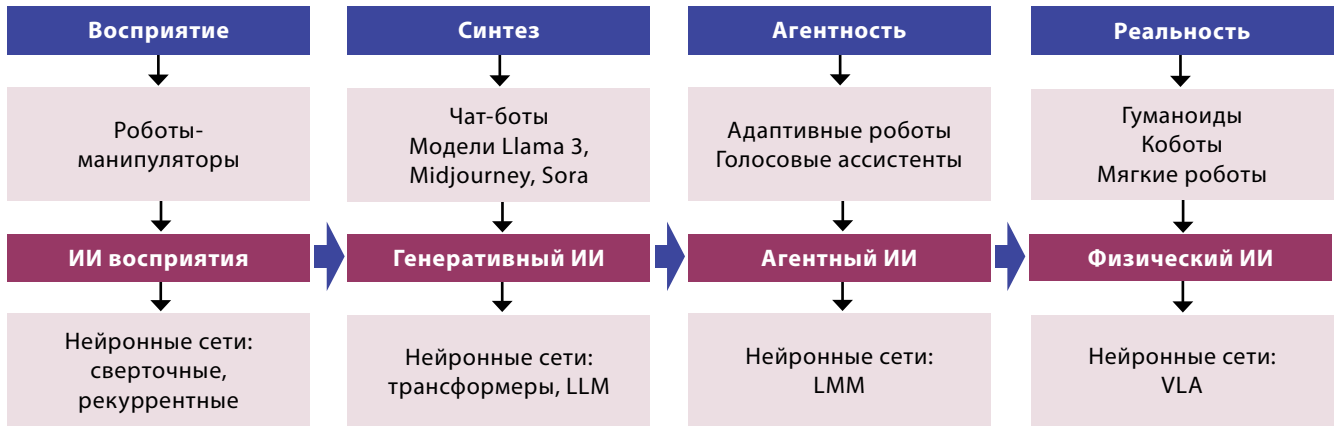


Рис. 2. Взаимодействие различных видов цифрового и физического ИИ

Данные принципы взаимосвязаны и цикличны: действие изменяет восприятие, обновленное восприятие корректирует последующие действия, создавая непрерывный процесс адаптации к динамичной физической среде.

Таким образом, физический ИИ относится к системам искусственного интеллекта, которые не только обрабатывают информацию и принимают решения в цифровом пространстве, но и напрямую взаимодействуют с реальным миром, используя датчики для восприятия окружающей среды, моделируют его динамические состояния, принимают автономные решения, реализуют их с помощью исполнительных механизмов [7] (рис. 2).

Ключевые компоненты и технологии физического ИИ

Физический ИИ представляет собой сложную экосистему, в которой возможности работы определяются не только интеллектуальностью программного обеспечения, но и качеством его «физического тела» – сенсорами, двигателями, камерами и вычис-

лительными элементами. Это происходит в том числе через компьютерное зрение, включающее в себя набор методов, позволяющих компьютеру «видеть» и извлекать информацию. Также это теория и технологии создания интеллектуальных систем, которые могут обнаруживать, отслеживать и классифицировать объекты видеoinформации [8] (рис. 3).

Видеоинформация может быть представлена в разных формах, таких как статические изображения, видеопоследовательности, стереоизображения. Методы компьютерного зрения

соединяются с большими языковыми моделями (LLM), одновременно интегрируют данные, описывающие физический мир, и ИИ становится мультимодальной системой. Некоторые из них, к примеру «зрение-язык-действие» (VLA) объединяют компьютерное зрение, обработку естественного языка и управление движением и подобно человеческому мозгу помогают системам с физическим ИИ интерпретировать окружающую среду и выбирать соответствующие действия [9].

В настоящее время наблюдается определенная трансформация

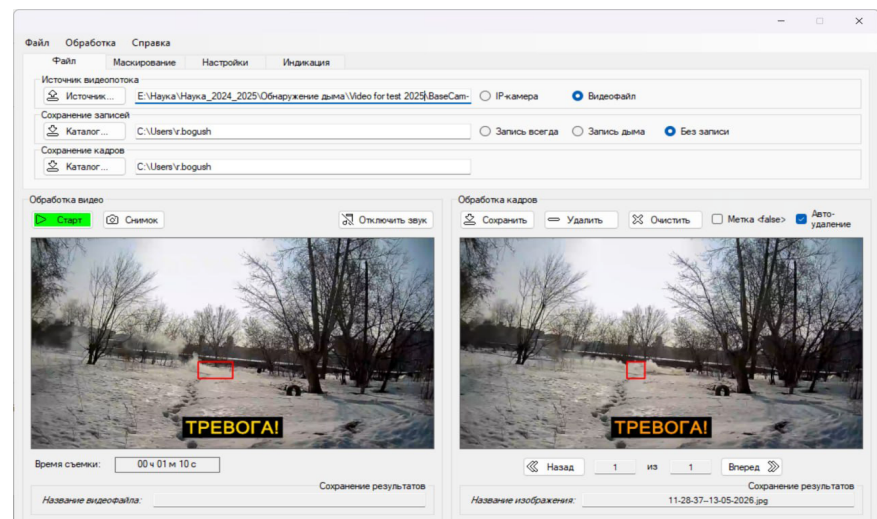


Рис. 3. Интеллектуальный детектор дыма по последовательностям изображений систем видеонаблюдения

парадигмы в области разработки интеллектуальных систем. Ряд экспертов отмечает, что потенциал развития исключительно текстовых больших языковых моделей близок к насыщению, что стимулирует смещение исследовательского фокуса в сторону мультимодальных архитектур [10]. Ключевым направлением здесь становится создание нового класса базовых VLA-моделей, которые объединяют визуальное восприятие, понимание естественного языка и управление физическими действиями в единую сквозную архитектуру. В отличие от традиционных подходов, требующих явного программирования последовательностей движений, VLA-системы позволяют роботу интерпретировать визуальный поток и текстовую инструкцию для непосредственной генерации низкоуровневых управляющих сигналов. Параллельно с алгоритмическими решениями критически важным аспектом формирования «интеллекта» робототехнических устройств становится сенсорика, в частности тактильные технологии. Если на заре становления робототехники тактильная обратная связь рассматривалась как вспомогательный канал данных, то сегодня она приобретает статус центрального элемента системы управления. Прорывные технологии в области тактильных сенсоров обеспечивают роботам необходимую точность взаимодействия с объектами в условиях неопределенности, что является фундаментальным условием для полноценной реализации физического ИИ [11].

Информацию о положении и движении собственных частей тела робота представляют проприоцептивные сенсоры, интегрированные непосредственно

в конструкцию исполнительных устройств, актуаторов. Например, использование проводящей резины, которая меняет свое электрическое сопротивление при растяжении, позволяет создавать такие сенсоры внутри рук роботов [12]. Кроме указанных направлений разрабатываются и другие типы сенсоров, в частности пьезоэлектрические, электрогидравлические, композитные. Как видим, сенсорная экосистема физического ИИ представляет собой высокоинтегрированную, во многих случаях биомиметическую систему, в которой данные разных модальностей обрабатываются с помощью глубоких нейросетевых архитектур для полного и семантически богатого представления окружающего мира, необходимого для автономного действия роботов.

В рамках парадигмы физического ИИ механизмы саморегуляции выступают фундаментальной основой самообучения. С этой точки зрения интеллектуальное поведение трактуется не как последовательность дискретных команд, а как непрерывная обратная связь в замкнутом контуре, объединяющем восприятие, моторную активность, адаптацию и управление. Данные процессы носят нелинейный, циклический характер: действия системы трансформируют среду,

что, в свою очередь, меняет входящие сенсорные данные, которые корректируют последующее поведение агента. Подобная концепция «воплощенного интеллекта» подчеркивает, что он не является исключительно продуктом вычислительных операций, а возникает в процессе активного взаимодействия системы с физическим миром, где каждое действие – это одновременно и акт познания, и способ воздействия на окружающую среду.

Для физического ИИ одним из основных методов обучения выступает обучение с подкреплением. В таком случае роботы развивают сложные модели поведения методом проб и ошибок, получая вознаграждения или штрафы. Другой подход – имитационное обучение, предполагающее воспроизведение действий объектов в физическом мире или перенос знаний в реальность из симуляции (Sim2Real), которая предоставляет условно бесконечный и безопасный источник данных для обучения моделей [13]. Это требует создания цифрового двойника – реального робота, непрерывно синхронизирующегося с ним в онлайн-режиме. Поэтому ключевым инструментом для формирования доказательной базы и снижения рисков при разработке физического ИИ выступает высокоточное компью-

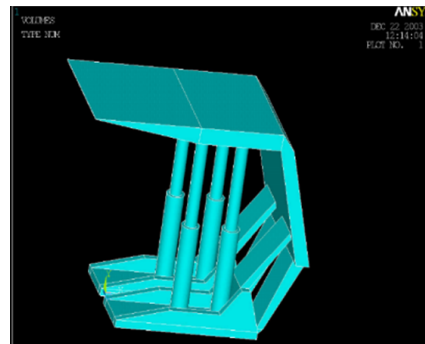


Рис. 4. Крепь для горных работ и ее цифровой двойник

терное моделирование. Использование виртуальных сред позволяет проводить итеративное тестирование, отладку и обучение алгоритмов в условиях, максимально приближенных к реальности, но лишенных физических угроз для оборудования и людей. Таким образом, возрастает необходимость разработки технологий компьютерного моделирования, которые позволяют создавать цифровые двойники всех существующих объектов [14] (рис. 4).

Подобная интеграция виртуальных и физических систем становится фундаментом для разработки надежного и масштабируемого физического ИИ с непрерывными циклами обучения, способностью постоянно совершенствоваться, используя данные из реального мира для формирования стратегий обучения и моделирования.

Обобщив, можно выделить следующие ключевые технологические особенности физического ИИ:

- **сложная технологическая база:** объединение глубокого обучения, компьютерного моделирования, мехатроники и точного машиностроения. Первоначальное обучение зачастую происходит в симуляциях (цифровых двойниках);
- **понимание физической природы явлений и предметов:** ИИ обучается на моделях VLA, воспринимая физические свойства предметов (вес, хрупкость, текстуру);
- **встроенные вычисления:** автономность без зависимости от облачных решений, применение непосредственно в устройствах специализированных нейропроцессоров для обработки данных в реальном времени,

Критерий	Цифровой ИИ	Физический ИИ
Среда функционирования	Цифровая (данные, текст, изображения)	Физический мир (динамичный, различные виды шумов, непредсказуемый)
Выход системы	Рекомендации, прогнозы, генерация контента	Физические действия (движение, манипуляции, взаимодействие)
Обратная связь	Символьные метрики точности	Сенсомоторная (изменение состояния среды)
Ограничения	Вычислительные ресурсы, качество данных	Физические законы, энергопотребление, безопасность в реальном времени
Пример	Анализ КТ-снимка для диагностики	Робот-хирург, выполняющий разрез с учетом сопротивления тканей

Таблица. Сравнение цифрового и физического ИИ

энергоэффективность для длительной работы;

- **многослойная экосистема:** управление машинами, роботами или физическими процессами в замкнутом цикле.

Реальный мир в отличие от цифрового намного более динамичен, непредсказуем и полон шума. Поэтому физический ИИ должен постоянно адаптироваться к изменениям, что делает его более сложным эффективным. Его важным отличием является устойчивая работа в сложной, с множеством неопределенностей, физической среде. Например, анализ медицинских изображений с помощью традиционной системы ИИ остается в цифровой сфере, обрабатывает данные и предоставляет аналитические выводы. Система физического ИИ может представлять собой роботизированного хирургического ассистента, который не только анализирует изображения, но и помогает в операции, точно управляя инструментами в режиме реального времени. Подобный робот должен уметь интерпретировать команды хирурга, адаптироваться к движениям пациента и реаги-

ровать на неожиданные события во время операционного вмешательства, что требует бесшовной интеграции ИИ с физическим управлением.

Обобщенные основные отличия цифрового и физического ИИ по различным критериям показаны в таблице.

Области практического применения физического ИИ

Практическое приложение физического ИИ перспективно для многих областей, от роботизированных манипуляторов на производственных линиях и автономных дронов, обследующих местность, до систем на базе ИИ, управляющих складскими парками.

В качестве сфер использования можно выделить: производство, строительство, робототехнику, беспилотные автомобили, промышленность, умные фабрики (Индустрия 5.0), точное сельское хозяйство и др.

Очевидно, что робототехника играет важную роль в этих

средах, и среди распространенных вариантов ее применения можно выделить коллаборативных роботов на сборочных линиях, дроны-инспекторы с возможностями автоматического реагирования, роботизированные манипуляторы и автономные погрузчики. Физический ИИ может объединять данные с различных типов датчиков для прогнозирования отказов оборудования на производстве, что позволяет небольшим командам по техническому обслуживанию работать превентивно, а не реактивно.

В области строительства ИИ может анализировать данные с камер видеонаблюдения, датчиков погоды и риски для безопасности рабочих в режиме реального времени. На строительных площадках эта технология способна помочь меньшему числу специалистов по безопасности контролировать крупные объекты.

Важным направлением применения физического ИИ являются беспилотные транспортные средства, легковые автомобили, грузовики и автоматизированные складские роботы, которые перемещаются, избегают препятствий и перемещают товары. Перспективна промышленная автоматизация с использованием роботов, которые предназначены для совместной работы с людьми на одной производственной площадке, адаптируясь к задачам без необходимости использования защитных ограждений.

Медицинская робототехника на базе физического ИИ представляет собой сложные хирургические системы, такие как роботизированные манипуляторы, которые корректируют свои движения в ответ на сопротивление тканей и тем самым повышают точность

вмешательства, в том числе автономного, с учетом анализа состояния пациента.

Сельскохозяйственные дроны и машины, использующие физический ИИ, способны автономно контролировать состояние урожая, обнаруживать вредителей и осуществлять сбор сельскохозяйственных культур. Также инспекция инфраструктуры может осуществляться с помощью дронов и роботов, в том числе гусеничных, которые проводят проверку трубопроводов и линий электропередач.

Физический ИИ может значительно повысить производительность и эффективность производства. Роботы, работающие на основе ИИ, и «умные»

заводы способны производить товары быстрее и с меньшим количеством ошибок. В логистике автономные транспортные средства помогут оптимизировать цепочки поставок, что снизит затраты и ускорит доставку. «Умные» материалы и системы физического ИИ, встроенные в различные устройства, способствуют большей экологичности. Здания из специальных материалов будут потреблять меньше энергии, а интеллектуальные сети обеспечат оптимальное использование электроэнергии из возобновляемых источников. ■

Продолжение следует.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. О'Коннелл М. Искусственный интеллект и будущее человечества. – М., 2019.
2. Глобальный атлас регулирования искусственного интеллекта. Восточный вектор / под. ред. А.В. Незнамова. – М., 2022.
3. Стори В., Юэ В.Т., Чжао Д. Л., & Лукьяненко Р. Генеративный искусственный интеллект: развивающиеся технологии, растущее влияние на общество и возможности для исследований // <https://link.springer.com/article/10.1007/s10796-025-10581-7>.
4. Сильный искусственный интеллект: на подступах к сверхразуму / Александр Ведяхин [и др.]. – М., 2021.
5. Y. Li, Z. Li, Y. Duan and A.B. Spulber. Physical artificial intelligence (PAI): the next-generation artificial intelligence // *Frontiers of Information Technology and Electronic Engineering*. 2023. Vol. 24, №8. P. 1231–1238. Doi: 10.1631/FITEE.2200675.
6. Salehi V. Fundamentals of Physical AI // *Journal of Intelligent System of Systems Lifecycle Management*. 2025. Vol. 2. // <https://doi.org/10.71015/z6mc6967>.
7. Богуш Р.П. Увеличение точности реидентификации людей на основе двухэтапного обучения сверточных нейронных сетей и аугментации / С.А. Игнатьева, Р.П. Богуш // *Информатика*. 2023. № 20(1). С. 40–54.
8. Dewi R.S., Kawakib A. N., Laili M. N., Fauziah A. L., Sabrina S. R., & Hana R. L. A Systematic Review of Physical Artificial Intelligence (Physical AI): Concepts, Applications, Challenges, and Future Directions. *Journal of Artificial Intelligence and Engineering Applications (JAIEA)*, 2025. №4(3). P. 2246–2253 // <https://doi.org/10.59934/jaiea.v4i3.1101>.
9. Sapkota R., Cao Y., Roumeliotis K., Karkee M. Vision-Language-Action (VLA) Models: Concepts, Progress, Applications and Challenges // <https://doi.org/10.48550/arXiv.2505.04769>.
10. Волфенштейн К. Физический ИИ, Индустрия 5.0 и робототехника // <https://xpert.digital/ru>.
11. Embedding high-resolution touch across robotic hands enables adaptive human-like grasping // <https://arxiv.org/html/2412.14482v3>.
12. KineSoft: Learning Proprioceptive Manipulation Policies with Soft Robot Hands // <https://arxiv.org/html/2503.01078v2#bib.bib1>.
13. Real-is-Sim: Bridging the Sim-to-Real Gap with a Dynamic Digital Twin for Real-World Robot Policy Evaluation // <https://arxiv.org/html/2504.03597v1>.
14. Журавков М., Босьяков С., Щербakov С. Технологии искусственного интеллекта: системы компьютерного моделирования в прикладных исследованиях // *Наука и инновации*. 2023. №4 (242). С. 43–51.