

Научная статья

Original article

УДК 004; 577.2

doi: 10.55186/2413046X\_2024\_9\_10\_414

**СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ ПРИМЕНЕНИЯ ИСКУССТВЕННОГО  
ИНТЕЛЛЕКТА В ОБЛАСТИ БИОТЕХНОЛОГИИ США  
TRENDS IN ARTIFICIAL INTELLIGENCE FOR BIOTECHNOLOGY**



**Жиганова Лариса Петровна**, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Институт США и Канады Российской академии наук (ИСКРАН), Российская Федерация, 121069, Москва, Хлебный пер., д.2/3 (Larissa-Zhiganova@yandex.ru)

**Zhiganova Larissa Petrovna**, PhD in Biology, senior researcher, Institute of USA and Canada Studies, Russian Academy of Sciences (ISKRAN) 2/3 Khleby pereulok, Moscow, Russian Federation 121069, e-mail: [Larissa-Zhiganova@yandex.ru](mailto:Larissa-Zhiganova@yandex.ru)

**Аннотация.** Применение искусственного интеллекта (ИИ) в сфере биотехнологий США подразумевает цифровизацию процессов в сельском хозяйстве: растениеводстве и животноводстве. На основе полученного массива данных технологии машинного обучения позволяют исследовать ключевые биологические процессы, контролировать и управлять ими. Системы ИИ интегрируют с другими цифровыми технологиями, такими как датчики процессов и состояний, киберфизические системы, беспилотные летательные аппараты, которые в совокупности с алгоритмами компьютерного зрения и глубокого обучения помогают контролировать состояние сельскохозяйственных культур и почвы, отслеживать и

прогнозировать изменения окружающей среды, влияющие на урожайность сельскохозяйственных культур. «Умное» сельское хозяйство позволяет оценить экологическую устойчивость через круговорот питательных веществ и экономическую стабильность благодаря управлению пахотными и пастбищными угодьями при помощи сенсорных систем, фиксирующих данные о почве, растениях и погоде. Цифровая трансформация и применение искусственного интеллекта является перспективным инновационным направлением, которое обладает огромным потенциалом для повышения эффективности, точности и скорости исследований и разработок, а также создает новые условия для появления революционно новых продуктов и услуг.

**Abstract.** The application of artificial intelligence (AI) in biotechnology implies the digitalization of processes in agriculture and livestock farming. Based on big data analysis, machine learning technologies make it possible to study, monitor and control key biological processes. AI systems integrate with other digital technologies, such as process and state sensors, cyber-physical systems, unmanned aerial vehicles, which, together with computer vision and deep learning algorithms, help to monitor the condition of agricultural crops and soil, check and predict environmental changes that affect crop yields. Smart agriculture makes it possible to assess environmental and economic sustainability through nutrient cycling, as well as to manage arable and pasture lands using sensor systems that record data on soil, plants and weather. Digital transformation and the application of artificial intelligence is a promising innovative direction that has enormous potential to increase the efficiency, accuracy and speed of research and development, and also creates new conditions for the emergence of revolutionary products and services.

**Ключевые слова:** искусственный интеллект, продовольственная безопасность, биоразнообразие, биотехнология сельскохозяйственных культур

**Keywords:** artificial intelligence, food security, biodiversity, biotechnology of agricultural crops

### **Введение**

Искусственный интеллект (ИИ) – это одно из перспективных направлений развития цифровых технологий в современном мире. Применение уже разработанных методик и алгоритмов машинного обучения в области биотехнологий открывают дорогу новым инновационным подходам. Для того, чтобы ускорить процессы и уменьшить количество ручных ошибок при исследованиях ключевых биологических процессов, системы ИИ интегрируют с другими цифровыми технологиями, такими как всевозможные датчики процессов и состояний, субъекты (киберфизические системы (CPS), часто называемые просто роботами), технологии автоматизации задач, сбора и анализа данных. Необходимым условием для подобной интеграции является цифровизация данных. Сегодня ИИ уже широко используется при разработке лекарственных препаратов и определении безопасности их применения [1, 2, 3, 4, 5], а также в таких областях как функциональная и структурная геномика [6, 7], протеомика [8, 9], метаболомика и многих других [10, 11, 12, 13]. Для коммерческих компаний, государственных организаций, исследовательских институтов и университетов использование цифровых технологий означает фундаментальное изменение методов работы. В контексте биотехнологий цифровая трансформация подразумевает внедрение инноваций для повышения эффективности, точности и скорости исследований и разработок, а также создание новых условий для разработки революционных продуктов и услуг.

Искусственный интеллект – принятое обозначение в информатике так называемых «умных» машин [14]. Однако термин «интеллект» четко не определен, а измерение «интеллекта» является крайне сложным [15]. Создание искусственного интеллекта было инициировано в 1956 году

группой ученых-специалистов IT во время семинара в Дартмутском колледже (частный исследовательский университет в США). Заявленные цели были чрезвычайно амбициозными: «В основе исследования лежит гипотеза о том, что каждый аспект обучения или любая другая особенность интеллекта в принципе может быть описана настолько точно, что можно создать машину для его моделирования, заставить машины использовать язык, формировать абстракции и концепции, решать проблемы, которые пока требуют участия человека, а также совершенствоваться в этих навыках». [16]

Искусственный интеллект, машинное обучение (machine learning, ML) и глубокое обучение (deep learning, DL) взаимосвязаны, но не тождественны. Ключевые различия состоят в следующем:

- ИИ – это общий термин, относящийся к созданию интеллектуальных систем, которые могут выполнять задачи, требующие участия интеллекта человека (такие как обучение, решение проблем и принятие решений);
- машинное обучение – это вид ИИ, который предполагает обучение цифровых компьютеров выполнять задачи без детальных инструкций, с использованием шаблонов и знаний из баз данных;
- глубокое обучение – это вид машинного обучения с использованием многоуровневых искусственных нейронных сетей для обучения и принятия решений. Оно особенно полезно для решения задач, связанных с анализом больших объемов данных, таких как изображения (например, DALL-E2) или текст (например, ChatGPT).

Символический ИИ – это тип ИИ, который предполагает символическое представление знаний (пример: собака (является млекопитающим) (есть шерсть) (обладает признаком – четыре ноги)) и использование логических правил для манипулирования этими символами при решении задач. Этот тип отличается от машинного обучения и глубокого обучения, которые не исходят из очевидных закономерностей, а, скорее, учатся распознавать закономерности в данных. Символический ИИ сегодня используется реже,

поскольку машинное обучение и глубокое обучение стали более популярными для распознавания изображений и речи. Однако символический ИИ применяется в ряде приложений, таких как обработка естественного языка и экспертные системы [17], [18].

С момента своего создания ИИ представляет собой чрезвычайно широкую область, начиная от философских осмыслений и заканчивая конкретными приложениями для практического применения [19]. Однако, ажиотаж завышенных ожиданий того, что якобы через 10 лет всё, что могут делать люди, сможет сделать и машина, к 80-ым годам XX века сошел на нет [20]. Разочарование охватило практически всю отрасль, и многие учёные к тому моменту отвернулись от ИИ, и даже сам термин ИИ был на некоторое время почти запрещен.

Но поразительные успехи в области машинного обучения при обработке больших статистических данных вернули интерес к искусственному интеллекту. Это произошло в 2010 году, когда применение алгоритмов машинного обучения, а именно – «глубокого обучения» (Siri, Alexa, DeepL и т.д.) показало выдающиеся результаты как в промышленности, так и в повседневной жизни. Лучшим примером того, на что способен сегодня ИИ, является новейшая технология естественного языка, разработанная американской компанией OpenAI, под названием ChatGPT [21]. Она демонстрирует, что может и чего еще не может современный искусственный интеллект. Сегодня эффективность машинного обучения ограничена неспособностью алгоритма повторно отслеживать результаты, интерпретировать и объяснять их экспертам-людям [22]. Это большая проблема для естественных наук в целом и для биотехнологий в частности.

OpenAI — американская научно-исследовательская организация, занимающаяся разработками в области искусственного интеллекта. В состав OpenAI входят зарегистрированная в штате Делавэр некоммерческая организация OpenAI, Inc и её дочерняя коммерческая компания OpenAI

Global, LLC. OpenAI ставит перед собой цель разработать «безопасный и полезный» сильный искусственный интеллект, который организация определяет как «высокоавтономные системы, превосходящие человека в выполнении наиболее экономически ценной работы». На пути к этой цели организация и создала несколько больших языковых моделей, в том числе GPT-4 и ChatGPT, а также моделей для генерации изображений, как DALL-E; в прошлом она публиковала модели с открытым исходным кодом.

Некоммерческая организация OpenAI была основана в декабре 2015 года; её сопредседателями стали Сэм Олтмен и Илон Маск. В число основателей и руководителей организации и её дочерней коммерческой компании вошли учёные и инженеры, работающие в области искусственного интеллекта. В 2023 г. компания Microsoft инвестировала в OpenAI 10 миллиардов долларов.

### **Применение искусственного интеллекта в сельском хозяйстве США**

Биотехнологические компании используют ИИ для разработки автономных роботов, которые выполняют важные сельскохозяйственные задачи гораздо быстрее, чем люди, например, сбор урожая. При помощи алгоритмов компьютерного зрения и глубокого обучения анализируют данные, получаемые беспилотными летательными аппаратами (БПЛА), что помогает контролировать состояние сельскохозяйственных культур и почвы. ИИ помогает отслеживать и прогнозировать различные изменения окружающей среды, включая изменения погоды, влияющие на урожайность сельскохозяйственных культур.

Цифровизация процессов применяется в сфере «умного сельского хозяйства» при оценке экологической и экономической устойчивости через круговорот питательных веществ [23]. Например, в молочном животноводстве с управлением пахотными и пастбищными угодьями различные датчики сенсорных систем записывают данные о почве, растениях и погоде. На молочных фермах выводы о поступлении и использовании питательных веществ делают путем сбора данных о кормлении и надое

молока. Однако для оптимизации круговорота питательных веществ соответствующие данные должны быть полными и высокого качества. Зачастую это является основной проблемой. Важными вопросами здесь выступают совместимость, единообразие и методика анализа. Цифровая обработка пищевой цепи дает фермерам информацию о текущем балансе и таким образом позволяет выявить проблемные области.

Также, ИИ задействован в решении проблем продовольственной безопасности, адаптируя управление сельским хозяйством к меняющемуся климату. Это позволяет выявить культуры более устойчивые к изменениям окружающей среды и экстремальным явлениям. Фермеры могут поддерживать урожайность сельскохозяйственных культур в условиях абиотического стресса – при экстремальных температурах и засухах (повышение температуры снижает урожайность зерновых культур на 6% на каждый градус С [24], поскольку активность фермента рибулозобисфосфаткарбоксилазы и фотосинтез прекращаются при температуре выше 35С [25, 26]).

В дополнении к моделям, которые уже используют для оценки биомассы, классификации культур и картирования характеристик почвы, необходимо применение искусственного интеллекта вместе с недорогими многоканальными датчиками, а также дистанционное зондирование для сбора больших данных, – все это требует эффективной цифровой инфраструктуры [27]. Технологии ИИ также могут помочь выявлять измененные сельскохозяйственные культуры по фенотипам, которые более эффективно используют ресурсы и устойчивы к изменениям климата. За последние десять лет фенотипирование стало ключевой дисциплиной в области науки о растениях [28] и является сегодня одним из ведущих методов селекции [29]. Поскольку изменение климата сопровождается увеличением воздействия вредителей и болезней, крайне важно, чтобы программы селекции растений также учитывали и естественные защитные

механизмы сельскохозяйственных культур, включая диких родственников, которые часто демонстрируют более разнообразный ризомикробиом (корневые системы с микробиологической составляющей) и корневые выделения. Дикie родственники окультуренных растений обладают пулом генетического разнообразия, позволяющим повысить адаптационный потенциал сельскохозяйственных систем при ограниченных ресурсах и росте числа заболеваний растений. Помимо фенотипирования на основе изображений в селекции растений также предложены технологии визуализации для выявления эффекта биостимуляторов, что открывает, как считают, революционные перспективы для повышения приспособляемости растений [30, 31]. Анализ и синтез данных фенотипирования и показателей реакции на стресс на молекулярном уровне (геномные вариации, экспрессия генов и белков, биосинтез метаболитов стрессоров и их дозы) для разработки протоколов управления гормезисом (стимулирующее действие умеренных доз стрессоров) [32] – пример эффективного использования ИИ в сельском хозяйстве.

Следует отметить, что доступность данных растет в геометрической прогрессии. Информацию получают через технологии дистанционного зондирования, платформы фенотипирования на основе изображений в теплицах, с аппаратов БПЛА, а также со спутников. Для эффективной обработки этой информации решающее значение имеют достижения в области алгоритмов компьютерного зрения [33]. Так, например, данные с БПЛА со специализированными датчиками имеют высокую точность и предсказуемость для принятия управленческих решений. Считается, что они более объективны, чем традиционные методы визуального подсчета, точечные датчики с ограниченными размерами выборок, которые не позволяют обнаруживать изменения в полевых условиях. Данные обеспечивают не только точное пространственное, но и высокое временное разрешение, например, при росте растений [33]. ИИ анализирует показатели



фенотипирования растений в полевых условиях, урожайность и рост биомассы, мониторинг заболеваний сельскохозяйственных культур, водный дефицит сельскохозяйственных культур и картирование сорняков, а также такие характеристики сельскохозяйственных культур, как индекс роста, высота кроны и покрова. Огромным преимуществом фенотипирования при помощи БПЛА является обработка информации при помощи ИИ поскольку это повышает производительность и надежность моделей за счет машинного обучения.

Получение изображений заболеваний растений в режиме реального времени при помощи БПЛА с использованием ИИ позволяет целенаправленно и автоматически распылять пестициды и удобрения с высокой точностью, а также снижать риски загрязнения сельскохозяйственных культур, животных, людей и других ресурсов окружающей среды (например, водных объектов). Определение зрелости культур и сроков сбора урожая также является областью применения компьютерного зрения и искусственного интеллекта в точном земледелии. Сегодня эта технология уже находится на том этапе развития, когда модели компьютерного зрения превосходят по точности наблюдения, выполняемые человеком [34]. После сбора урожая ИИ с алгоритмами визуализации можно использовать для сортировки и классификации продукции, выявлять болезни и дефекты, сортировать по размеру, форме и цвету [35], а также оценить качество продукции [36]. Автоматизируя процессы, ИИ может решить проблемы с нехваткой рабочей силы, с которой уже сталкиваются многие промышленно развитые страны.

### **Искусственный интеллект в молекулярной биологии**

Применение инструментов молекулярной биологии, в частности генетического редактирования ДНК для улучшения свойств животных или растений, называется молекулярной селекцией. Инструменты включают в себя селекцию с помощью молекулярных маркеров или геномную селекцию,

а также генную инженерию [37]. Методика культивирования тканей растений эффективно применяется при размножении культур в коммерческих масштабах. В последние годы ее использовали для (1) быстрого производства растений независимо от сезона, (2) производства сортов, устойчивых к жаре, засухе, засолению, (3) растений, устойчивых к болезням, (4) для сохранения исчезающих видов и (5) генетической трансформации культур. С помощью данных технологий возможно сохранить желаемую генетику культур, равномерный рост растений, улучшить геном растений и выйти на круглогодичное производство независимо от сезона.

ИИ активно применяют при работе с тканевыми культурами растений [38]. Культура тканей растений, основанная на «тотипотентности» – способности стволовых клеток дифференцироваться во все типы клеток – обеспечивает основу для «микроразмножения» [38]. Растения выращивают в сосудах с питательной средой, культура *in vitro* содержит питательные вещества и регуляторы роста. Низкорослость растений *in vitro* по сравнению с *in vivo* привела к появлению термина «микроразмножение». «Микроразмножение» является одной из наиболее важных технологий размножения и селекции сельскохозяйственных культур. Она позволяет получать растения из клеток и тканей путем развития соматических зародышей или адвентивных побегов. Конкретные потребности в питательных веществах различных растительных клеток и тканей различаются в зависимости от вида растений, и, следовательно, улучшение питательных сред — это трудоемкий процесс, требующий огромного количества составов сред. В этом случае модели искусственного интеллекта очень полезны для решения проблемы сложных взаимодействий культуры со множеством факторов *in vitro*, которую невозможно решить с помощью огромного количества обработок и традиционной статистики. ИИ моделирует и прогнозирует развитие и рост растительной ткани *in vitro* в различных условиях для оптимизации среды [38]. Эти возможности моделей

ИИ справляться с различными системами *in vitro* легли в основу универсального метода, применяемого учеными, изучающими растительные ткани [38].

### **Мониторинг ресурсов при помощи ИИ**

ИИ также полезен для мониторинга состояния почвы. Компьютерное зрение способно детально описать органическое вещество и текстуру почвы в больших пространственных масштабах, предоставляя информацию для улучшения существующих почвенных карт, что обычно требует больших временных и финансовых затрат. Лабораторные данные, а также недорогие портативные устройства могут использоваться для обучения алгоритмов определения состояния почвы или возможностей по ее улучшению. Сложные взаимодействия внутри сельскохозяйственных экосистем с учетом взаимоотношений между микроорганизмами, растениями и животными, а также человеком и параметрами его здоровья – еще одна сфера применения ИИ. В частности, роль грибов и бактерий в почве определяет конструкцию и диапазон управляющих процессов системы. Наборы данных высокого разрешения с биостатистико-математическим моделированием являются инструментами для определения ключевых видов для динамической буферизации или стабилизации экосистем.

Составление точных карт состояния почвы для различных зон землепользования является ключевой задачей на пути к эффективному управлению и требует сбора точных пространственных данных и, следовательно, более эффективного использования информации дистанционного зондирования, выходящей за рамки нынешнего уровня техники. Помимо новых дистанционных датчиков с более высоким пространственным разрешением и расширенными спектральными диапазонами, крайне необходимы более совершенные алгоритмы обучения, позволяющие делать выводы о подземных процессах на основе объединения данных. Мультимодальная обработка для объединения данных о

биоразнообразия почвы с другими типами экологической информации (например, почвенными картами, метеорологическими данными) может улучшить наше понимание и возможности мониторинга состояния почвы, а также влияния основных природных и антропогенных факторов. Анализ этих данных позволит более точно оценивать экологические риски с точки зрения биоразнообразия и потерь экосистемных функций в сельскохозяйственных системах.

Свойства и функции почвы, такие как органический состав, объем пор, агрегативная стабильность, водоудерживающая способность, активность микроорганизмов и доступность питательных веществ (в основном азота), крайне важны для состояния окружающей среды и урожайности сельскохозяйственных культур. На эти функции почвы значительно влияют методы возделывания почвы (обработка почвы, механическая борьба с сорняками) и севооборот культур (чередование бобовых, злаково-бобовых, полевых трав). Положительное влияние сельскохозяйственных культур на почву через доставку питательных веществ и в качестве источников органики часто не учитывается из-за отсутствия немедленных мер реагирования. Тем не менее, устойчиво управляемые почвы играют важную роль в смягчении последствий изменения климата, сохраняя стабильный почвенный органический углерод и сокращая выбросы парниковых газов в атмосферу [39]. Это привело к переосмыслению методов ведения сельского хозяйства, поскольку плодородные и «здоровые» почвы являются критически важным ресурсом.

Мониторинг состояния почвы с использованием диагностики почвенного микробиома и моделей ИИ дал наиболее точную информацию при обучении с самым высоким таксономическим разрешением, по данным американских ученых Wilhelm, van Es, Buckley Buckley [40]. Сегодня важность контроля за управлением и повышением продуктивности сельскохозяйственных культур и устойчивых сельскохозяйственных систем растет. Однако по-прежнему

отсутствуют универсальные параметры или простые методы, которые позволили бы проводить высокопроизводительный анализ качества и здоровья почвы [41]. Необходимы оптимальные физико-химических характеристики, которые менее чувствительны к деградации почвы; и биологические характеристики, быстро реагирующие, но чувствительные к сезонным изменениям.

Почвенная микробиота вырабатывает ферменты и активно способствует формированию биофизических структур, необходимых для функционирования почвы, и тем самым обеспечивает «качество», «здоровье» и «плодородие» почв. Интегрирование и анализ этой информации, полученной из данных о почвенных микробах, с помощью алгоритмов машинного обучения поможет выработать стратегию и комплексные меры по повышению здоровья почв. Однако пока таких технологий в настоящее время нет. Для создания надежных и универсально применимых индексов здоровья почвы необходимы совместные усилия экологов, биологов и IT-специалистов.

### **ИИ и мониторинг**

В настоящее время растет осведомленность о факторах окружающей среды, влияющих на здоровье человека. Стратегия под названием «Единое здоровье» (One Health) рассматривает окружающую среду, в которой живет человек, и ее взаимодействие с соседними экосистемами как платформу для улучшения качества жизни и природы. Эти взаимосвязи включают обеспечение пресной водой, чистый воздух, продовольственную безопасность и медицину [42]. Так, например, одной из фундаментальных проблем представляет собой вымирание наземных и подземных видов, поскольку почвы являются потенциальным источником продуцентов новых антибиотиков для медицинского применения для человека [43]. Следовательно, восстановление и поддержание здоровых почв и их биоразнообразия имеет огромное значение для сохранения здоровья людей.

ИИ может помочь в выявлении ключевых процессов существования экосистем и способов их регулирования через технологии землепользования в сельскохозяйственных системах.

«Единое здоровье» — это подход, предполагающий «совместные усилия представителей различных дисциплин, работающих на местном, национальном и глобальном уровнях, для достижения оптимального здоровья людей, животных и окружающей среды», как это определено Целевой группой по инициативе «Единое здоровье» (ОНИТФ). Он был разработан в ответ на свидетельства распространения зоонозных заболеваний между видами и растущее осознание «взаимозависимости здоровья людей и животных и экологических изменений».

Ряд организаций по всему миру поддерживают цели «Единого здравоохранения», в том числе Комиссия «Единое здравоохранение» (ОНС), Инициатива «Единое здравоохранение», Платформа «Единое здравоохранение», Управление «Единое здравоохранение» при CDC и Четырехсторонние организации. Четырехсторонние организации:

- Продовольственная и сельскохозяйственная организация Объединенных Наций (ФАО),
- Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ),
- Всемирная организация по охране здоровья животных (ВООЗЖ, ранее известная как МЭБ),
- и Программа ООН по окружающей среде (ЮНЕП)), и другие.

Другим важнейшим аспектом является потеря ключевых таксонов, и здесь задача ИИ в том, чтобы выявить сложные взаимодействия подземных (почвенных) пищевых цепочек и сетей, которые нарушаются при сокращении численности некоторых организмов. Резервуар генетических ресурсов для сельскохозяйственных культур, домашнего скота и почвенной биоты обеспечивается исключительно биоразнообразием экосистем, что является важным фактором для здоровья, благодаря доступности микроэлементов. В

мире 60% населения использует традиционную медицину, сырьем для которой служат растения из диких популяций и окультуренных видов. Многие сообщества критически зависят от натуральных продуктов, собранных в экосистемах, не только для лечения, но и для повседневного жизнеобеспечения.

### **Этические аспекты применения искусственного интеллекта в области биотехнологий**

Нет никаких сомнений в том, что этика, справедливость и доверие являются крайне важными составляющими при разработках ИИ для биотехнологического применения [44, 45, 46]. Основными вопросами, по которым сегодня идет дискуссия, являются следующие:

- Как мы можем гарантировать, что системы искусственного интеллекта разрабатываются и используются на основе принципов этической и социальной ответственности, а также с соблюдением фундаментальных прав и ценностей человека?
- Как мы можем гарантировать, что системы искусственного интеллекта будут справедливыми и не будут увековечивать и усиливать существующие предубеждения или дискриминацию?
- Как мы можем гарантировать, что системы искусственного интеллекта будут прозрачными и объяснимыми, чтобы пользователи и заинтересованные стороны могли доверять им?
- Как мы можем гарантировать, что системы искусственного интеллекта безопасны и не подвергают отдельных лиц или организации риску или вреду?
- Как мы можем обеспечить, чтобы разработка и внедрение систем искусственного интеллекта были инклюзивными и включали в себя различные точки зрения и мнения?

- Как мы можем решить этические и социальные последствия появления новых технологий, таких как общий искусственный интеллект, машинное обучение и автономные системы?
- Как мы можем разработать и внедрить эффективную политику, правила и системы управления для ИИ?
- Как мы можем способствовать диалогу и сотрудничеству между исследователями, политиками, промышленностью, гражданским обществом и другими заинтересованными сторонами для решения этических и социальных последствий ИИ?
- Как мы можем обучать и повышать осведомленность об этике, справедливости и доверии в области ИИ среди широкой общественности, а также среди тех, кто проектирует, разрабатывает и использует системы ИИ?

Ответы на эти вопросы еще предстоит сформулировать, однако без понимания методов искусственного интеллекта решить поставленные задачи невозможно. Помимо необходимой устойчивости, объяснимость является важным фактором, гарантирующим надежность решений, принимаемых ИИ [47, 48]. Объяснимость позволяет исследователям, политикам и другим заинтересованным сторонам понять, как система ИИ принимает решения, и соответствуют ли эти решения их ценностям и задачам. В области биотехнологий системы искусственного интеллекта используют для анализа больших объемов данных и выработки прогнозов или рекомендаций, которые могут иметь серьезные последствия для общественного здравоохранения и экологической безопасности. Если система ИИ не может дать четкое объяснение того, как она пришла к конкретному решению или прогнозу, человек не может быть уверен в точности и устойчивости полученных результатов.

Объяснимость не только помогает укрепить доверие, но и выявить и устранить потенциальные предубеждения или ошибки в алгоритмах искусственного интеллекта. Если система принимает решения, которые не



соответствуют предполагаемой цели или наносят вред определенным группам людей, важно понимать, как и почему принимаются эти решения, чтобы в дальнейшем их скорректировать.

Существует несколько способов, с помощью которых разработчик ИИ может гарантировать заинтересованным сторонам, что они смогут понять, как данная модель ИИ работает в целом и в конкретной ситуации с конкретными данными. Основные из них:

- предоставление четкой документации и объяснений архитектуры модели ИИ и процесса обучения. Это поможет заинтересованным сторонам понять, как была разработана модель и как она должна функционировать;
- использование интерпретируемых моделей [49] или, если это невозможно, использование методов интерпретируемости [50];
- визуализация результатов и процесса принятия решений: графическая презентация результатов и процессов [51, 52];
- диалог с заинтересованными сторонами и ответы на вопросы. Это может включать предоставление дополнительных объяснений или проведение демонстрации функционирования модели.

### **Будущее ИИ в сфере биотехнологий**

Есть несколько актуальных тем в области искусственного интеллекта и биотехнологий, которые в настоящее время активно исследуются и, вероятно, останутся в центре внимания в будущем. Речь идет об анализе больших массивов данных для прогнозирования сложных биологических систем. Это включает в себя использование методов искусственного интеллекта для анализа генома, протеомных данных и многих других типов биологической информации. Также крайне актуальна разработка лекарственных препаратов при помощи технологий ИИ, когда возможно выявить закономерности и взаимосвязи, которые могут быть неочевидны для человека. Доступен анализ геномных данных человека и других типов данных о здоровье для разработки персонализированных планов лечения,

адаптированных к конкретным потребностям индивида. Речь идет в том числе об использовании алгоритмов машинного обучения для прогнозирования реакции человека на конкретный препарат и выявления потенциальных побочных реакций, а также оптимизация диагностики заболеваний и прогнозирования их течения.

### **Страны-лидеры по развитию и внедрению технологий искусственного интеллекта**

Исследование проведено по заказу американской компании ZeroBounce выявило страны, лидирующие в области разработки технологий искусственного интеллекта (ИИ). Проанализирован объем инвестиций за последние десять лет, а также число стартапов, связанных с ИИ, и показатели занятости в отрасли (доля занятости, наличие вакансий). Данные были получены из отчетов Statista, GlobalData и Visual Capitalist. Рейтинг стран сформирован, исходя из объема инвестирования за последние десять лет. (Табл.1)

#### *США, Китай и Великобритания*

**Лидером** в области ИИ являются **США** – это 335,2 млрд долларов, вложенных в развитие ИИ, 5500 стартапов и 71 000 вакансий ежегодно. **Второе** место занимает **Китай**, инвестировавший 103,5 млрд долларов, что в три раза меньше, чем в США. В Китае меньше стартапов и вакансий, однако число IT-специалистов больше и составляет почти 1% (0,64%) от всех работающих китайцев. На **третьем** месте **Великобритания**, которая потратила 22,2 млрд долларов США, и доля эта растет. Так, только за 2023 год было вложено 3,78 млрд долларов США, что составляет одну шестую часть от всего объема финансирования за прошедшие десять лет. По сравнению с Китаем в Великобритании было запущено в два раза меньше стартапов (727).

#### *Израиль, Канада и Германия*

**Израиль** занял **четвертое** место и потратил 12,83 млрд долларов на развитие технологий ИИ. В Израиле было основано 442 стартапа, связанных с искусственным интеллектом, однако в стране самый высокий в мире показатель занятости в области ИИ – 1,13% работающего населения.

**Канада** следует за Израилем, она оказалась на пятом месте и инвестировала 1,61 млрд долларов в различные проекты только в 2023 году. Вакансии, связанные с ИИ, в Канаде составляют 1,05% от всех предложений, что является третьим по величине показателем в рейтинге.

**Германия** занимает **шестое** место, инвестировав 10,35 млрд долларов в технологии ИИ. В прошлом году немцы оказались более активными, чем Канада или Израиль, и потратили 1,91 млрд долларов. В Германии меньше стартапов, чем в Канаде, однако вакансии растут – только за этот год было открыто более 4600 позиций.

*Индия, Франция, Южная Корея и Сингапур*

**Индия** занимает **седьмое** место, ее инвестиции в ИИ за последнее десятилетие составили 9,85 млрд долларов. В стране создано больше рабочих мест в отрасли ИИ, чем в Канаде, и запущено больше стартапов (338), чем в Германии.

На **восьмом** месте **Франция**, которая потратила 8,31 млрд долларов. И хотя она опережает Индию и по объемам инвестиций за 2023 год и по числу стартапов, но по общему объему финансирования все еще отстает более чем на миллиард долларов. Вместе с тем, доля занятости в отрасли ИИ во Франции составляет 1,07%, опережая практически все страны в рейтинге.

**Южная Корея** занимает **девятое** место, инвесторы потратили 7,25 млрд долларов на развитие технологий ИИ, однако спрос на специалистов пока не высокий.

**Сингапур** замыкает рейтинг, занимая **десятое** место, его объем вложений составляет \$6,25 млрд., что в 50 раз меньше, чем в США. Однако, как и во

Франции, в Сингапуре высокий процент занятости в отрасли ИИ – 1,07% специалистов, но при этом всего 193 стартапа.

Не удивительно, что США лидируют в мировом рейтинге ИИ. Силиконовая долина является *alma mater* для большого числа крупнейших технологических гигантов. Американские компании и разработчики идут в авангарде революционных решений, связанных с искусственным интеллектом. И самым говорящим показателем является количество специалистов по ИИ и рабочих мест – в США это 71 000 вакансий, при том, что на долю всех вместе взятых стран приходится почти в два раза меньше (56 332).

Искусственный интеллект способен использовать свойства интеллекта человека, такие как способность к восприятию, обучению, креативности и решению сложных задач. IT-компании в США идут по пути внедрения ИИ практически во все промышленные и бизнес-процессы. Технологии ИИ продолжают фундаментально менять то, как человек работает, отдыхает и проводит свободное время в эпоху господства «цифры», поскольку потенциал технологий ИИ почти безграничен.

Анализ развития отрасли ИИ подтверждает рост потребности в специалистах по работе с ИИ. Многие эксперты уже во весь голос говорят о срочной необходимости повышения квалификации людей, занятых в области цифровых технологий. Частные компании, государственные структуры, университеты по всему миру работают над тем, чтобы удовлетворить этот спрос. Необходимо осознание того, что навыки работы с информацией – интерпретация, анализ, получение и обработка данных – крайне необходимы сегодня. И по мере того, как цифровые технологии и ИИ все больше и больше проникают в бизнес и общество, количество вакансий в этой сфере будет неуклонно расти во всем мире.

**Таблица 1.** Страны-лидеры по развитию и внедрению технологий искусственного интеллекта.

Страна	Объем инвестиций, млрд долл. США		Стартапы 2013-2024	Доля занятости в области ИИ, %	Мировой индекс ИИ	Вакансии в области ИИ, %	Вакансии в области ИИ (2024)	Совокупный балл
	2023	2013-2023						
США	67,22	335,24	5509	0,34	100	1,62	71000	17,25
Китай	7,76	103,65	1446	0,64	61,5	0,61	21508	14,07
Великобритания	3,78	22,25	727	0,35	41,8	0,85	5218	10,81
Сингапур	1,14	6,25	193	0,88	49,7	1,07	1584	12,73
Канада	1,61	10,56	397	0,45	40,3	1,05	3802	11,06
Южная Корея	1,39	7,25	189	0,79	40,3	0,47	426	10,84
Израиль	1,52	12,83	442	1,13	40,0	0,59	857	12,45
Германия	1,91	10,35	319	0,69	39,2	0,81	4673	11,39
Япония	0,68	4,81	333	0,81	33,9	0,21	1621	10,21
Австралия	0,37	3,40	147	0,31	30,9	1,00	1289	9,74
Индия	1,39	9,85	338	0,42	31,4	0,15	12047	9,13
Франция	1,69	8,31	391	0,49	32,8	1,07	2694	10,87
Швеция	1,89	2,88	94	0,56	30,3	1,31	613	11,2

Источник: [53]. Исследование ZeroBounce: «Страны-лидеры в области искусственного интеллекта»

### Заключение

Искусственный интеллект имеет очень широкое применение, сегодня его используют практически везде, где имеет место цифровая обработка информации и любых типов данных. Абсолютным лидером в этой области являются США. В сфере биотехнологий уже сегодня создаются целые экосистемы ИИ, которые способны обновляться. Таким образом, оцифровка и цифровая трансформация сельского хозяйства, других биотехнологических областей является первым и необходимым этапом перед полноценным внедрением ИИ. Именно доступность больших качественных объемов данных и быстрый рост вычислительных мощностей определяли и будут определять успех конечного результата. Очевидно, что в будущем влияние и значимость ИИ будет неуклонно расти, поскольку в повседневную жизнь уже прочно вошли и стали привычными такие продукты ИИ, как алгоритмы обработки речи Alexa и Siri, переводчик DeepL и ChatGPT – новейшая система от OpenAI с высокой производительностью.

### Список источников

1. David L, Thakkar A, Mercado R, Engkvist O. Molecular representations in AI-driven drug discovery: a review and practical guide. *J Chemin-* 2020;12(1):1–22. <https://doi.org/10.1186/s13321-020-00460-5>.
2. Diaw MD, Papelier S, Durand-Salmon A, Felblinger J, Oster J. AI-assisted QT measurements for highly automated drug safety studies. *IEEE Trans Biomed Eng* 2022. <https://doi.org/10.1109/TBME.2022.3221339>.
3. van der Lee M, Swen JJ. Artificial intelligence in pharmacology research and practice. *ClinTranslSci* 2023;16(1):31–6. <https://doi.org/10.1111/cts.13431>.
4. Roche-Lima A, Roman-Santiago A, Feliu-Maldonado R, et al. Machine learning algorithm for predicting warfarin dose in caribbeanhispanics using pharmacogenetic data. *Front Pharmacol* 2020;10:1550. <https://doi.org/10.3389/fphar.2019.01550>.
5. Lin E, Lin C-H, Lane H-Y. Precision psychiatry applications with pharmacogenomics: artificial intelligence and machine learning approaches. *Int J MolSci* 2020;21(3):969. <https://doi.org/10.3390/ijms21030969>.
6. Caudai C, Galizia A, Geraci F, et al. AI applications in functional genomics. *ComputStructBiotechnol J* 2021;19:5762–90. <https://doi.org/10.1016/j.csbj.2021.10.009>.
7. Lin J, Ngiam KY. How data science and AI-based technologies impact genomics. *Singap Med J* 2023;64(1):59–66. <https://doi.org/10.4103/singaporemedj.SMJ-2021-438>.
8. Xiao Q, Zhang F, Xu L, et al. High-throughput proteomics and AI for cancer biomarker discovery. *Adv Drug Deliv Rev* 2021;176:113844. <https://doi.org/10.1016/j.addr.2021.113844>.
9. Mund A, Coscia F, Hollandi R, et al. AI-driven Deep Visual Proteomics defines cell identity and heterogeneity. *BioRxiv* 2021. <https://doi.org/10.1101/2021.01.25.427969>.

10. Petrick LM, Shomron N. AI/ML-driven advances in untargeted metabolomics and exposomics for biomedical applications. *Cell Rep Phys Sci* 2022;3:7. <https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2022.100978>.
11. Oliveira AL. Biotechnology, big data and artificial intelligence. *Biotechnol J* 2019; 14(8):1800613. <https://doi.org/10.1002/biot.201800613>.
12. Goh WWB, Sze CC. AI paradigms for teaching biotechnology. *Trends Biotechnol* 2019;37(1):1–5. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2018.09.009>.
13. Kim H. AI, big data, and robots for the evolution of biotechnology. *Genom Inform* 2019;17(4):e44. <https://doi.org/10.5808/GI.2019.17.4.e44>.
14. Turing AM. Computing machinery and intelligence. *Mind* 1950;59(236):433–60. <https://doi.org/10.1093/mind/LIX.236.433>.
15. Holzinger A, Kickmeier-Rust M, Müller H. Kandinsky patterns as IQ-test for machine learning. *Lecture Notes in Computer Science LNCS 11713*. Cham: Springer/Nature; 2019. p. 1–14. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-29726-8-1>.
16. McCarthy J, Minsky ML, Rochester N, Shannon CE. A proposal for the dartmouth summer research project on artificial intelligence, August 31, 1955. *AI Mag* 2006; 27(4):12–4. <https://doi.org/10.1609/aimag.v27i4.1904>.
17. Bratko I, Muggleton S. Applications of inductive logic programming. *Commun ACM* 1995;38(11):65–70. <https://doi.org/10.1145/219717.219771>.
18. Muggleton SH, Schmid U, Zeller C, Tamaddoni-Nezhad A, Besold T. Ultra-strong machine learning: comprehensibility of programs learned with ILP. *Mach Learn* 2018;107:1119–40. <https://doi.org/10.1007/s10994-018-5707-3>.
19. Russell S.J., Norvig P. *Artificial intelligence: a modern approach* (4th edition). Upper Saddle River: Prentice Hall; 2020.
20. Hendler J. Avoiding another AI winter. *IEEE IntellSyst* 2008;23(2):2–4. <https://doi.org/10.1109/MIS.2008.20>.
21. King MR. The future of AI in medicine: a perspective from a chatbot. *Ann Biomed Eng* 2022:1–5. <https://doi.org/10.1007/s10439-022-03121-w>.

22. Müller H, Holzinger A, Plass M, Brcic L, Stumptner C, Zatloukal K. Explainability and causability for artificial intelligence-supported medical image analysis in the context of the european in vitro diagnostic regulation. *N Biotechnol* 2022;70: 67–72. <https://doi.org/10.1016/j.nbt.2022.05.002>.
23. Holzinger A, Saranti A, Angerschmid A, et al. Digital transformation in smart farm and forest operations needs human-centered ai: challenges and future directions. *Sensors* 2022;22(8):3043. <https://doi.org/10.3390/s22083043>.
24. Naqvi RZ, Siddiqui HA, Mahmood MA, et al. Smart breeding approaches in post- genomics era for developing climate-resilient food crops. *Front Plant Sci* 2022;13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.972164>.
25. Barnabas B, J'ager K, Feh" er A. The effect of drought and heat stress on reproductive ' processes in cereals. *Plant, Cell Environ* 2008;31(1):11–38. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2007.01727.x>.
26. Barnes ML, Breshears DD, Law DJ, et al. Beyond greenness: detecting temporal changes in photosynthetic capacity with hyperspectral reflectance data. *PLoS One* 2017;12(12):e0189539. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0189539>.
27. Holzinger A, Weippl E, Tjoa AM, Kieseberg P. Digital transformation for sustainable development goals (SDGs) - a security, safety and privacy perspective on AI. *Springer Lecture Notes in Computer Science, LNCS 12844*. Cham: Springer; 2021. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-84060-0\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-030-84060-0_1).
28. Fiorani F, Schurr U. Future scenarios for plant phenotyping. *Annu Rev Plant Biol* 2013;64:267–91. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-050312-120137>.
29. Tester M, Langridge P. Breeding technologies to increase crop production in a changing world. *Science* 2010;327(5967):818–22. <https://doi.org/10.1126/science.1183700>.
30. Holzinger A, Haibe-Kains B, Jurisica I. Why imaging data alone is not enough: AI- based integration of imaging, omics, and clinical data. *Eur J Nucl Med Mol Imaging* 2019;46(13):2722–30. <https://doi.org/10.1007/s00259-019-04382-9>.



31. Roupael Y, Spíchal L, Panzarova K, Casa R, Colla G. High-throughput plant phenotyping for developing novel biostimulants: from lab to field or from field to lab. *Front Plant Sci* 2018;9:1197. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01197>.
32. Rico-Chavez AK, Franco JA, Fernandez-Jaramillo AA, Contreras-Medina LM, Guevara-Gonzalez RG, Hernandez-Escobedo Q. Machine learning for plant stress modeling: a perspective towards hormesis management. *Plants* 2022;11(7):970. <https://doi.org/10.3390/plants11070970>.
33. Jung J, Maeda M, Chang A, Bhandari M, Ashapure A, Landivar-Bowles J. The potential of remote sensing and artificial intelligence as tools to improve the resilience of agriculture production systems. *Curr Opin Biotechnol* 2021;70:15–22. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2020.09.003>.
34. Zhu Y, Cao Z, Lu H, Li Y, Xiao Y. In-field automatic observation of wheat heading stage using computer vision. *BiosystEng* 2016;143:28–41. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2015.12.015>.
35. Deng L, Du H, Han Z. A carrot sorting system using machine vision technique. *Appl Eng Agric* 2017;33(2):149–56. <https://doi.org/10.13031/aea.11549>.
36. Irají MS. Comparison between soft computing methods for tomato quality grading using machine vision. *J Food Meas Charact* 2019;13(1):1–15. <https://doi.org/10.1007/s11694-018-9913-2>.
37. Ribaut J, De Vicente M, Delannay X. Molecular breeding in developing countries: challenges and perspectives. *Curr Opin Plant Biol* 2010;13(2):213–8. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2009.12.011>.
38. Hesami M, Jones AMP. Application of artificial intelligence models and optimization algorithms in plant cell and tissue culture. *Appl Microbiol Biotechnol* 2020;104:9449–85. <https://doi.org/10.1007/s00253-020-10888-2>.
39. Lal R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma* 2004;123 (1–2):1–22. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.01.032>.

40. Wilhelm RC, van Es HM, Buckley DH. Predicting measures of soil health using the microbiome and supervised machine learning. *Soil BiolBiochem* 2022;164: 108472. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2021.108472>.
41. de Andrade VHGX, Redmile-Gordon M, Barbosa BHG, Andreote FD, Roesch LFW, Pylro VS. Artificially intelligent soil quality and health indices for ‘next generation’ food production systems. *Trends Food SciTechnol* 2021;107:195–200. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.10.018>.
42. Marselle MR, Hartig T, Cox DT, et al. Pathways linking biodiversity to human health: a conceptual framework. *Environ Int* 2021;150:106420. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106420>.
43. Blum WE, Zechmeister-Boltenstern S, Keiblinger KM. Does soil contribute to the human gut microbiome? *Microorganisms* 2019;7(9):287. <https://doi.org/10.3390/microorganisms7090287>.
44. Mueller H, Mayrhofer MT, Veen E-BV, Holzinger A. The ten commandments of ethical medical AI. *IEEE COMPUTER* 2021;54(7):119–23. <https://doi.org/10.1109/MC.2021.3074263>.
45. Angerschmid A, Zhou J, Theuermann K, Chen F, Holzinger A. Fairness and explanation in AI-informed decision making. *Mach Learn KnowlExtr* 2022;4(2): 556–79. <https://doi.org/10.3390/make4020026>.
46. Holzinger K, Mak K, Kieseberg P, Holzinger A. Can we trust machine learning results? *Artificialintelligenceinsafety-criticaldecisionsupport*. *ERCIM N* 2018; 112(1):42–3.
47. Holzinger A. The next frontier: AI we can really trust. In: Kamp M, editor. *Proceedings of the ECML PKDD 2021, CCIS 1524*. Cham: Springer Nature; 2021. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-93736-2\\_33](https://doi.org/10.1007/978-3-030-93736-2_33).
48. Holzinger A, Dehmer M, Emmert-Streib F, et al. Information fusion as an integrative cross-cutting enabler to achieve robust, explainable, and trustworthy medical artificial intelligence. *Inf Fusion* 2022;79(3):263–78. <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2021.10.007>.

49. Rudin C. Stop explaining black box machine learning models for high stakes decisions and use interpretable models instead. *Nat Mach Intell* 2019;1(5):206–15. <https://doi.org/10.1038/s42256-019-0048-x>.
50. Holzinger A, Saranti A, Molnar C, Biecek P, Samek W. Explainable AI methods - a brief overview. *XXAI - Lecture Notes in Artificial Intelligence LNAI 13200*. Cham: Springer; 2022. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-04083-2\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-031-04083-2_2).
51. Müller H, Reihls R, Zatloukal K, Holzinger A. Analysis of biomedical data with multilevel glyphs. *BMC Bioinforma* 2014;15(Suppl 6). <https://doi.org/10.1186/1471-2105-15-S6-S5>.
52. Hund M, Boehm D, Sturm W, et al. Visual analytics for concept exploration in subspaces of patient groups: making sense of complex datasets with the doctor-in-the-loop. *Brain Inform* 2016;3(4):233–47. <https://doi.org/10.1007/s40708-016-0043-5>.
53. Roy Edwards. A new ZeroBounce study reveals countries advancing AI the fastest. <https://www.enterprisetimes.co.uk/2024/08/06/a-new-zerobounce-study-reveals-countries-advancing-ai-the-fastest/>

© Жиганова Л.П., 2024. *Московский экономический журнал*, 2024, № 10.