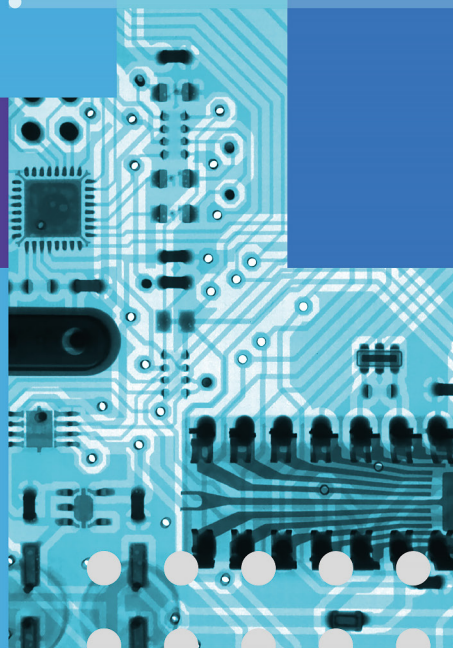


СЕРИЯ  
«ИСТОЧНИКИ НОВЫХ  
ИНДУСТРИЙ»

ВЫПУСК 3

# Искусственный интеллект в промышленности



САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

2022

## **ИСТОЧНИКИ НОВЫХ ИНДУСТРИЙ. ВЫПУСК 3. ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

Экспертно-аналитический доклад

**Авторы:** И. Е. Васеев, Е. А. Годунова, Д. В. Санатов, М. А. Семенова, М. А. Харитонов

**Редакторы:** В. Н. Княгинин, М. С. Липецкая, Е. М. Холоднова

**Научные редакторы:** А. В. Бухановский, научный руководитель Исследовательского центра «Сильный ИИ в промышленности» Университета ИТМО, профессор, д.т.н.; Л. В. Уткин, директор Института компьютерных наук и технологий СПбПУ Петра Великого, профессор, д.т.н.

**Консультации (в формате интервью):** М. В. Болсуновская, К. В. Воронцов, А. Н. Горбань, В. В. Климов, К. В. Кринкин, А. В. Самсонович, П. О. Скобелев, А. Л. Тулупьев, А. А. Фильченков, А. А. Шпильман, С. А. Шумский

Настоящий доклад подготовлен Центром стратегических разработок «Северо-Запад» совместно с Фондом поддержки инноваций и молодежных инициатив Санкт-Петербурга и Ассоциацией «Искусственный интеллект в промышленности» при поддержке Правительства Санкт-Петербурга.

Основой послужил проект «Форсайт „Фронтиры в новых науках“», целью которого стало определение долгосрочных трендов и путей развития новых индустриальных и технологических рынков, выявление наиболее перспективных направлений исследований и разработок в так называемых «фронтирных» областях НИОКР — передовой химии, синтетической биологии, искусственном интеллекте и экологически чистых промышленных технологиях.

Методологическая база проекта строится на анализе результатов форсайт-сессии с участием ведущих специалистов и молодых ученых, обработке научных данных, интервью с исследователями, оценке стратегий крупных промышленных концернов.

Доклад состоит из четырех разделов, в которых рассматриваются:

- риски развития отрасли искусственного интеллекта в нынешних условиях;
- влияние ИИ на современный технологический уклад и способы производства;
- необходимые меры для запуска программ реинжиниринга аппаратного и программного обеспечения ИИ;
- позиция Санкт-Петербурга как центра экспертизы по искусственному интеллекту.

Описаны основные факторы развития передовых технологий искусственного интеллекта:

- 1) Одним из важнейших драйверов роста рынка ИИ является промышленность.
- 2) Главные фронтирные задачи для науки ИИ сконцентрированы в области вычислений и работы с данными.
- 3) Развитие технологий искусственного интеллекта в России зависит от наличия собственной аппаратной и программной базы.

Результаты проекта легли в основу деятельности Ассоциации «Искусственный интеллект в промышленности».

Серия «Источники новых индустрий»

Дизайн: М. И. Петрова по заказу Фонда поддержки инноваций и молодежных инициатив Санкт-Петербурга

ISBN 978-5-9909736-4-0

Санкт-Петербург, 2022

## SOURCES OF NEW INDUSTRIES. ISSUE 3. ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN INDUSTRY

Expert report

**Authors:** I. E. Vaseev, E. A. Godunova, D. V. Sanatov, M. A. Semenova, M. A. Kharitonov

**Editors:** V. N. Knyagin, M. S. Lipetskaya, E. M. Kholodnova

**Scientific editors:** A. V. Bukhanovskii, Dr. Sc., Prof, Scientific Director of the Research Center "Strong AI in Industry" at ITMO University; L. V. Utkin, Dr. Sc., Prof, Director of the Institute of Computer Science and Technology at SPbPU

**Interviewees:** M. V. Bolsunovskaya, K. V. Vorontsov, A. N. Gorban, V. V. Klimov, K. V. Krinkin, A. V. Samsonovich, P. O. Skobelev, A. L. Tulupyev, A. A. Filchenkov, A. A. Shpilman, S. A. Shumsky

This report was prepared jointly by the Center for Strategic Research "North-West" and the Innovations and Youth Initiatives Support Fund of St. Petersburg and the Association "Artificial Intelligence in Industry" with the support of the Government of St. Petersburg.

The basis was the Foresight project "Frontiers in New Sciences". The aim of the project was to identify longterm trends and prospects for the development of new industrial and technological markets; to identify on this basis the most promising areas of research and development in the so-called "frontier" areas of R&D — advanced chemistry, synthetic biology, artificial intelligence and environmentally friendly industrial technologies.

The methodological basis of the project is based on the analysis of the results of a foresight session with the participation of leading and young scientists, the processing of scientific data, a series of interviews with leading researchers, the evaluation of strategies of large industrial concerns.

The report consists of four sections, which include:

- risks of AI industry development in the current environment;
- the impact of artificial intelligence technologies on the current technological paradigm and modes of production;
- necessary measures to launch programs for the reengineering of AI hardware and software;
- St. Petersburg's role as a center of expertise in artificial intelligence.

The report describes the main factors in the development of advanced AI technologies:

- 1) one of the most important growth drivers of the artificial intelligence market is manufacturing;
- 2) the main frontier tasks for AI science lie in the area of computing and data handling;
- 3) development of AI technologies in Russia depends on the availability of its own hardware and software.

The results of the project formed the basis of the activities of the Association "Artificial Intelligence in Industry".

The series "Sources of new industries"

Design: M. I. Petrova on demand of the Innovations and Youth Initiatives Support Fund of St. Petersburg

Авторы доклада выражают особую благодарность Министерству науки и высшего образования Российской Федерации за поддержку проекта форсайта «Фронтиры в новых науках».

# Оглавление

6	Список рисунков
7	Введение
9	<b>1. От шока — к новой открытости</b>
10	<b>1.1. Новые риски рынка ИИ</b>
13	<b>1.2. Возможна ли новая «зима ИИ»?</b>
16	<b>1.3. Промышленность — важнейший драйвер роста рынка</b>
19	<b>2. Долгосрочные перспективы ИИ</b>
20	<b>2.1. Будущее вычислений в ИИ</b>
24	<b>2.2. Вызовы развития аппаратного обеспечения для ИИ</b>
26	<b>2.3. Как ИИ изменит промышленность</b>
31	<b>3. России необходим реинжиниринг. Реинжинирингу — искусственный интеллект</b>
36	<b>4. Лидерские амбиции Санкт-Петербурга на рынке ИИ</b>
41	<b>Заключение</b>
43	Библиография

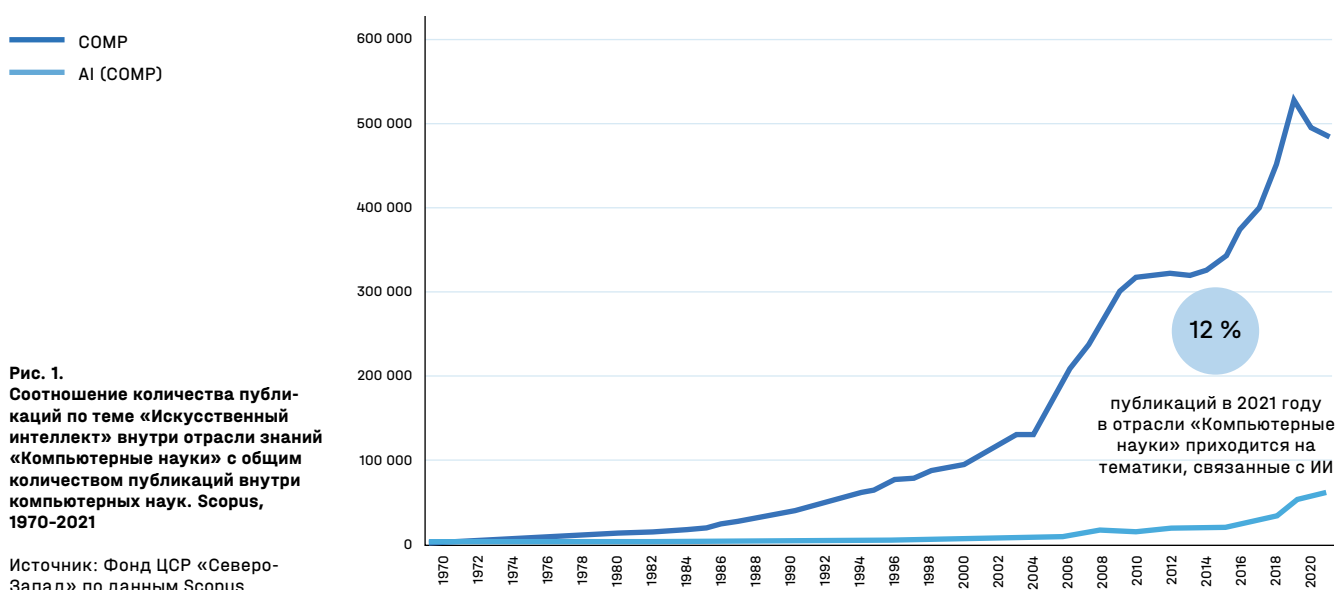
## Список рисунков

- Рис. 1. Соотношение количества публикаций по теме «Искусственный интеллект» внутри отрасли знаний «Компьютерные науки» с общим количеством публикаций внутри компьютерных наук. Scopus, 1970–2021
- Рис. 2. Объем импорта полупроводниковой продукции в Россию, который окажется под действием экономических ограничений
- Рис. 3. Соотношение количества внутренних и международных публикаций по теме ИИ в Китае, Scopus
- Рис. 4. Количество параметров современных моделей ИИ, млрд параметров
- Рис. 5. Объемы рынков ИИ в секторах экономики, 2021–2027, млрд долларов
- Рис. 6. Типовые направления применения ИИ в нефтегазовой индустрии
- Рис. 7. Типовые направления применения ИИ в металлургической промышленности
- Рис. 8. Количество публикаций в Scopus по тематикам фронтиров в технологиях вычислений, шт.
- Рис. 9. Количество публикаций в Scopus по тематикам фронтиров в работе с данными, шт.
- Рис. 10. Влияние ИИ на различные отрасли промышленности
- Рис. 11. Архитектура кастомизированного производства на основе ИИ
- Рис. 12. Актуальность технологий ИИ для разных областей промышленности
- Рис. 13. Российские университеты: средневзвешенное цитирование по тематике ИИ в 2016–2021
- Рис. 14. Топ-10 университетов России по тематике ИИ в разделе «Математические науки» с 2015 по 2022
- Рис. 15. Ранжирование университетов среди научных организаций России в разделе «Математические науки», 2021
- Рис. 16. Ранжирование университетов (топ-10) среди научных организаций России в разделе «Компьютерные науки», 2021
- Рис. 17. Количество публикаций по теме ИИ среди исследовательских организаций Санкт-Петербурга за 2015–2022 (Scopus)
- Рис. 18. Потенциал Санкт-Петербурга на российском рынке ИИ

# Введение

На момент подготовки доклада Российская Федерация оказалась под давлением беспрецедентного количества международных экономических санкций. В первую очередь они затронули высокотехнологичные отрасли экономики и цепочки поставок. В этих условиях злободневным становится вопрос о дальнейшей эволюции в нашей стране технологий искусственного интеллекта (ИИ). Искусственный интеллект в представлении авторов доклада — прорывная технология экономики, способная сыграть важнейшую роль в развитии российской промышленности. В ближней перспективе ИИ может стать ключевым инструментом решения задач реинжиниринга и импортозамещения, обеспечить опережающее развитие отдельных направлений отечественной промышленности.

За последние 50 лет сформировался новый технологический уклад современного общества. Значительное увеличение числа научных работ в области компьютерных наук (и, в частности, искусственного интеллекта) привело к формированию необходимых предпосылок для появления ряда закрывающих технологий, которые способны изменить глобальную расстановку сил и завершить переход от индустриального уклада к цифровому.



Новая цифровая среда существенно увеличила вычислительные способности и объем хранимых знаний, сделавшись фундаментом для экспансии рынка технологий ИИ в различные отрасли экономики — от решения инженерных задач в промышленности до самого широкого коммерческого применения.

ИИ стал основой промышленно-технологической политики развитых стран, открыв новые возможности для реализации полномасштабной концепции умной фабрики и даже ИИ-центричного производства. При этом некоторые государства опираются на него как на критическую технологию своего развития, вследствие чего ограничивается ее распространение за рубежом. Так, в США в 2021 году был издан билль № 1260<sup>1</sup>, в котором определены ограничения на передачу знаний и технологий, связанных с ИИ, для ряда стран (включая Россию). Сейчас эти вызовы усугубляются, что обостряет чувствительность отечественной экономики к глобальным трендам развития. Российская индустрия ИИ столкнулась с угрозой изоляции наших исследователей от мировой науки, разработчики начинают ощущать дефицит аппаратного обеспечения; предпринимаются попытки полной блокировки деятельности отрасли (в т. ч. блокируются аккаунты GitHub)<sup>2</sup>.

1 S.1260 — United States Innovation and Competition Act of 2021 // [Congress.gov](https://www.congress.gov/bills/117/congress/senate-bills/1260) [сайт], 2021. — URL: [congress.gov/bill/117th-congress/senate-bill/1260](https://www.congress.gov/bills/117th-congress/senate-bill/1260).

2 GitHub начал блокировать аккаунты российских компаний и разработчиков // БФМ. РУ [сайт], 2022. — URL: [bfm.ru/news/497819](https://bfm.ru/news/497819).

В итоге начинает формироваться запрос на переход от состояния шока к состоянию новой открытости, что означает создание новых международных научных партнерств и стремление достичь необходимого уровня технологической автономности. Стоит обратить внимание на риск возникновения новой «зимы ИИ» в применении отдельных инструментов и сокращении доступа к аппаратному обеспечению (по аналогии с ситуацией 80-х годов XX века). Это обстоятельство может оказаться особенно значимым для Российской Федерации, на неопределенное время оказавшейся изолированной от многих технологических цепочек. Более того, «зима ИИ» может оказаться главным ограничивающим фактором для восстановления и роста отечественной экономики. Ведь именно ИИ способен стать основой современных технологий реинжиниринга — краеугольного камня новой архитектуры импортозамещающих программ.

Несмотря на то, что технологии ИИ развиваются в разных регионах страны, мы считаем, что именно Санкт-Петербург может сделаться одной из главных площадок для внедрения искусственного интеллекта в промышленность и создания стека специализированных технологий развития промышленного ИИ, ориентированного на поддержку отраслевых специалистов, вынужденных принимать решения в условиях неопределенности и неполноты данных. В городе уже сейчас существует развитая экосистема для разработки перспективных решений и систем, а также кооперации продуктивного профессионального экспертного сообщества с потребителями — различными отраслями промышленности. Экосистема включает в себя ведущие вузы и исследовательские организации города, Ассоциацию «ИИ в промышленности», компании и институты развития, активно инвестирующие в искусственный интеллект. В докладе рассматриваются механизмы развития промышленного ИИ усилиями профессионального сообщества и Правительства Санкт-Петербурга.



# ЧАСТЬ 1

ОТ ШОКА — К НОВОЙ  
ОТКРЫТОСТИ

# 1.1 НОВЫЕ РИСКИ РЫНКА ИИ

В нестабильной геополитической обстановке развитие технологий искусственного интеллекта в России оказывается под угрозой изоляции. Вследствие санкций сокращается финансирование, нарушаются цепочки поставок компонентной базы, происходит отказ от сотрудничества с российскими учеными<sup>3</sup>. Особенно болезненны санкции в отношении поставок продукции двойного назначения, например чипов и полупроводников. «Железная» составляющая для отрасли ИИ крайне важна. По оценке Всероссийской академии внешней торговли Минэкономразвития РФ, объем импорта полупроводниковой продукции, попадающего под санкции, в денежном выражении составит около 470 млн долларов — это примерно четверть всего импорта продукции данного типа.

■ Объем импорта полупроводников, который сохранится

■ Объем импорта полупроводников, попадающего под санкции



Рис. 2. Объем импорта полупроводниковой продукции в Россию, который окажется под действием экономических ограничений

Источник: ВАВТ

Наложённые ограничения затрагивают практически все стратегически значимые отрасли промышленности страны: оборонную, авиационную, судостроительную, финансовых технологий, телекоммуникационную и др. Уход с российского рынка крупнейших поставщиков программного обеспечения (EPAM, Oracle, Microsoft и SAP), как и отказ от обслуживания, повысит уязвимость промышленных компаний и увеличит количество ошибок, усложняющих их работу<sup>4</sup>.

ИИ, попадая под аналогичные ограничения, тем не менее может стать одним из основных механизмов развития российской промышленности в этих условиях. Он рассматривается как инструмент реинжиниринга технологий в реальном секторе экономики для задач восполняющего импортозамещения. Например, использование методов генеративного дизайна позволяет воспроизвести и ускорить цикл создания изделия с учетом свойств материалов, нагрузки на изделие и других параметров<sup>5</sup>. ИИ открывает возможности и для опережающего импортозамещения, создавая принципиально новые цифровые технологии в отраслях, традиционно основанных на экспериментальных подходах. По прогнозам экспертов, к 2025 году 30 % новых лекарств и материалов будет конструироваться с помощью методов генеративного ИИ<sup>6</sup>.

<sup>3</sup> Nicholson C. EU blocks new Russian research deals and payments / C. Nicholson // ResearchProfessional News [сайт], 2022. — URL: [researchprofessionalnews.com/rr-news-europe-politics-2022-3-eu-blocks-new-russia-research-deals-and-payments](https://researchprofessionalnews.com/rr-news-europe-politics-2022-3-eu-blocks-new-russia-research-deals-and-payments).

<sup>4</sup> Грибов М. Импортозамещение в IT: Цифровая трансформация на российском ПО / М. Грибов // RB.RU [сайт], 2022. — URL: [rb.ru/opinion/importozameshenie-v-it](https://rb.ru/opinion/importozameshenie-v-it).

<sup>5</sup> Айвазян Д. Будущее инженерии: что такое генеративный дизайн и как его использовать / Д. Айвазян // RB.RU [сайт], 2022. — URL: [rb.ru/opinion/generativnyj-dizajn](https://rb.ru/opinion/generativnyj-dizajn).

<sup>6</sup> Goasduff L. The 4 Trends That Prevail on the Gartner Hype Cycle for AI, 2021 / L. Goasduff // Gartner [сайт], 2021. — URL: [gartner.com/en/articles/the-4-trends-that-prevail-on-the-gartner-hype-cycle-for-ai-2021](https://gartner.com/en/articles/the-4-trends-that-prevail-on-the-gartner-hype-cycle-for-ai-2021).

Однако в условиях ограничения доступа к научно-технической информации (в частности, ухода из страны WoS и Scopus<sup>7</sup>) увлечение «собственным путем» повышает риск изоляционизма, ухудшающего качество исследований и усугубляющего технологическое отставание. Адаптация отрасли к новой реальности подразумевает выстраивание новых международных партнерств, изменение форматов сотрудничества и управления защитой интеллектуального права. В любом случае закрытость от мирового научного и технологического сообщества не является приемлемой стратегией для российской сферы ИИ.

7 Multi-Publisher Statement 31 March 2022 // Mailchimp, 2022. — URL: mailchi.mp/4851e2a74119/joint-publisher-statement.

Большое значение имеет поддержка научного сектора индустрии. Здесь можно выделить четыре главных риска.

## 1 Риски ограничения двустороннего обмена научно-технической информацией

Представляется важным сохранить сотрудничество с нейтрально настроенными площадками и высокорейтинговыми журналами. Особенность современной науки в том, что прорывные исследования и разработки возникают преимущественно в обширных мультидисциплинарных и межотраслевых суперкластерах и сетях. К рискам относятся явные и неявные ограничения доступа к международным реферативным системам и базам данных, препятствия к опубликованию статей в ведущих международных изданиях, возникающие на уровне рецензирования, мнений членов редколлегии и главных редакторов. Такие действия порождают обратную реакцию в виде отказа отечественных научных коллективов от публикаций статей в ведущих мировых изданиях, использования международных баз данных, в т. ч. WoS и Scopus, и связанную с этим опасность утраты актуальности и качества исследований. С 1996 по 2021 годы в России вышли в свет 1553 научные работы, написанные в сотрудничестве с зарубежными исследователями (19,8 % от общего числа публикации по теме ИИ).

8 Российская Федерация. Постановления. О некоторых вопросах применения требований и целевых значений показателей, связанных с публикационной активностью : Постановление № 414: [принято Правительством Российской Федерации 19 марта 2022 г.]. — URL: ips.pravo.gov.ru:8080/default.aspx?pn=0001202203210040.

Показателен пример развития китайской науки. Находясь под действием санкций, Китай не только не отказался от публикаций в международных журналах, но и увеличил объем своего присутствия в них. Отдельно стоит сказать, что Постановление Правительства РФ № 414 не ограничивает использование зарубежных баз данных и право ученых публиковаться в высокорейтинговых журналах<sup>8</sup>.

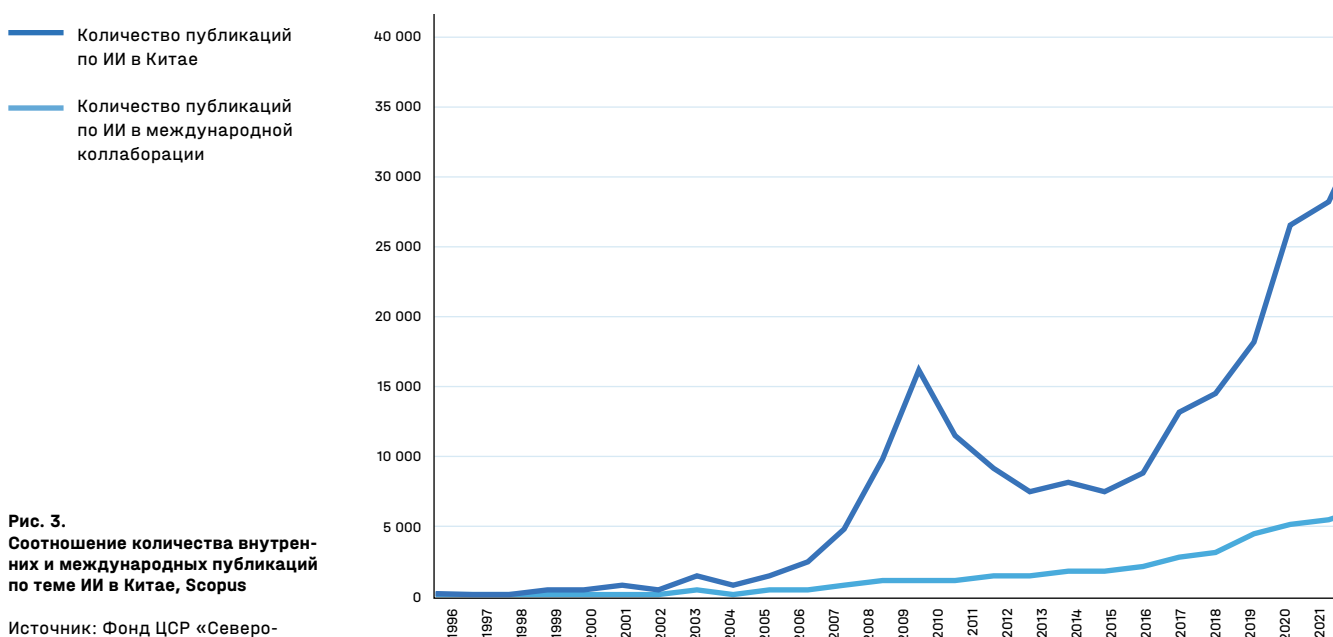


Рис. 3. Соотношение количества внутренних и международных публикаций по теме ИИ в Китае, Scopus

Источник: Фонд ЦСР «Северо-Запад» по данным Scopus

## 2 | Риск утраты качества экспертизы научных проектов

Для поддержания высокого уровня экспертизы необходимо формировать эффективную и независимую внутреннюю систему оценки исследований силами работающих в отрасли экспертов. Подобная инициатива уже была реализована Аналитическим центром при Правительстве РФ для грантового конкурса на создание исследовательских центров ИИ. Для отбора конкурсных заявок тогда сформировали Экспертный совет — он определял, у каких центров есть шансы на максимальное развитие и конкретные результаты<sup>9</sup>.

<sup>9</sup> 6 исследовательских центров по ИИ получают федеральные гранты до 1 млрд рублей // Аналитический центр при Правительстве Российской Федерации [сайт], 2021. — URL: [ac.gov.ru/news/page/6-issledovateljskih-centrov-po-ii-polucata-federalnye-granty-do-1-mlrd-rublej-27059](https://ac.gov.ru/news/page/6-issledovateljskih-centrov-po-ii-polucata-federalnye-granty-do-1-mlrd-rublej-27059).

## 3 | Риск сокращения сотрудничества в научном секторе (даже в границах РФ)

Возможно ухудшение ресурсного обеспечения исследований в сфере ИИ и утрата ориентиров исследований среди тех коллективов, которые были вовлечены в международные коллаборации, прекратившие работу. Необходимо вовлечь в сотрудничество шесть созданных в 2021 году исследовательских центров ИИ, профильные центры компетенций НТИ, а также все заинтересованные вузы и отраслевые ассоциации. Формировать коллаборации помогают: создание внутреннего репозитория исследований (в т. ч. открытого кода); развитие формата грантов и программ, ориентированных на межинституциональное сотрудничество; учреждение профильного журнала, в перспективе способного выйти на уровень высокорейтинговых изданий (Q1) в мире.

## 4 | Риск снижения результативности господдержки в области ИИ

Фронт исследовательских задач широк, а ресурсы ограничены. Было бы целесообразно сфокусироваться на задачах и сверхзадачах, имеющих большое общественное значение. Регулярная оценка результатов исследований поможет определять риски потери приоритетов и угрозы интересам государства. С подобными целями были созданы комиссии в Великобритании. В дополнение к библиометрической экспертизе раз в три-четыре года собирается экспертная комиссия, которая оценивает ранее опубликованные научные статьи по уровню значимости (всемирная значимость, национальная, региональная, незначимая публикация). Каждые 15-20 лет формируется комиссия для изучения национальных публикаций в фундаментальных областях знаний.

В ситуации, когда многие технологии окажутся недоступными для российских предприятий, остро встанет вопрос о собственных передовых разработках, которые смогут обеспечить эффективное функционирование производств, снижение производственных издержек, цифровую трансформацию существующих подходов и решение новых задач в ключевых отраслях экономики. Однако перевод, например, всей машиностроительной продукции в России на отечественную электронную компонентную базу потребует больших временных и финансовых затрат. ИИ станет необходимым компонентом таких технологий. Крайне важно, чтобы инвестиции в искусственный интеллект в ближайшие годы имели достаточный объем и концентрировались на технологиях, обеспечивающих прорывы в производстве, научных и конструкторских разработках и потребительских сервисах в России.

# 1.2 ВОЗМОЖНА ЛИ НОВАЯ «ЗИМА ИИ»?

Несмотря на значительный потенциал дальнейшего применения ИИ, возникают серьезные вызовы, способные ограничить дальнейшую экспансию этого рынка. Эксперты допускают наступление новой «зимы ИИ». Главная причина — аппаратные ограничения, вызванные обрывом цепочек поставок и достижением пределов вычислительных способностей.

Последние 10 лет мы наблюдали третью волну крупных инвестиций в ИИ. С 2012 по 2020 годы накопленный объем инвестиций в ИИ составил около 346,4 млрд долларов. По сравнению с 2012-м объем инвестиций вырос в 26 раз<sup>10</sup>. ИИ присутствует почти в каждом из продуктов экосистемы Google (Search, Cloud, Gaming)<sup>11</sup>. В 2020 году исследование Gartner показало, что 66 % опрошенных компаний с начала пандемии COVID-19 увеличили или не изменили объем инвестиций в искусственный интеллект<sup>12</sup>. Можно утверждать, что компании видят в ИИ прежде всего инструмент для решения конкретных прикладных задач<sup>11</sup>.

Но при всех объемах инвестиций, высоких темпах развития и внедрения технологий ИИ по-прежнему нет надежных и массовых решений в области беспилотных автомобилей, автономных систем управления умными устройствами, самообучающихся цифровых ассистентов<sup>13</sup>. В 2016 году Business Insider предсказывал, что к 2020-му по дорогам будут мчаться 10 млн беспилотных автомобилей<sup>14</sup>. В 2019 году Илон Маск был уверен — уже через год в мире будет 1 млн автономных такси<sup>15</sup>, а в 2022-м появится робот с сильным ИИ<sup>16</sup>. Ни одно из этих предсказаний пока не сбылось. Чрезмерный оптимизм в отношении прогресса искусственного интеллекта опасен: ведь если развитие технологий не оправдает существующих ожиданий (и инвестиций), то может наступить новая «зима ИИ» с оттоком средств и исследований из отрасли, по аналогии с прошлыми этапами развития ИИ<sup>17,13</sup>.

В 1960-е годы первые исследователи ИИ считали, что до появления интеллектуальных машин, способных мыслить на уровне человека, осталось каких-то 10 лет<sup>18</sup>. Тем не менее, даже сейчас алгоритмы далеки от воспроизведения человеческого мышления. Интерес исследователей состоял в использовании дедуктивных методов обучения. Американские ученые создали математическую модель нейрона мозга человека, первую нейросеть (перцептрон) и первый нейрокомпьютер, распознававший латинские буквы<sup>19</sup>. В середине 1970-х британский ученый Джеймс Латхилл и исследовательская организация DARPA параллельно выпустили доклады, в которых поставили под сомнение то, что исследования в области ИИ принесут пользу в ближайшем будущем<sup>20, 21</sup>.

В 1980-х годах ИИ основывался на двух технологиях: 1) экспертные системы на базе правил; 2) нейронные сети, возникшие благодаря появлению новых обучающих алгоритмов<sup>19</sup>. А уже в конце десятилетия произошел ряд событий (крах рынка машин LISP\*, отсутствие значимых результатов в проекте Fifth Generation Project), которые привели к возникновению «зимы ИИ», оттоку инвестиций и исследований из отрасли. Дедуктивный подход оказался тупиковым в силу отсутствия необходимых мощностей, сложной системы правил, невозможности создания базы знаний для новых областей науки<sup>22</sup>.

В годы «зимы ИИ» развивалось машинное обучение (ML), оно начиналось как теория статистического обучения, затем перешло в методы индуктивного вывода<sup>23</sup>. К 2010-м эта волна получила мощный импульс с появлением нейронных сетей, обучающихся на больших наборах данных<sup>18</sup>.

Основная движущая сила современного машинного обучения — это глубокое обучение, развертывание более обширных нейросетей на более быстром компьютерном оборудовании, позволяющем собирать и обрабатывать большие

10 Total VC investments in AI by country and industry // OECD.AI [сайт], 2022. — URL: [oecd.ai/en/data?selectedArea=investments-in-ai&selectedVisualization=total-vc-investments-in-ai-by-country-and-industry](https://oecd.ai/en/data?selectedArea=investments-in-ai&selectedVisualization=total-vc-investments-in-ai-by-country-and-industry).

11 Artificial Intelligence Software Revenue to Reach \$59.8 Billion Worldwide by 2025 // Businesswire [сайт], 2017. — URL: [businesswire.com/news/home/20170502006394/en/Artificial-Intelligence-Software-Revenue-to-Reach-59.8-Billion-Worldwide-by-2025-According-to-Tractica](https://businesswire.com/news/home/20170502006394/en/Artificial-Intelligence-Software-Revenue-to-Reach-59.8-Billion-Worldwide-by-2025-According-to-Tractica).

12 Gartner Survey Reveals 66 % of Organizations Increased or Did Not Change AI Investments Since the Onset of COVID-19 // Gartner [сайт], 2020. — URL: [gartner.com/en/newsroom/press-releases/2020-10-01-gartner-survey-reveals-66-percent-of-organizations-increased-or-did-not-change-ai-investments-since-the-onset-of-covid-19#:~:text=October%201%2C%202020,Gartner%20Survey%20Reveals%2066%25%20of%20organizations%20increased%20or%20did%20not,the%20onset%20of%20COVID%2D19](https://gartner.com/en/newsroom/press-releases/2020-10-01-gartner-survey-reveals-66-percent-of-organizations-increased-or-did-not-change-ai-investments-since-the-onset-of-covid-19#:~:text=October%201%2C%202020,Gartner%20Survey%20Reveals%2066%25%20of%20organizations%20increased%20or%20did%20not,the%20onset%20of%20COVID%2D19).

13 Mitchell M. Why AI is Harder Than We Think / M. Mitchell // Arxiv [сайт], 2021. — URL: [arxiv.org/pdf/2104.12871.pdf](https://arxiv.org/pdf/2104.12871.pdf).

14 10 million self-driving cars will be on the road by 2020 // BI Intelligence [сайт], 2016. — URL: [businessinsider.com/report-10-million-self-driving-cars-will-be-on-the-road-by-2020-2015-5-6](https://businessinsider.com/report-10-million-self-driving-cars-will-be-on-the-road-by-2020-2015-5-6).

15 Funding a Revolution: Government Support for Computing Research // National Academy Press [сайт], 1999. — URL: [web.archive.org/web/20080112001018/http://www.nap.edu/readingroom/books/far/ch9.html](https://web.archive.org/web/20080112001018/http://www.nap.edu/readingroom/books/far/ch9.html).

\* Lisp — язык программирования, использующий методы экспертных систем.

объемы обучающих данных. Такая стратегия «масштабирования» получила новое развитие со времен конкурса ImageNet (2012), запустившего революцию в глубоком обучении<sup>24</sup>. Спустя 11 лет глубокое обучение по-прежнему доминирует в развитии машинного обучения: 2021-й стал годом «монструозных ИИ-моделей»<sup>25</sup>.

Глубокое обучение критикуют за излишнюю ресурсозатратность. По оптимистичным прогнозам, чтобы получить коэффициент погрешности 5 % для базы данных ImageNet, необходимо увеличить вычисления на 105 гигафлопс. Затраты при этом возрастут на 1010 долларов, выбросы CO<sub>2</sub> увеличатся на 104 lbs<sup>26</sup>.

- 16 Маск объявил о создании человекоподобного робота Tesla Bot // Forbes [сайт], 2021. — URL: [forbes.ru/newsroom/milliardery/437783-mask-obyavil-o-sozdanii-chelovekopodobnogo-robota-tesla-bot](https://forbes.ru/newsroom/milliardery/437783-mask-obyavil-o-sozdanii-chelovekopodobnogo-robota-tesla-bot).
- 17 The dark ages of AI: A panel discussion at AAAI-84 / McDermott D., Waldrop M. M., Schank R. [et al.] // AI Magazine. — 1985. — № 8–3. — С. 122–134.
- 18 Brooks R. An Inconvenient Truth About AI — AI won't surpass human intelligence anytime soon / R. Brooks // IEEE Spectrum [сайт], 2021. — URL: [mordorintelligence.com/industry-reports/natural-language-processing-market](https://mordorintelligence.com/industry-reports/natural-language-processing-market).
- 19 Ясницкий Л. Зима близко. Почему искусственный интеллект может потерять популярность / Л. Ясницкий // НИУ ВШЭ [сайт], 2019. — URL: <https://iq.hse.ru/news/298467405.html>.
- 20 Nield T. Deep Learning Already Hitting its Limitations? / T. Nield // Towards Data Science [сайт], 2019. — URL: [towardsdatascience.com/is-deep-learning-already-hitting-its-limitations-c81826082ac3](https://towardsdatascience.com/is-deep-learning-already-hitting-its-limitations-c81826082ac3).
- 21 Funding a Revolution: Government Support for Computing Research // National Academy Press [сайт], 1999. — URL: [web.archive.org/web/20080112001018/http://www.nap.edu/readingroom/books/far/ch9.html](https://web.archive.org/web/20080112001018/http://www.nap.edu/readingroom/books/far/ch9.html).
- 22 Hawkins A.J. Here are Elon Musk's wildest predictions about Tesla's self-driving cars / A.J. Hawkins // The Verge [сайт], 2019. — URL: [theverge.com/2019/4/22/18510828/tesla-elon-musk-autonomy-day-investor-comments-self-driving-cars-predictions](https://theverge.com/2019/4/22/18510828/tesla-elon-musk-autonomy-day-investor-comments-self-driving-cars-predictions).
- 23 На основе интервью с Л. В. Уткиным (СПбПУ) // Фонд ЦСР «Северо-Запад», 2021.
- 24 Ford M. Rule of the Robots: Warning Signs / M. Ford // IEEE Spectrum [сайт], 2021. — URL: [spectrum.ieee.org/rule-of-the-robots-book](https://spectrum.ieee.org/rule-of-the-robots-book).
- 25 Heaven W. D. 2021 was the year of monster AI models / W. D. Heaven // MIT Technology Review [сайт], 2021. — URL: [technologyreview.com/2021/12/21/1042835/2021-was-the-year-of-monster-ai-models/?truid=&utm\\_source=the\\_download&utm\\_medium=email&utm\\_campaign=the\\_download.unpaid.engagement&utm\\_term=&utm\\_content=12-2021&mc\\_cid=eced389005&mc\\_eid=fdcf859c6](https://technologyreview.com/2021/12/21/1042835/2021-was-the-year-of-monster-ai-models/?truid=&utm_source=the_download&utm_medium=email&utm_campaign=the_download.unpaid.engagement&utm_term=&utm_content=12-2021&mc_cid=eced389005&mc_eid=fdcf859c6).
- 26 The Computational Limits of Deep Learning / N. C. Thompson, K. Greenewald, K. Lee, G. F. Manso / arXiv [сайт], 2020. — URL: [arxiv.org/abs/2007.05558](https://arxiv.org/abs/2007.05558).

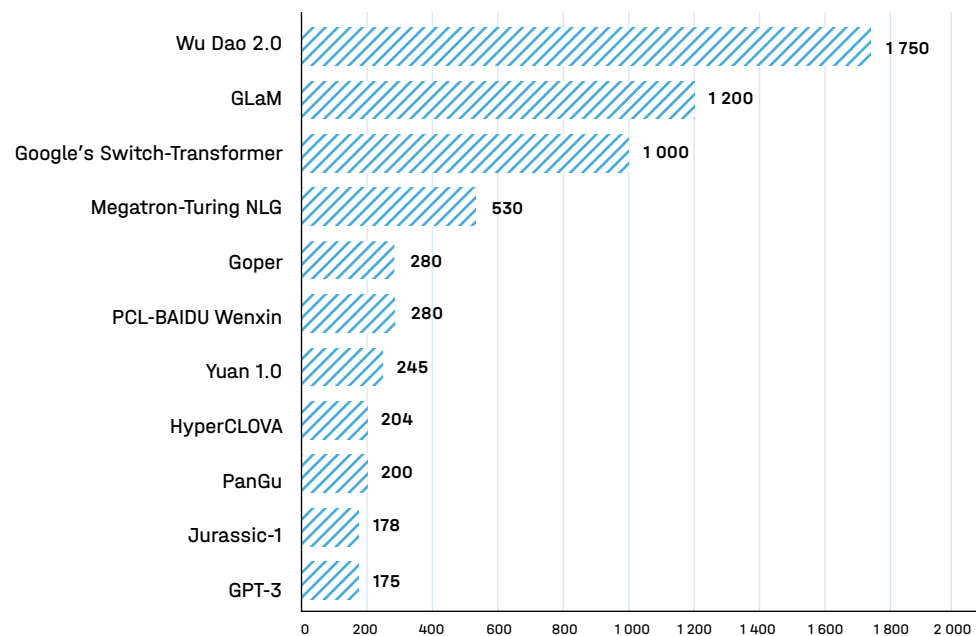


Рис. 4. Количество параметров современных моделей ИИ, млрд параметров

Источник: MIT Technology Review

Помимо ресурсозатратности, дальнейшему развитию глубоких нейронных сетей препятствуют следующие ограничения<sup>27, 24</sup>:

- «хрупкость» — система неспособна адаптироваться к небольшим изменениям входных данных;
- качество нейронных сетей зависит от качества и количества поступающих данных;
- катастрофическое забывание — при изучении нейронными сетями новой задачи старые задачи забываются;
- неспособность объяснить результаты решения задач с помощью нейронных сетей в ситуациях с высокой степенью риска;
- «самонадеянность» алгоритмов машинного обучения — ИИ должен понимать, когда он не уверен в результатах или не обладает достаточными знаниями об объекте, и действовать в соответствии с этим (например, передавать управление автомобилем человеку при обнаружении абсолютно нового объекта на дороге);
- отсутствие у ИИ здравого смысла — способности оценивать обстоятельства и действовать в соответствии с ними;
- нейросети плохо справляются с решением математических задач.

Кроме того, существуют математические ограничения в виде вопроса о равенстве классов сложности P и NP (проблема перебора). В случае положительного ответа (P равно NP) многие сложные задачи будут решаться гораздо быстрее, чем сейчас<sup>28</sup>. Спустя полвека после того, как проблема была формализована, всё больше ученых склоняется к тому, что P не равно NP. Этот барьер для исследований ИИ, возможно, никогда не удастся преодолеть, и сложность алгоритмов всегда будет ограничивать наши возможности<sup>20</sup>.

Несмотря на ряд глобальных предпосылок, способных ввести рынок ИИ в состояние «зимы», маловероятно, что это произойдет со всеми его сегментами. Торможение будет характерно лишь для некоторых. Специалисты полагают, что в отрасли наступит отклонение от стратегического направления глубокого обучения: когда-то исследования ушли от экспертных сетей, а теперь смогут уйти от ML, всецело полагающегося на нейросети<sup>23</sup>.

Для российского рынка ситуации «зимы ИИ» может быть связана с дефицитом аппаратного обеспечения из-за обрыва цепочек поставок, принципиально важных для работы с большими нейронными сетями. Это может привести к фокусировке имеющихся ресурсов на задачах, обеспеченных заказом в ограниченном спектре отраслей.

27 Chivers T. How Deepmind is Reinventing the Robot / T. Chivers // IEEE Spectrum [сайт], 2021. — URL: spectrum.ieee.org/how-deepmind-is-reinventing-the-robot.

28 Равенство классов P и NP // Академик: академический словарь: [сайт], 2010. — URL: dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/93836.

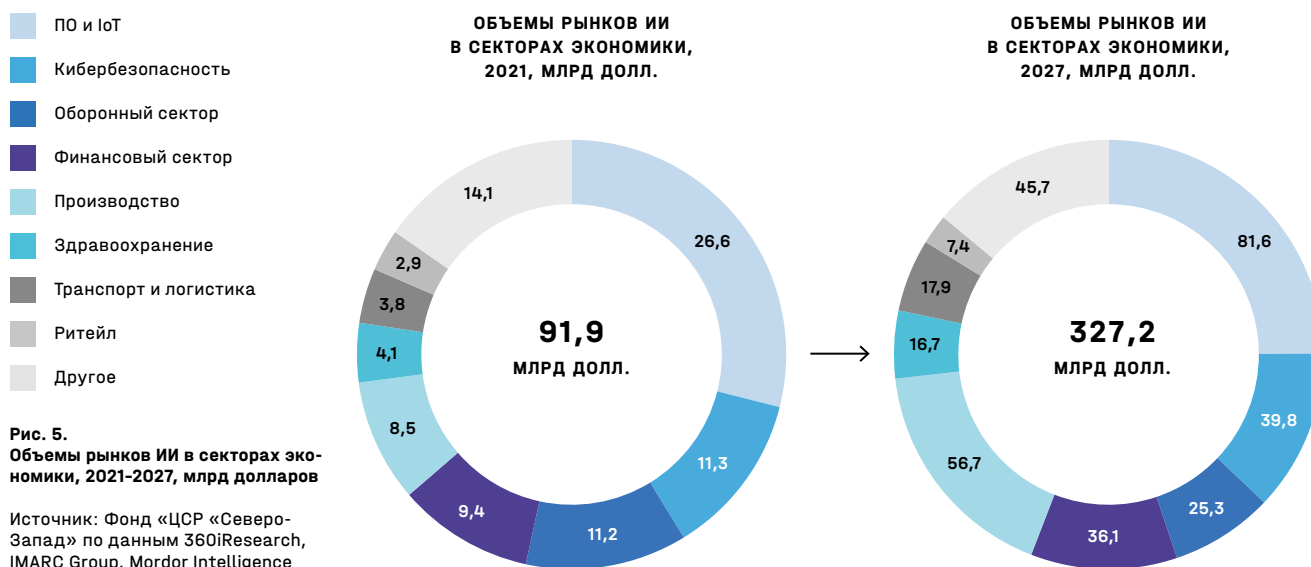
# 1.3

## ПРОМЫШЛЕННОСТЬ — ВАЖНЕЙШИЙ ДРАЙВЕР РОСТА РЫНКА

Предприятия и организации во всех отраслях увеличивают свои инвестиции в ИИ с целью поддержания конкурентоспособности и повышения эффективности. Например, в исследовании Harvard Business Review установлено, что увеличение роботизированных транзакций за счет использования ИИ ведет к росту продаж. Согласно отчетам консалтинговых компаний, количество роботизированных транзакций в 2019 году достигло отметки в 10,1 млрд долларов<sup>11</sup>. В целом прогнозируется рост расходов на системы ИИ с 85,3 млрд долларов в 2021 году до 204 млрд в 2025-м при среднегодовом темпе роста 24,5 %<sup>29</sup>.

Наработанный потенциал Индустрии 4.0, которая за прошедшее десятилетие способствовала автоматизации и цифровизации промышленности, открывает возможности для развития сферы ИИ. Информация, которая накапливается в базах данных промпредприятий, позволяет предположить, что именно промышленность станет одним из ключевых драйверов развития ИИ. К 2027 году максимальные темпы роста применения ИИ будут приходиться на производственную сферу — на уровне 31,1 % CAGR. За ней с большим отрывом следует логистика (CAGR — 24,7 %), здравоохранение (CAGR — 22 %) и финансовый сектор (CAGR — 21 %).

<sup>29</sup> Investment in Artificial Intelligence Solutions Will Accelerate as Businesses Seek Insights, Efficiency, and Innovation, According to a New IDC Spending Guide // International Data Corporation, 2021. — URL: [idc.com/getdoc.jsp?containerId=prUS48191221](https://www.idc.com/getdoc.jsp?containerId=prUS48191221).



Промышленность входит в число драйверов рынка ИИ в США, Китае, Великобритании, Индии, Южной Корее, странах ЕС. Она же станет одним из основных заказчиков искусственного интеллекта и связанных с ним исследований в России.

Однако в отличие от многих развитых стран, где ключевые роли принадлежат специализирующимся в области ИИ компаниям (например, DeepMind), в нашей стране большое значение будет иметь нефтегазовый бизнес<sup>30, 31, 23</sup>. Это объясняется его высокой санкционной устойчивостью, а также потребностью в отраслевых решениях на разных технологических переделах (включая металлообработку, машиностроение, строительство, логистику и пр.). Наряду с металлургией, химической промышленностью и некоторыми другими производственными индустриями именно нефтегазовый сектор претендует на ста-

<sup>30</sup> На основе интервью с В. В. Климовым (НИЯУ МИФИ) // Фонд ЦСР «Северо-Запад», 2021.



тус наиболее активной отрасли промышленности, заинтересованной в развитии рынка технологий ИИ. Компании сектора выступают инициаторами масштабных кооперационных проектов и заказчиками исследований и разработок в этой сфере. В 2021 году была создана Ассоциация «Искусственный интеллект в промышленности» (учредитель — ПАО «Газпром нефть», позже в состав членов ассоциации вошла компания ПАО «Татнефть»). Ассоциация поддерживает исследовательские центры и команды ученых, занимающихся ИИ, реализует образовательные программы для студентов вузов и сотрудников промышленных предприятий, проводит мероприятия по развитию рынка ИИ-технологий.

На мировом рынке ИИ нефтегазовая промышленность также играет заметную роль. Ориентация развитых стран на декарбонизацию, усиление конкуренции на рынке нефтегазового сырья — в этих условиях на искусственный интеллект возлагаются большие надежды. Компании объединяются в консорциумы, направляя совместные усилия на создание масштабных ИИ-технологий, помогающих решать вопросы операционной и производственной эффективности. Один из наиболее ярких примеров — консорциум компаний Shell, Baker Hughes, C3 AI и Microsoft, реализующих инициативу Open AI Energy Initiative<sup>32</sup>.

31 На основе интервью с М. В. Болсуновской (СПбПУ) // Фонд ЦСР «Северо-Запад», 2021.

32 Shell, C3 AI, Baker Hughes, and Microsoft Launch the Open AI Energy Initiative, an Ecosystem of AI Solutions to Help Transform the Energy Industry // C3.ai [сайт], 2021. — URL: [c3.ai/shell-c3-ai-baker-hughes-and-microsoft-launch-the-open-ai-energy-initiative-an-ecosystem-of-ai-solutions-to-help-transform-the-energy-industry](https://c3.ai/shell-c3-ai-baker-hughes-and-microsoft-launch-the-open-ai-energy-initiative-an-ecosystem-of-ai-solutions-to-help-transform-the-energy-industry).

## UPSTREAM



### ИИ В ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

- Анализ пласта
- Сбор сейсмических данных
- Обработка сейсмических данных
- 3D-имиджинг сейсмических данных



### ИИ В РАЗВЕДЧНОМ БУРЕНИИ

- Планирование скважин
- Автоматизация буровых установок
- Мониторинг бурения
- Оптимизация бурения в режиме реального времени
- Испытание скважин с помощью интеллектуальных датчиков
- Прогноз выхода из строя оборудования



### ИИ В ОЦЕНОЧНЫХ РАБОТАХ

- Управление геолого-геофизическими данными
- Оцифровка каротажных диаграмм
- Интерпретация каротажных диаграмм
- Расчет параметров оценочного бурения
- Моделирование коллектора
- Характеристика коллектора



### ИИ В РАЗРАБОТКЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

- Расположение скважин и его оптимизация, контроль функционирования скважин и проч.



### ИИ В ДОБЫЧЕ

- обеспечение давления пласта, контроль безопасности, прогноз поведения слоя и проч.

## MIDSTREAM



### ИИ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ ТРУБОПРОВОДОВ

- Оптимизация трассировки пути строительства трубопровода
- Определение мест расположения терминалов и соединений трубопроводов



### ИИ В ТРАНСПОРТИРОВКЕ

- Расчет наиболее экономичного маршрута
- Системы автопилота и автостыковки
- Мониторинг танкеров



### ИИ В ЭКСПЛУАТАЦИИ ТРУБОПРОВОДОВ

- Автоматизация компрессорной станции
- Раннее предупреждение о неисправностях
- Коррозионный мониторинг и диагностика



### ИИ В РАСПРЕДЕЛЕНИИ РЕСУРСОВ

- Анализ экономических и погодных условий для прогнозирования спроса
- Оптимизация хранилища

## DOWNSTREAM



### ИИ В НЕФТЕПЕРЕРАБОТКЕ

- Автоматизация и оптимизация активов процессов нефтепереработки
- Использование датчиков и микроконтроллеров для обслуживания инфраструктуры и раннего предупреждения аварий



### ИИ В УПРАВЛЕНИИ НЕФТЕХРАНИЛИЩЕМ

- Предиктивная аналитика и алгоритмы предиктивного управления
- Снижение затрат на эксплуатацию складских помещений
- Эффективное обслуживание оборудования



### ИИ В БЕЗОПАСНОСТИ И ОХРАНЕ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

- Удаленный мониторинг складских помещений и оборудования
- Обнаружение утечек
- Обнаружение деформации оборудования

Рис. 6. Типовые направления применения ИИ в нефтегазовой индустрии

Источник: Фонд «ЦСР «Северо-Запад» по данным King's College London, European Centre for Energy and Recourse Security

Большое внимание вопросам применения ИИ уделяет металлургия. Уже сегодня спектр использования ИИ довольно широк. Как и в нефтегазовой отрасли, он охватывает все основные технологические переделы: добычу полезных ископаемых, обогащение руды, производство железа и стали, прокат, логистику, продажи и маркетинг. Металлургические компании активно развивают партнерства в этой сфере. Группа НЛМК заключила соглашение о стратегическом партнерстве с Ассоциацией лабораторий по развитию искусственного интеллекта, планируя расширять сотрудничество в области цифровизации различных производственных процессов, в т. ч. технологии Интернета вещей и искусственного интеллекта<sup>33</sup>.

33 Группа НЛМК тестирует инновации в области Интернета вещей и искусственного интеллекта // НЛМК [сайт], 2021. — URL: [nlmk.com/ru/media-center/press-releases/nlmk-pilots-iot-and-ai-innovations](https://nlmk.com/ru/media-center/press-releases/nlmk-pilots-iot-and-ai-innovations).

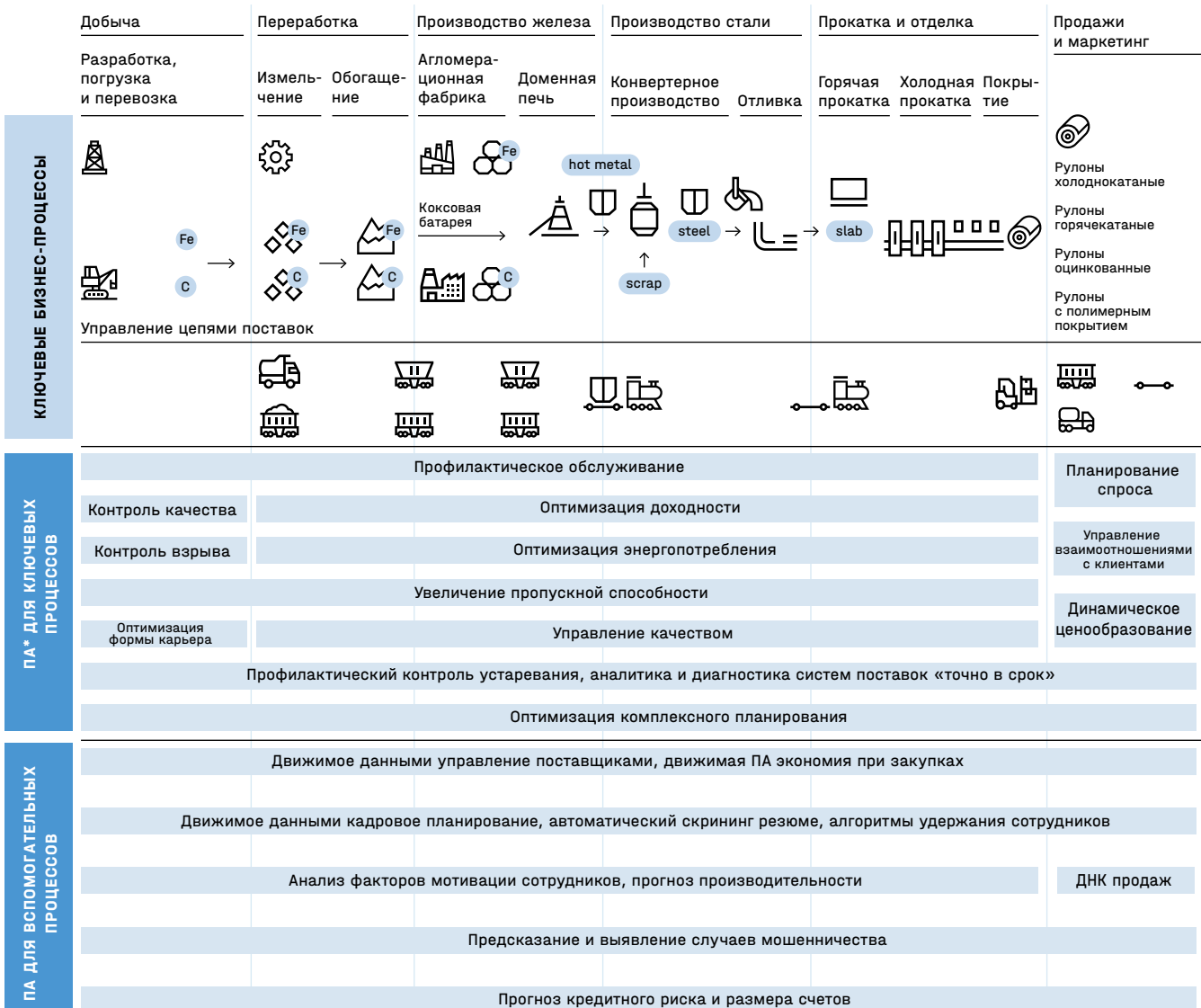


Рис. 7. Типовые направления применения ИИ в металлургической промышленности

\*ПА — продвинутая аналитика

Источник: НЛМК<sup>34</sup>

34 Аршавский А. Искусственный интеллект в металлургии / А. Аршавский // НЛМК [сайт], 2018. — URL: [cloud-digital.ru/sites/default/files/13.25-13.45\\_arhavsky\\_nlmk\\_new.pdf](https://cloud-digital.ru/sites/default/files/13.25-13.45_arhavsky_nlmk_new.pdf).

Аналогичные тенденции наблюдаются и в других отраслях промышленности, что указывает на потенциал сектора, а также на специфику отечественного рынка ИИ. В условиях санкционных ограничений и разрыва международных технологических цепочек с участием российских предприятий перед промышленностью РФ встают системные вызовы, связанные с поиском способов достижения технологической автономности и самодостаточности. Отечественные решения в области искусственного интеллекта — одно из важнейших средств для движения в этом направлении.

# ЧАСТЬ 2

ДОЛГОСРОЧНЫЕ  
ПЕРСПЕКТИВЫ ИИ

# 2.1 БУДУЩЕЕ ВЫЧИСЛЕНИЙ В ИИ

Наука об искусственном интеллекте в значительной степени опирается на достижения в смежных направлениях — вычислительной технике и работе с данными. Поскольку эти области знаний составляют основу для развития ИИ, их необходимо рассмотреть в первую очередь. Преодоление ряда фронтиров в этих направлениях способно обеспечить существенный прогресс в сфере искусственного интеллекта.

Штурмуемые зоны в разных научных коллективах и странах называют по-разному — увеличением параметров моделей ИИ, усложнением алгоритмов, обратной инженерией мозга, разговорным интеллектом и др.<sup>35</sup>. Для российского рынка ИИ специфика фронтальной зоны может не совпадать с глобальной.

<sup>35</sup> Шумский С. А. Воспитание машин: Новая история разума / С. А. Шумский. — Москва: Альпина нон-фикшн, 2021. — 174 с.

## Фронтиры в технологиях вычислений

### 1 | Квантовые вычисления

Квантовый искусственный интеллект, т. е. такой ИИ, вычисления для которого осуществляет квантовый компьютер<sup>36</sup>, пока еще далек от реализации — 8-кубитные и 16-кубитные квантовые компьютеры используются в фундаментальных науках, но не приносят существенных результатов в науке об искусственном интеллекте<sup>37</sup>.

Большинство классических алгоритмов ИИ уже переведены для квантовых компьютеров, поэтому главный фронт в настоящий момент — создание такой квантовой вычислительной системы, которая могла бы применяться в задачах машинного обучения с большей эффективностью, чем традиционное вычислительное оборудование<sup>31</sup>.

Для этого квантовые вычислительные системы должны сделаться более стабильными в отношении ошибок и более мощными. Необходимо создать фреймворки для моделирования и обучения систем ИИ, которые стали бы общепринятыми за счет открытого кода и способствовали развитию сообщества разработчиков и появлению новых сценариев применения квантового ИИ<sup>31</sup>.

<sup>36</sup> Dilmegani C. In-Depth Guide to Quantum Artificial Intelligence in 2022 / С. Dilmegani // AI Multiple [сайт], 2022. — URL: [research.aimultiple.com/quantum-ai](https://research.aimultiple.com/quantum-ai).

<sup>37</sup> На основе интервью с А. А. Фильченковым (ИТМО) // Фонд ЦСР «Северо-Запад», 2021.

## 2 | Распределенные системы

Традиционно модели ИИ обучают на высокопроизводительных системах SIMD-архитектуры (серверы с графическими картами). Однако работа с масштабными моделями ИИ, а главное, с большими данными требует развития специализированных распределенных систем, включающих в себя географически разнесенные вычислительные системы разной архитектуры, которые могут принадлежать разным владельцам. Для этих систем задача обучения моделей становится иерархической. При этом главная проблема в области таких распределенных систем — портирование на них архитектур моделей машинного обучения, особенно с учетом размещения данных. Необходимо также разработать методы реализации параллельных вычислений в этих системах, включая планирование и управление ресурсами<sup>31</sup>.

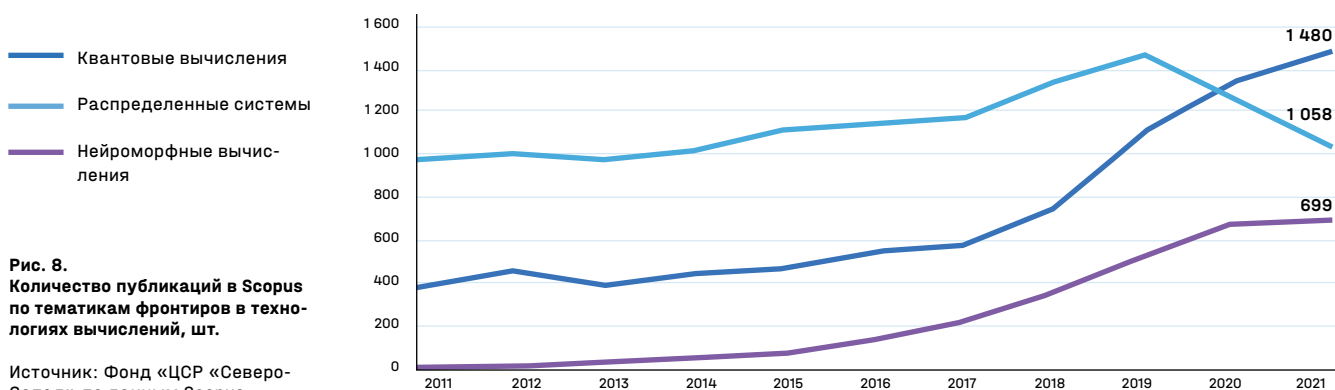
Решение перечисленных задач позволит существенно улучшить возможности коллаборации научных групп и упростит доступ к данным, расположенным в распределенных источниках<sup>31</sup>.

## 3 | Нейроморфные вычисления

Современная вычислительная техника основана на архитектурах фон Неймана, которые предполагают перемещение данных между физически разделенными процессором и памятью. В таких условиях неизбежны простои мощности процессора при интенсивных вычислениях, особенно в задачах искусственного интеллекта, которые сильнее прочих зависят от большого объема данных.

Ответом на этот вызов будет переход вычислительного оборудования, используемого для работы моделей ИИ, к нейроморфным системам, элементы структуры которых могут одновременно хранить и обрабатывать данные, как нейроны мозга. Системы основаны на спайковых нейронных сетях, выступающих заменой современным процессорам. Вместо транзисторов здесь используются искусственные нейроны, каждый из которых способен самостоятельно функционировать и посылать сигналы другим нейронам в сети. Кодирова информацию в самих сигналах и их периодичности, спайковые нейронные сети имитируют естественные процессы обучения в ответ на внешние стимулы.

В разработке нейроморфных вычислительных систем сохраняются ограничения, связанные с высокой стоимостью и сложностью масштабирования. Хотя многие нейроморфные системы позволяют осуществлять обучение в реальном времени, первичную тренировку моделей ИИ все еще приходится выполнять на основе традиционных архитектур. Не разработаны и архитектуры наборов команд (ISA) для нейроморфных процессоров, которые смогли бы полностью реализовать их потенциал. Еще одно перспективное направление — разработка моделей искусственного интеллекта для конкретных задач, которые встроены непосредственно в аппаратную часть нейроморфных систем — аналогового ИИ.



## Методические фронтиры ИИ и работа с данными

### 1 Интеграция нейросетевого и когнитивного подходов

Подход к ИИ, основанный на знаниях, называют когнитивным (символьным)<sup>38</sup>. Именно на нем были основаны экспертные системы, которые разрабатывались в 1980-х годах. В настоящее время интерес к этому направлению возобновляется, поскольку именно знания, а не данные, могут быть основой для принятия искусственным интеллектом автономных решений<sup>39</sup> и переноса опыта из одной задачи в другую<sup>40</sup>. Это позволит применять ИИ в неформализованных областях и создавать многослойные системы искусственного интеллекта для бизнеса, состоящие из множества агентов, действующих на основе знаний (системы эмерджентного интеллекта)<sup>39</sup>. Однако остается нерешенной проблема интеграции знаний в архитектуру существующих нейросетей<sup>38</sup>.

38 На основе интервью с А. В. Самсоновичем (НИЯУ МИФИ) // Фонд ЦСР «Северо-Запад», 2021.

39 На основе интервью с П. О. Скобелевым (ИПУСС РАН) // Фонд ЦСР «Северо-Запад», 2021.

40 На основе интервью с А. Л. Тулупьевым (СПбГУ) // Фонд ЦСР «Северо-Запад», 2021.

41 На основе интервью с К. В. Кринкиным (СПбГЭТУ «ЛЭТИ») // Фонд ЦСР «Северо-Запад», 2021.

42 Co-evolutionary hybrid intelligence (preprint) / K. Krinkin, Y. Shichkina, A. Ignatyev // arXiv [сайт], 2021. — URL: [arxiv.org/ftp/arxiv/papers/2112/2112.04751.pdf](https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/2112/2112.04751.pdf).

43 На основе интервью с А. В. Бухановским (ИТМО) // Фонд ЦСР «Северо-Запад», 2021.

### 2 Системы гибридного интеллекта

Гибридный интеллект предполагает создание таких систем, в которых искусственный интеллект работает совместно с естественным, расширяя возможности человека, при этом не отдавая полный контроль машине<sup>41</sup>.

Фронтиром в создании систем гибридного интеллекта является обеспечение интероперабельности естественного и искусственного интеллекта<sup>41</sup>.

Преодоление этого препятствия зависит от прогресса в понимании законов функционирования человеческого интеллекта, развития средств передачи информации от человека к машине и наоборот, а также от разработки экосистем гибридного интеллекта, которые позволили бы легко интегрировать новые продукты<sup>42</sup>.

### 3 Генеративный искусственный интеллект

Системы генеративного ИИ потенциально могут позволить осуществлять автоматическое создание новых систем искусственного интеллекта, а также различного творческого контента. Ключевые фронтиры в генеративном искусственном интеллекте — формализация неопределенностей, связанных с расчетом вероятности реакции на сгенерированный контент, и проблемы обхода пространства поиска — новые алгоритмы оптимизации при генерации контента<sup>43</sup>.

### 4 Обучение с подкреплением

Современные методы обучения с подкреплением находятся в тупике, поскольку их применение в решении реальных задач сталкивается с проблемой необходимости большого количества безошибочных итераций, что требует длительного обучения. Фронтиром будет усовершенствование устойчивости методов обучения с подкреплением к ошибкам и аномалиям в данных<sup>23</sup>.

## 5 | Объяснимый искусственный интеллект

Решения, которые принимают практически все модели ИИ, не поддаются объяснению и интерпретации. В то же время для многих сфер их использования крайне важно понимать, за счет чего было принято то или иное решение<sup>23</sup>. Фронтир состоит не только в разработке методов объяснения решений ИИ, но и в том, чтобы оценить и проверить работоспособность и пригодность этих методов для реальных задач<sup>44</sup>.

<sup>44</sup> Das A. Opportunities and Challenges in Explainable Artificial Intelligence (XAI): A Survey / A. Das, P. Rad // arXiv [сайт], 2020. — URL: arxiv.org/pdf/2006.11371.pdf.

## 6 | Коррекция ошибок искусственного интеллекта

Искусственный интеллект, основанный на данных, может совершать ошибки, которые сложно отследить. Чем больше размерность модели ИИ, тем выше в ней риск ошибок и тем меньше ее пригодность для принятия решений, сопряженных с риском<sup>45</sup>. В архитектуре моделей искусственного интеллекта должны появляться отдельные системы, которые будут отслеживать и корректировать ошибки и «разобучать» модели ИИ<sup>45, 39</sup>.

<sup>45</sup> На основе интервью с А. Н. Горбанем (Университет Лестера, Великобритания) // ЦСР «Северо-Запад», 2021.

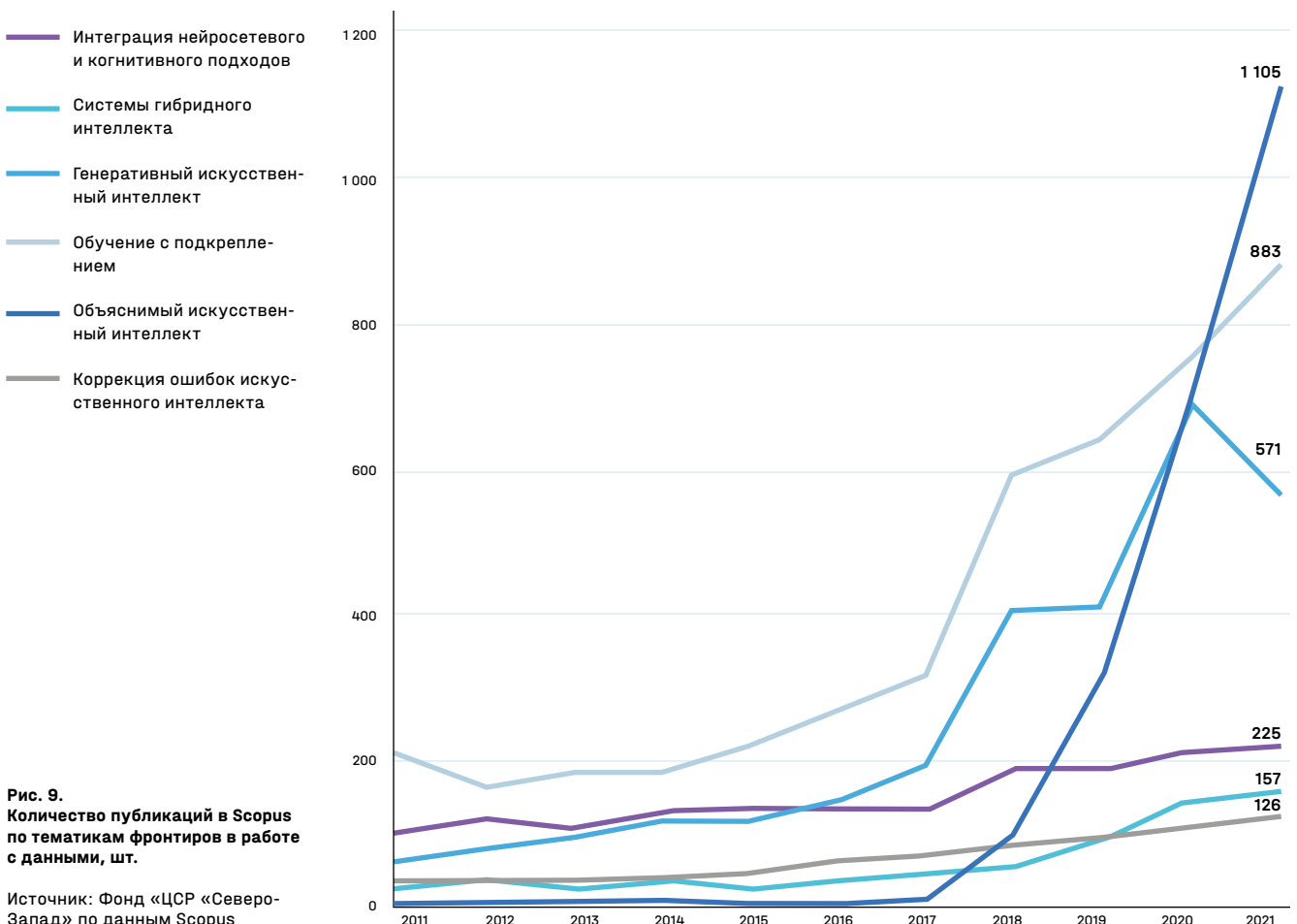


Рис. 9. Количество публикаций в Scopus по тематикам фронтиров в работе с данными, шт.

Источник: Фонд «ЦСР «Северо-Запад» по данным Scopus

# 2.2

## ВЫЗОВЫ РАЗВИТИЯ АППАРАТНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ИИ

К началу 2020-х годов человечество вплотную приблизилось к порогу действия закона Мура\*. Ожидается, что в первой половине десятилетия лидеры полупроводниковой промышленности запустят в серийное производство чипы с размерностью процессоров 3–4 нм и менее. Пока что это остается фронтиром развития полупроводниковой промышленности, но уже очевидно, что указанный уровень будет достигнут.

Такой уровень размерности открывает новые вычислительные возможности для ИТ-индустрии. ИИ-системы становятся всё более производительными. При этом они имеют схожий с ростом размерности чипов темп развития. По словам программиста Google Клифа Янга, количество внутренних проектов, концентрирующихся на ИИ в Google, удваивается каждые 18 месяцев<sup>46</sup>, т. е. соответствует темпу увеличения количества транзисторов, размещаемых на кристалле интегральной схемы, — 18–24 месяца (закон Мура).

В то же время при обсуждении вопроса о вычислительных перспективах для систем ИИ стал активно использоваться другой эмпирический закон, названный по имени Дженсена Хуанга, генерального директора компании NVIDIA. Согласно закону Хуанга, графические процессоры (GPU) прогрессируют гораздо быстрее, чем центральные (CPU), а производительность кремниевых чипов, обеспечивающих искусственный интеллект, увеличивается каждые два года более чем вдвое<sup>47</sup>. По сравнению с законом Мура, который фокусируется исключительно на транзисторах ЦП, закон Хуанга охватывает совокупность достижений в архитектуре, межсоединениях, технологии памяти и алгоритмах.

Дискуссии об аппаратном обеспечении для ИИ (в т. ч. о законе Хуанга) в последние два года повысили интенсивность поиска фронта развития кремниевой электроники. Отыщет ли микроэлектроника альтернативу кремниевой платформе или выйдет в новые технологические решения, позволяющие сохранять темпы роста производительности при должном уровне энергоэффективности вычислительных систем (в т. ч. для ИИ), — главный научный фронт аппаратного обеспечения на следующие 15 лет. Именно искусственный интеллект взвинчивает запрос на создание более высокопроизводительных вычислительных систем. Наблюдение за направлениями развития искусственного интеллекта — ключ к пониманию тренда развития вычислительных систем в целом.

### Новое поколение самообучающихся нейроморфных процессоров

Важнейший фронт развития аппаратного обеспечения для систем ИИ — поиск новых архитектур вычислений. Один из центральных фокусов развития этого направления — создание нейроморфных процессоров, которые позволят выполнять биоподобные нейроморфные вычисления с повышенной эффективностью.

Компания Intel в 2017 году разработала нейроморфный цифровой процессор Loihi с возможностью обучения на чипе. Loihi работает по тем же принципам, что и человеческий мозг, и содержит 130 тыс. искусственных нейронов и 130 млн синапсов<sup>48</sup>, а обучение идет с использованием разных типов обратной связи.

В 2021 году был представлен процессор второго поколения (Loihi 2) и среда программирования Lava с открытым исходным кодом, позволяющая создавать приложения для нейроморфных процессоров<sup>49</sup>. Эта разработка помогает значительно увеличить скорость и энергетическую эффективность ИИ. Улучшения в архитектуре Loihi 2 дают возможность оперировать новыми клас-

\* Закон Мура — эмпирическое наблюдение, изначально сделанное Гордоном Муром, согласно которому (в современной формулировке) количество транзисторов, размещаемых на кристалле интегральной схемы, удваивается каждые 24 месяца (источник: Толковый англо-русский словарь по нанотехнологии. — М., В. В. Арсланов, 2009).

46 Ray T. В Google says 'exponential' growth of AI is changing nature of compute / T. Ray // ZDNet [сайт], 2018. — URL: [zdnet.com/article/google-says-exponential-growth-of-ai-is-changing-nature-of-compute](https://zdnet.com/article/google-says-exponential-growth-of-ai-is-changing-nature-of-compute).

47 Mims C. Huang's Law Is the New Moore's Law, and Explains Why Nvidia Wants Arm / C. Mims // The Wall Street Journal [сайт], 2020. — URL: [wsj.com/articles/huangs-law-is-the-new-moores-law-and-explains-why-nvidia-wants-arm-11600488001](https://wsj.com/articles/huangs-law-is-the-new-moores-law-and-explains-why-nvidia-wants-arm-11600488001).

48 Intel Loihi (нейроморфный процессор) // TAdviser [сайт], 2022. — URL: [tadviser.ru/index.php/%D0%9F%D1%80%D0%BE%D0%B4%D1%83%D0%BA%D1%82:Loihi\\_\(%D0%BD%D0%B5%D0%B9%D1%80%D0%BE%D0%BC%D0%BE%D1%80%D1%84%D0%BD%D1%BB%D0%B9\\_%D0%BF%D1%80%D0%BE%D1%86%D0%B5%D1%81%D1%81%D0%BE%D1%80\)](https://tadviser.ru/index.php/%D0%9F%D1%80%D0%BE%D0%B4%D1%83%D0%BA%D1%82:Loihi_(%D0%BD%D0%B5%D0%B9%D1%80%D0%BE%D0%BC%D0%BE%D1%80%D1%84%D0%BD%D1%BB%D0%B9_%D0%BF%D1%80%D0%BE%D1%86%D0%B5%D1%81%D1%81%D0%BE%D1%80)).

49 Представлен нейроморфный процессор Intel Loihi 2 и среда программирования Lava // Аспект исследования и публикации [сайт], 2021. — URL: [ixbt.com/news/2021/09/30/intel-loihi-2-lava.html](https://ixbt.com/news/2021/09/30/intel-loihi-2-lava.html).



сами нейроморфных алгоритмов и приложений, обеспечивая повышение скорости обработки до 10 раз<sup>49</sup>. Благодаря нефроморфным чипам решается широкий круг задач: применение компьютерного зрения, распознавание голоса и жестов, поиск и оптимизация (локальный поиск). Компания Intel уже создала роботизированные руки, нейроморфную искусственную кожу и алгоритм распознавания запахов с помощью чипа Loihi.

Разработанный в MIT полностью аналоговый Brain-on-a-chip стал важным шагом к появлению портативных нейроморфных чипов с низким энергопотреблением для распознавания образов и других обучающих задач. Изобретатели заявляют: этот дизайн искусственных синапсов позволит использовать гораздо меньшие портативные устройства на ИИ, способные выполнять сложные вычисления, которые пока доступны только большим суперкомпьютерам<sup>50</sup>.

В России также ведутся исследования в области нейроморфных вычислений и процессоров. Направление развивается силами коллективов МФТИ, Сколтеха, СПбГЭТУ «ЛЭТИ» и других вузов и научных центров.

## Квантовые процессоры

На квантовые вычисления возлагаются большие надежды: с их помощью удастся преодолеть вычислительные барьеры, связанные с завершением действия закона Мура. Управление вычислениями на уровне кубитов может открыть для ИИ новые возможности, связанные с выходом за пределы двоичной системы: снизить погрешность и повысить точность вычислений, улучшить обработку данных.

В 2020 году IBM запустила 27-кубитный квантовый ПК. К 2023-му компания планирует увеличить мощностью своих квантовых компьютеров в четыре раза<sup>51</sup>. Корпорация Google еще в 2019 году заявила о создании первого в мире 54-кубитного процессора. Компьютер на его основе выполнил специфические расчеты, на которые у обычного ПК ушли бы тысячи или даже десятки тысяч лет.

Разработчики компании QuantWare, целью которой является выпуск доступных квантовых процессоров и сопутствующих систем, считают, что после 2025 года<sup>51</sup>, а может быть и раньше, квантовые технологии станут распространяться намного активнее, чем сейчас, и использовать их можно будет в большом количестве отраслей.

<sup>50</sup> Chu J. Engineers design artificial synapse for "brain-on-a-chip" hardware / J. Chu // MIT [сайт], 2018. — URL: [news.mit.edu/2018/engineers-design-artificial-synapse-brain-on-a-chip-hardware-0122](https://news.mit.edu/2018/engineers-design-artificial-synapse-brain-on-a-chip-hardware-0122).

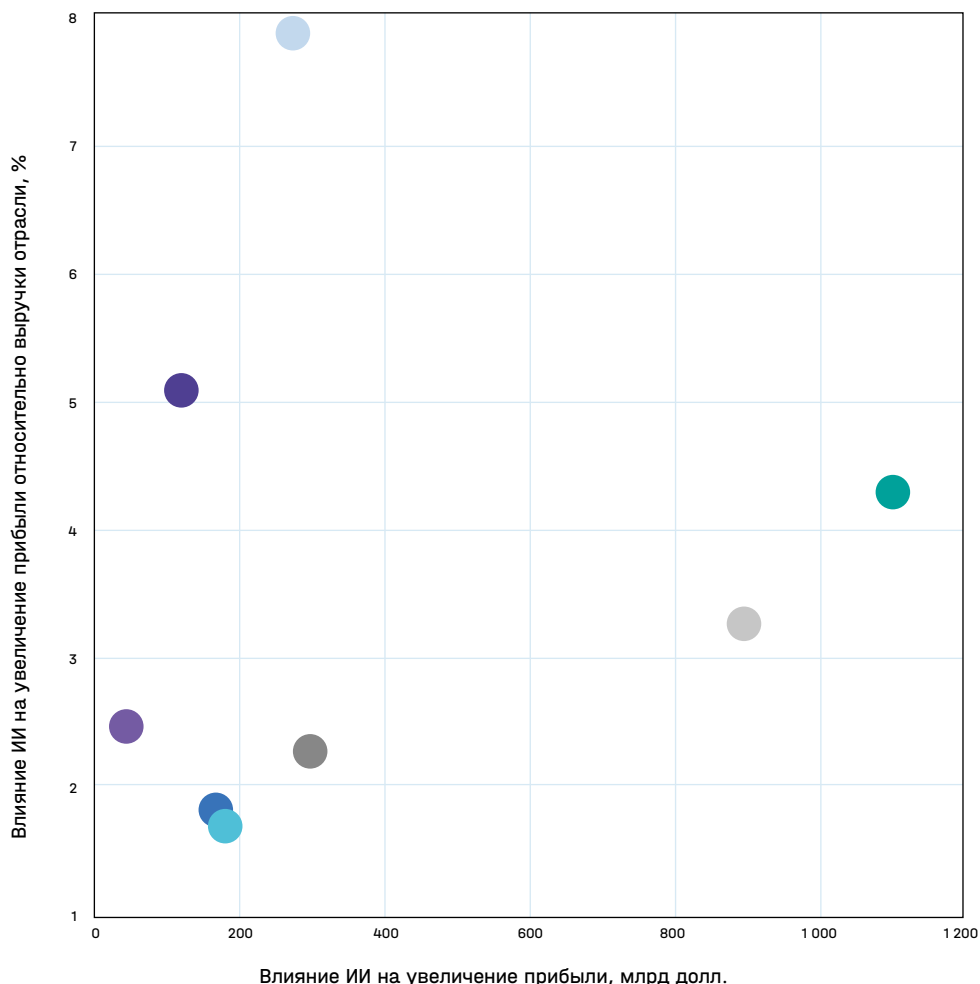
<sup>51</sup> Квантовые процессоры поступают в продажу: что они могут и для чего созданы? // Selectel [сайт], 2021. — URL: [nanonewsnet.ru/news/2021/kvantovyye-protsessory-postupayut-v-prodazhu-cto-oni-mogut-dlya-chemo-sozdany](https://nanonewsnet.ru/news/2021/kvantovyye-protsessory-postupayut-v-prodazhu-cto-oni-mogut-dlya-chemo-sozdany).

# 2.3 КАК ИИ ИЗМЕНИТ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

Как было отмечено выше, одна из ключевых сфер, где ожидается стремительное развитие ИИ, — промышленность. По оценкам McKinsey, искусственный интеллект может приносить около 3 трлн долларов ежегодно в восьми отраслях промышленности (рис. 10)<sup>52</sup>. В абсолютных значениях наибольшая прибыль ожидается в автомобилестроении и передовой электронике. Максимальный эффект по отношению к выручке прогнозируется в секторе высоких технологий.

<sup>52</sup> Notes from the AI frontier: Insights from hundreds of use cases / M. Chui, J. Manyika, M. Miremadi [et al.] // McKinsey [сайт], 2018. — URL: [mckinsey.com/featured-insights/artificial-intelligence/notes-from-the-ai-frontier-applications-and-value-of-deep-learning](https://mckinsey.com/featured-insights/artificial-intelligence/notes-from-the-ai-frontier-applications-and-value-of-deep-learning).

- Аэрокосмическая промышленность и оборона
- Фармацевтика и медицинские товары
- Нефтегазовая промышленность
- Химическая промышленность
- Высокие технологии
- Основные материалы\*
- Автомобилестроение
- Передовая электроника/полупроводники



**Рис. 10.**  
Влияние ИИ на различные отрасли промышленности

Источник: McKinsey

\* Основные материалы включают материалы для создания большинства товаров и конструкций (древесина, черные, цветные, драгоценные металлы, сталь и химикаты, строительные материалы).

IoT Analytics в своем отчете о рынке промышленного ИИ в 2020–2025 годах выделяет 33 вида применения ИИ на предприятиях, использующих Интернет вещей<sup>53</sup>. Для России наиболее значим вызов развития систем инженерного моделирования, принятия решений, а также производственных систем с использованием технологий ИИ. Развитие именно этих направлений могло бы стать приоритетом программ поддержки обратного проектирования в условиях долгосрочных санкционных ограничений и обрыва цепочек поставок.

<sup>53</sup> Rykov M. The Top 10 Industrial AI use cases / M. Rykov // IoT Analytics [сайт], 2019. — URL: [iot-analytics.com/the-top-10-industrial-ai-use-cases](https://iot-analytics.com/the-top-10-industrial-ai-use-cases).

## Инжиниринг, движимый ИИ (AI-driven engineering)

Пока применение ИИ сосредоточено в области умного производства (повышение эффективности и сокращение отходов), генеративного дизайна и автоматизированных сборочных роботов. Типичная автоматизация не решает вопросы индивидуальных заказов малых партий (Batch Size 1 или Order of One). На смену автоматизации должна прийти автономность, когда роботы не перепрограммируются человеком под производство нового продукта, а учатся самостоятельно собирать тот или иной вариант. Siemens Corporate Technology разработали такого робота, который может проанализировать модель продукта из САПР и найти соответствующее решение по сборке. LG CNS при помощи облачного сервиса умной фабрики собирают данные на протяжении всего производственного процесса и могут предсказать потенциальные дефекты в партии до того, как она будет произведена<sup>54</sup>.

Одним из больших вызовов здесь является использование ИИ в аддитивном производстве (AM). Основные проблемы AM — как головка 3D-принтера повлияет на микроструктуру получаемого материала и как контролировать процесс AM, чтобы получить детали с желаемыми характеристиками. Для решения используют суррогатную модель\*, которая выполняет функции<sup>54</sup> предварительной оптимизации, управления процессом на месте в реальном времени благодаря ИИ в датчиках, переносимости ИИ-модели между разными устройствами и/или видами сырья (гетерогенные материалы для AM).

В целом программируемые датчики и основанные на ИИ периферийные вычисления имеют первостепенное значение с точки зрения улучшения моделей ИИ для будущего цифрового и индивидуального производства<sup>54</sup>.

<sup>54</sup> Wunner F. How AI-driven generative design disrupts traditional value chains / F. Wunner, T. Krüger, B. Gierse // Accenture [сайт], 2020. — URL: [accenture.com/us-en/blogs/industry-digitization/how-ai-driven-generative-design-disrupts-traditional-value-chains](https://www.accenture.com/us-en/blogs/industry-digitization/how-ai-driven-generative-design-disrupts-traditional-value-chains).

<sup>55</sup> Из выступления Санджива Шривастава на семинаре "AI Driven Design Approach" // YouTube-канал Machine Learning Center at Georgia Tech [сайт], 2020. — URL: [youtube.com/watch?v=eitWsEM2ljk](https://www.youtube.com/watch?v=eitWsEM2ljk).

\* Суррогатная модель — упрощенная модель, которая симулирует поведение какого-либо объекта или системы.

\*\* Design Space Exploration (DSE) — процесс поиска проектного решения или решений, наилучшим образом соответствующих желаемым требованиям к дизайну, с помощью пространства предварительных проектных точек.

Перечислим исследовательские задачи для инжиниринга, движимого ИИ<sup>55</sup>:

- |   |  |    |   |
|---|--|----|---|
| 1 | Создание интерактивных DSE** в помощь специалистам, которые разрабатывают дизайн, но не обладают техническими компетенциями для разработки моделей.  | 6  | Параметрическое отображение в разных шкалах: возможность автоматически менять параметры сложных систем в разных масштабах с помощью привязки.   |
| 2 | Определение характеристик пространства проектных решений, когда можно быстро сделать вывод о том, какая часть проектного решения является хорошей / плохой / обладающей специфическими свойствами. | 7  | Автоматический сбор данных из технического задания (ТЗ): сложный процесс, который требует не только NLP, но и изучения взаимосвязи между разными частями самого ТЗ и функциями, описанными в документе.   |
| 3 | Автоматическая генерация ограничений / правил проектного решения: правила и ограничения гарантируют, что логические и физические аспекты решения соответствуют проектным требованиям.              | 8  | Понимание изменений во времени через систему управления версиями: поскольку комплексные проекты имеют много версий, возникает вопрос о способности анализировать сущности и отношения между объектами в проекте не только в статике, но и в динамике. |
| 4 | Автоматическая формулировка задач: задаются требования и информация о прошлом, а система должна автоматически сформулировать целевую функцию, учитывая свои ограничения.                           | 9  | Возможность переноса решений в другие проекты / платформы: обычно эта задача в теории проще, чем на практике.   |
| 5 | Автоматическая генерация суррогатной модели: автоматизация этого процесса избавит от необходимости знать специфические инструменты для ML.   | 10 | Проблема выбора алгоритмов: выбор алгоритма должен быть обоснован задачей.  |

## ИИ-центричное производство

ИИ-центричные системы включают в себя широкомасштабный мониторинг, распределенные системы управления, передовые системы связи и различные уровни искусственного интеллекта на периферии<sup>54</sup>.

Интернет вещей и искусственный интеллект — две отдельные инновации, которые в комбинации существенно влияют на разные отрасли. В то время как Интернет вещей (IoT) представляет собой систему сенсоров, ИИ служит мозгом, который контролирует эту систему. ИИ в датчиках Интернета вещей обнаруживает ошибки при сборе данных, самостоятельно определяет паттерны, выстраивает логические цепочки и делает выводы<sup>56</sup>.

Чтобы сам ИИ мог напрямую эффективно работать с данными от датчиков IoT, целесообразно использовать априорные знания предметной области, сосредоточенные в цифровом двойнике. Цифровой двойник — программный аналог физического устройства, моделирующий внутренние процессы, технические характеристики и поведение реального объекта в условиях воздействия помех и окружающей среды<sup>57</sup>. Он используется для планирования, моделирования спроса, контроля, оптимизации, повышения эффективности.

ИИ совместно с цифровыми двойниками фиксирует все, что происходит на производстве, и благодаря анализу данных помогает операторам принимать более эффективные операционные решения. Комбинация этих технологий может предсказать возможные поломки в оборудовании и определить их причину, предложить варианты сохранения работоспособности оборудования, сводя время простоя к минимуму<sup>58</sup>.

Использование ИИ в производстве не ограничивается изготовлением конкретной продукции. Искусственный интеллект может собирать и анализировать данные о предприятии в целом благодаря интеграции данных от отдельных подсистем<sup>59</sup>.

ИИ рассматривается в качестве важнейшего элемента, который обеспечит следующий шаг в эволюции производственных систем. Если в 2010-е годы шла цифровизация, в т. ч. распространение платформ Интернета вещей, то в 2020-е ИИ возьмет на себя роль основного инструмента развития. Именно он позволит осуществить переход от традиционных крупносерийных производств к гибким производственным системам, способным экономически эффективно производить мелкие серии продукции<sup>60</sup>.

ИИ станет базовым элементом в архитектуре современных кастомизированных производственных систем. Это предполагает наличие по меньшей мере четырех основных элементов: умных устройств, умных взаимосвязей, слоя ИИ, умных сервисов. Преимуществом таких систем станет улучшенная производственная эффективность, облегченное профилактическое обслуживание, развитые умные цепочки поставок<sup>60</sup>.

56 Перспективы IoT и AI: эксперты обсудили этические дилеммы // Connect-wit [сайт], 2020. — URL: connect-wit.ru/perspektivy-iot-i-ai-eksperty-obsudili-eticheskie-dilemmy.html.

57 Automation systems and integration — Digital twin framework for manufacturing — Part 1: Overview and general principles // ISO [сайт], 2021. — URL: iso.org/ru/standard/75066.html.

58 Beck R. Digital Twins and AI: Transforming Industrial Operations / R. Beck // AspenTech [сайт]. — URL: reliableplant.com/Read/31897/digital-twins-ai.

59 Prahladrao S. The Future of Manufacturing to be AI Driven / S. Prahladrao // ARC Advisory Group [сайт]. — URL: arcweb.com/industry-best-practices/future-manufacturing-be-ai-driven.

60 Artificial Intelligence-Driven Customized Manufacturing Factory: Key Technologies, Applications, and Challenges / J. Wan, X. Li, H. Dai [et al.] // arXiv [сайт], 2020. — URL: arxiv.org/pdf/2108.03383.pdf.

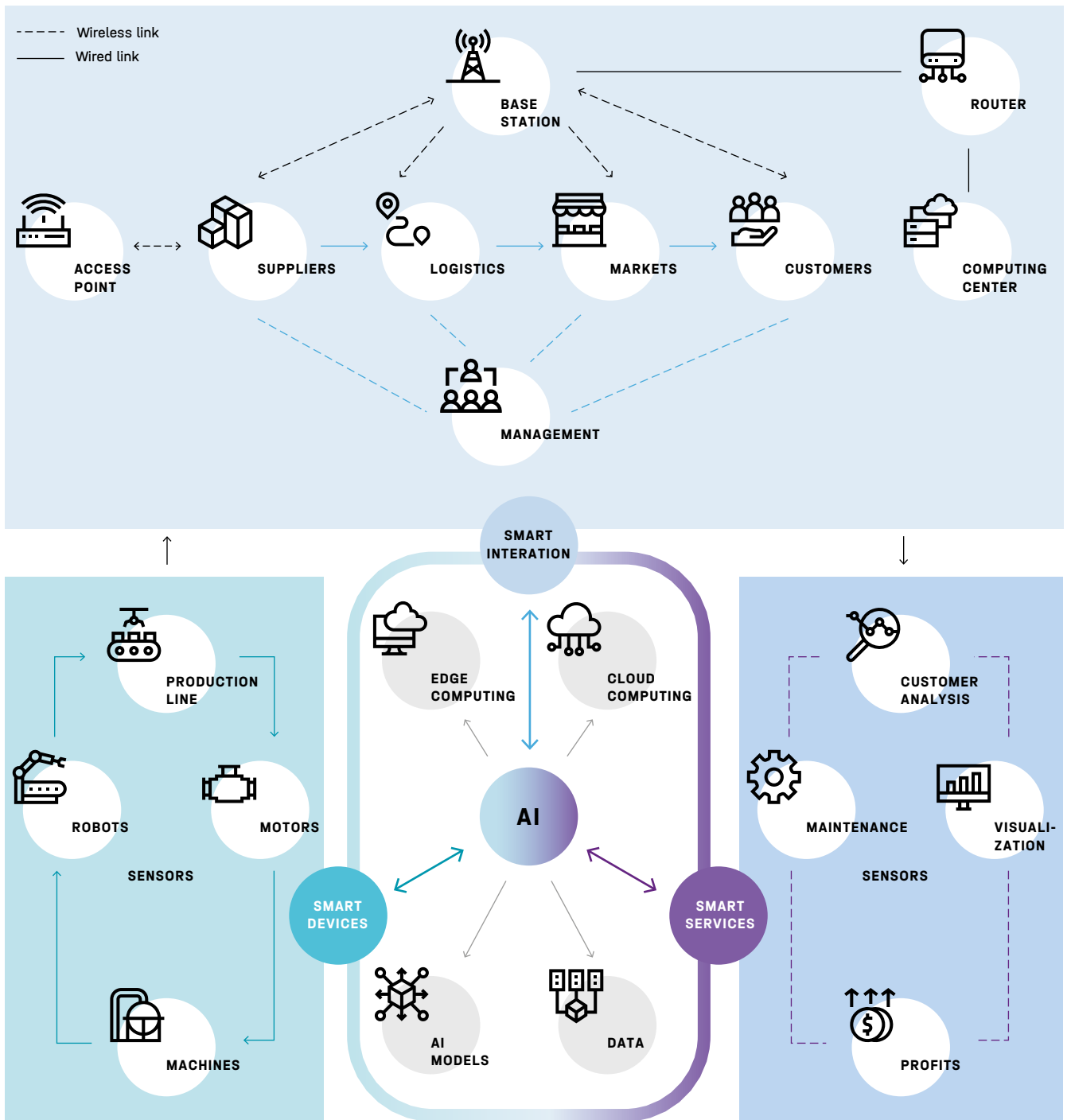


Рис. 11. Архитектура кастомизированного производства на основе ИИ

Источник: IEEE<sup>60</sup>

## Промышленная метавселенная

Ключевая сила метавселенной — способность обеспечивать целостный опыт погружения в виртуальную среду благодаря повсеместному и постоянному подключению. В промышленной метавселенной могут содержаться цифровые двойники реальных объектов, 3D-модели на основе данных Интернета вещей, интерактивные платформы для управления и анализа данных.

Варианты использования промышленной метавселенной<sup>61</sup>:

- повышение узнаваемости бренда с помощью виртуальных экскурсий по фабрике и интерактивных виртуальных мероприятий;
- виртуальные презентации продуктов и услуг;
- платежи с использованием технологий блокчейна, криптовалют и NFT;
- совместные исследования и разработки для проектирования, моделирования и тестирования продуктов и услуг;
- получение обратной связи от цифровых клиентов для улучшения качества обслуживания клиентов в реальном мире;
- индустриальная метавселенная как основа для достижения компаниями карбонового баланса.

В BMW создали виртуального 3D-двойника фабрики в Регенсбурге для совместной работы сотрудников со всего мира в реальном времени. Компания AV InBev разработала комплексную цифровую модель своих пивоварен и цепочек поставок. В настоящее время проводит эксперименты с «цифровыми людьми» для симуляции реагирования реальных сотрудников на новые рабочие процессы.

Адаптация новых технологий потребует от компаний не только приобретения нового оборудования, но и преодоления «цифрового ментального разрыва» — принятия влияния из виртуальной среды: участников экосистемы и потенциальных клиентов.

## Человеко-машинное взаимодействие (HRC)

Коллаборативные роботы (коботы) — один из обязательных компонентов Индустрии 5.0, в концепции которой лежит совместная работа человека и роботов. Коботы не могут причинить вред человеку или окружающим предметам благодаря многочисленным сенсорам, которые отслеживают любое движение вокруг<sup>62</sup>. Оснащение предприятия коботами дает существенное конкурентное преимущество владельцам бизнеса, в т. ч. работающим с «мелкой серией» и «под заказ». Использование цифровых двойников в человеко-машинных системах упростит проектирование, интеграцию, операционную деятельность и реконфигурацию системы на протяжении всего жизненного цикла<sup>63</sup>.

Автомобилестроители Dürr Systems AG и Ford используют коллаборативных роботов LBR iiwa от компании KUKA на трудоемком и травмоопасном этапе установки фар и системы помощи водителю. Коботы смогли к тому же повысить качество и скорость сборки, что уменьшило стоимость автомобиля<sup>64</sup>.

## ИИ-методы в промышленности

Традиционные аналитические методы, такие как регрессионный анализ, кластеризация, ансамбль деревьев решений и другие формы логических выводов, активно используются в различных отраслях (рис. 12). ИИ обладает большим потенциалом применения в разных секторах, однако большого распространения пока не получил — отчасти из-за относительной незрелости технологий и организационных проблем, связанных с развертыванием этих технологий<sup>52</sup>.

61 Burian J. Is the 'Industrial Metaverse' the Next Big Thing? / J. Burian // Industry Week [сайт], 2022. — URL: industryweek.com/technology-and-iiot/emerging-technologies/article/21234184/is-the-industrial-metaverse-the-next-big-thing.

62 Bi Z. M. Safety assurance mechanisms of collaborative robotic systems in manufacturing / Z. M. Bi, C. Luo, Z. Miao [et al.] // ScienceDirect [сайт], 2021. — URL: sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0736584520302337.

63 Malik A. A. Digital twins for collaborative robots: A case study in human-robot interaction / A. A. Malik, A. Brem // ScienceDirect [сайт], 2021. — URL: sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0736584520303021.

64 Human-robot collaboration: 3 Case Studies // Wevolver [сайт], 2020. — URL: wevolver.com/article/humanrobot.collaboration.3.case.studies.









ОТРАСЛЬ	Обучение с подкреплением	Нейронная сеть с прямой связью	Рекуррентная нейронная сеть	Свёрточная нейронная сеть	Генеративно-состязательная сеть	Ансамбль деревьев решений	Снижение размерности	Классификаторы	Кластеризация	Регрессионный анализ	Статистический вывод	Метод Монте-Карло	Цепь Маркова	Другие методы оптимизации
 Аэрокосмическая промышленность и оборона	2	2	2	1	0	3	1	2	2	4	3	2	0	2
 Фармацевтика и медицинские товары	1	3	3	1	1	4	1	4	4	5	3	2	0	1
 Нефтегазовая промышленность	2	3	1	2	0	4	1	2	1	4	3	2	1	1
 Химическая промышленность	1	2	2	1	0	3	1	2	2	3	3	2	0	1
 Высокие технологии	2	3	3	1	0	4	1	4	2	4	1	0	0	1
 Основные материалы	2	3	1	2	0	4	0	3	1	4	4	2	0	2
 Автомобилестроение	2	4	2	3	0	5	1	4	3	5	3	1	1	1
 Передовая электроника/полупроводники	2	3	2	2	0	5	1	4	3	6	3	1	0	2

Рис. 12. Актуальность технологий ИИ для разных областей промышленности (где 1 — низкая актуальность, 6 — высокая актуальность)

Источник: McKinsey

## ИИ изменит космическую отрасль

Следующий этап освоения космоса связан с использованием технологий Индустрии 5.0. Исследователи выделяют две технологические основы для развития Индустрии 5.0<sup>65</sup>:

1. человеко-машинное взаимодействие: интеллектуальная автоматизация, умные фабрики;
2. биоэкономика: био- и нанотехнологии, биологизация.

Технологии концепции Индустрии 5.0<sup>66</sup>:

- человеко-машинное взаимодействие откроет возможность комбинировать сильные стороны людей и роботов во время пилотируемых миссий, а также осуществлять технологию телеприсутствия человека в космосе (робот-аватар);
- биотехнологии и умные материалы: самовосстанавливающиеся материалы для обшивки космических кораблей и скафандров, легкие материалы, позволяющие доставлять более тяжелые грузы в далекий космос, умные материалы для температурного контроля;
- цифровые двойники и симуляции для создания сотен (или тысяч) возможных сценариев космических миссий, учитывающих множество факторов, которые влияют на процесс осуществления деятельности в космосе;
- искусственный интеллект, способный к принятию самостоятельных решений и адаптируемый к новым условиям, повысит эффективность автоматических миссий (автономность планетоходов для работы под землей или в пещерах, координацию спутниковых группировок между собой, предварительную обработку данных);
- большие данные и мягкие вычисления позволят предсказывать приближение космического мусора и других объектов к космическому аппарату, что поможет избежать эффекта Кесслера\* при увеличении количества объектов на орбите<sup>67</sup>.

\* Синдром (эффект) Кесслера — гипотетическое развитие событий на околоземной орбите, когда космический мусор, появившийся в результате многочисленных запусков искусственных спутников, приводит к полной непригодности ближнего космоса для практического использования (источник: Kessler D. J. Collision Frequency of Artificial Satellites: The Creation of a Debris Belt / D. J. Kessler, B. G. Cour-Palais // Journal of Geophysical Research. — 1978. — № 83–A6. — С. 2637–2646).

65 Demir K. A. Industry 5.0 and Human-Robot Co-working / K. A. Demir, G. Döven, B. Sezen // ScienceDirect [сайт], 2019. — URL: sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050919312748.

66 Müller J. Enabling Technologies for Industry 5.0. / J. Müller // Eurocomission [сайт], 2020. — URL: op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/8e5de100-2a1c-11eb-9d7e-01aa75ed71a1/language-en/format-PDF/source-248960047.

67 Satellite Orbit Prediction Using Big Data and Soft Computing Techniques to Avoid Space Collisions / C. Puente, M. A. Sáenz-Nuño, A. Villa-Monte, J. A. Olivas // MDPI [сайт], 2021. — URL: mdpi.com/2227-7390/9/17/2040/htm.



# ЧАСТЬ 3

РОССИИ НЕОБХОДИМ РЕИНЖИНИРИНГ.  
РЕИНЖИНИРИНГУ — ИСКУССТВЕННЫЙ  
ИНТЕЛЛЕКТ

В связи с сокращением импорта аппаратного обеспечения для искусственного интеллекта возникает угроза разрыва производственных цепочек. Решением проблемы станет запуск программ реинжиниринга (обратного проектирования) аппаратного и программного обеспечения.

Обратный инжиниринг — исследование некоторого устройства или программы, а также документации на него, для того чтобы понять принцип его работы и (чаще всего) воспроизвести устройство, программу или иной объект с аналогичными функциями, но без копирования как такового<sup>68</sup>.

Развитие технологий ИИ открыло новые возможности для реинжиниринга. Новости о применении систем обратного проектирования стали регулярной частью информационного фона в ИИ. В июне 2020 года произошло яркое событие: компания DeerMind представила систему ИИ с функцией реинжиниринга программных продуктов. Имея доступ только к входам и выходам выбранного приложения, система, получившая название IReEn, может многократно улучшать копию целевого приложения, пока она не станет функционально эквивалентной оригиналу<sup>69</sup>. Подобные примеры говорят о том, что благодаря искусственному интеллекту на рынке высоких технологий возникли новые возможности для игроков, имеющих ограничения на использование оригинальных продуктов, и тех, кому требуется восстановить решения, описание которых частично утеряно.

В то же время технологии реинжиниринга создают новые риски для рынка и общества в целом. Потребуется не только пересмотреть законодательство в области охраны интеллектуального права: развитие таких решений может полностью изменить установки и общественный взгляд на копирование как явление<sup>70</sup>.

Другое полезное качество ИИ в задачах реинжиниринга материальных объектов — возможность существенно упростить требования к оборудованию, необходимому для полного определения их характеристик. Это достигается путем создания неполных цифровых двойников объекта на основе базовых фактов, которые легко измерить с помощью имеющегося оборудования (в частности, массогабаритных характеристик). А остальные элементы двойника (например, в форме уравнений с конкретными коэффициентами, отражающими нетривиальные свойства изделия) восстанавливаются посредством технологий автоматического машинного обучения на основе косвенных экспериментальных данных. При этом в ряде случаев могут быть восстановлены не только скрытые свойства объекта, но и элементы технологии его создания.

## Аппаратное обеспечение

Санкции особенно затронули поставку узкоспециализированных чипов, поэтому реинжиниринг технологий создания полупроводниковой продукции становится одним из важнейших условий развития российского рынка ИИ. Отсутствие решений здесь может привести к тому, что прогнозы очередной «зимы ИИ» сбудутся прежде всего для отечественного, а не глобального рынка. Задачи реинжиниринга охватывают не только сферы проектирования и производства микросхем, но и область создания их ключевого звена — полупроводников. Искусственный интеллект сможет стать полезной технологией для реинжиниринга и импортозамещения, только когда сам будет обеспечен отечественной полупроводниковой продукцией.

В нашей стране есть свои проекты универсальных (CPU, DSP, GPU) и узкоспециализированных (FPGA, ASIC) микропроцессоров, а также тензорных процессоров. Российские компании разрабатывают их дизайн, однако производить эти микропроцессоры в РФ затруднительно из-за отсутствия оборудования, в частности литографов.

Россия самостоятельно может выпускать процессоры по нормам не менее 65 нм (на заводе «Микрон»), которые считались передовыми в 2004 году<sup>71</sup>. Но для эффективных ИИ-систем требуются решения на микропроцессорах размерностью 16 нм и ниже. Компания TSMC уже может делать чипы по топологии 5 нм<sup>71</sup> и планирует достигнуть 3 нм<sup>72</sup>.

68 Samuelson P., Scotchmer S. The Law and Economics of Reverse Engineering / P. Samuelson, S. Scotchmer // The Yale Law Journal. — 2002. — № 111–7. — С. 1575–1663.

69 Wiggers K. Researchers propose AI system that reverse-engineers black box apps / K. Wiggers // VentureBeat [сайт], 2020. — URL: [venturebeat.com/2020/06/23/researchers-propose-ai-that-reverse-engineers-black-box-apps](https://venturebeat.com/2020/06/23/researchers-propose-ai-that-reverse-engineers-black-box-apps).

70 Шенкар О. Имитаторы. Как компании заимствуют и перерабатывают чужие идеи / О. Шенкар. — Москва: Альбина Паблишер, 2011.

71 Степанов Д. В России за 5,7 миллиарда создадут оборудование для печати процессоров по технологии 17-летней давности / Д. Степанов // CNews [сайт], 2021. — URL: [cnews.ru/news/top/2021-11-22\\_v\\_rossii\\_za\\_57\\_milliarda\\_rublej](https://cnews.ru/news/top/2021-11-22_v_rossii_za_57_milliarda_rublej).

72 Механик А. Литография без маски / А. Механик // Стимул [сайт], 2019. — URL: [stimul.online/articles/innovatsii/litografiya-bez-maski](https://stimul.online/articles/innovatsii/litografiya-bez-maski).

Сегодня оборудование для производства процессоров по нормам 7 нм и меньше создает только одна компания — нидерландская ASML. Для достижения разрешения до 10 нм используется технология (EUV-литография) гораздо более сложная и дорогая, чем для чипов по топологии выше 10 нм<sup>72</sup>.

В Российской Федерации есть заделы по разработке оптической системы и ее элементов для фотолитографических установок на длине волны 13,5 нм (ИФМ РАН), источника излучения (ИСАН РАН), сверхточных систем позиционирования для фотолитографов (лаборатория «Амфора»). Однако технология EUV-литографии требует также сверхмощных лазеров и чрезвычайно ровных зеркал, что делает ее очень дорогой. Производство EUV-сканеров для фотолитографии от ASML окупается лишь при выпуске чипов в больших количествах, реализовать которые можно только на глобальном рынке.

Но существует и другой путь — например, безмасочная литография. Для создания установки требуются усилия многих коллективов: создателей МОЭМС (микрооптические электромеханические системы), разработчиков источника излучения и координатных столов, производителей управляющей электроники, в т. ч. специализированного контроллера. В России есть такие проекты. Так, ИФМ РАН выступает координатором проекта в области безмасочной литографии. Согласно открытым данным, создаваемый литограф будет в 10 раз дешевле, чем EUV-литограф, а опытный образец может быть получен через пять-шесть лет<sup>72</sup>.

В любом случае создание своей литографической промышленности — сложная и длительная задача. Что же касается краткосрочной перспективы аппаратного обеспечения, перед отечественной индустрией ИИ встают большие вызовы и ограничения дальнейшего развития.

## Программное обеспечение

Поскольку Python, Lisp, R, Prolog и C++ — одни из самых популярных языков программирования ИИ — не принадлежат определенным компаниям, нет риска прекращения их поддержки в России, чего нельзя сказать о Java и MATLAB, которые являются собственностью американских компаний.

Большую проблему представляют фреймворки, ведь наиболее популярные из них (TensorFlow, Keras, PyTorch и Caffe2) принадлежат Google и Meta Platforms. В России есть собственные «Платформа-ГНС» и PuzzleLib, а также облачная платформа IACPaaS, платформы для создания моделей ИИ SMILE и DataMall. Тем не менее, перестройка существующих проектов под российские фреймворки потребует времени и усилий<sup>73</sup>.

<sup>72</sup> Из выступления О. А. Тельмина (НИИМЭ) на семинаре Ассоциации «ИИ в промышленности» // YouTube [сайт], 2022. — URL: [youtu.be/26vqoN-it7g?t=8842](https://youtu.be/26vqoN-it7g?t=8842).

# ЧАСТЬ 4

ЛИДЕРСКИЕ АМБИЦИИ САНКТ-  
ПЕТЕРБУРГА НА РЫНКЕ ИИ

Санкт-Петербург — один из крупнейших центров разработки и применения технологий искусственного интеллекта в Российской Федерации. Последние пять лет в Петербурге отмечается усиление публикационной активности в сфере ИИ и связанных с ним технологий. Здесь есть собственный четко выраженный компетентностный профиль (свои стратегические компетенции) в области ИИ, сформирована уникальная экосистема, включающая ведущие вузы и научные организации города, партнеров из реального сектора и органов городской власти.

Современная повестка ИИ в России и в частности в Санкт-Петербурге определяется сильными командами и центрами, которые будут развивать и совершенствовать существующие разработки и направления<sup>41</sup>.

Несмотря на то, что в Москве высокая централизация финансовых и управленческих потоков, а число вузов, занимающихся исследованиями ИИ в Санкт-Петербурге, невелико, они весьма конкурентоспособны.

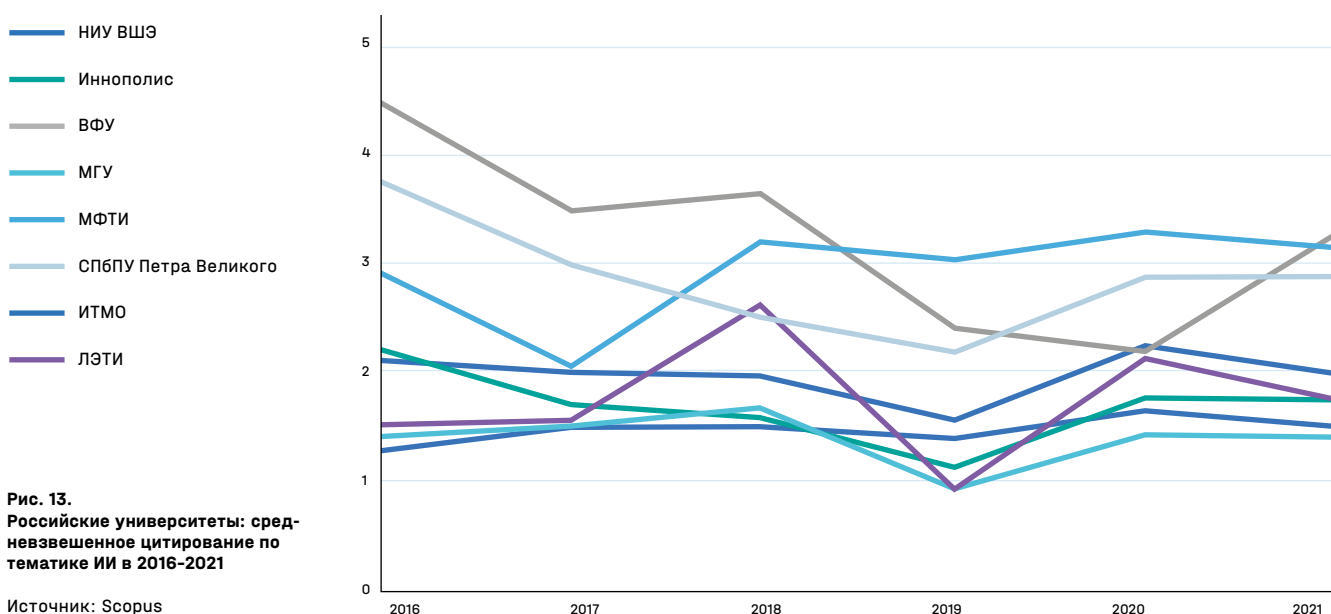


Рис. 13. Российские университеты: средневзвешенное цитирование по тематике ИИ в 2016-2021

Источник: Scopus

В Санкт-Петербурге существует сильная математическая школа, что также отражается в количестве публикаций по ИИ в разделе «Математические науки» (рис. 14). В целом в России, по базе данных Scopus, публикации по данной тематике в основном относятся к математическим (37,8 %), компьютерным (33,8 %) и инженерным наукам (10,4 %).

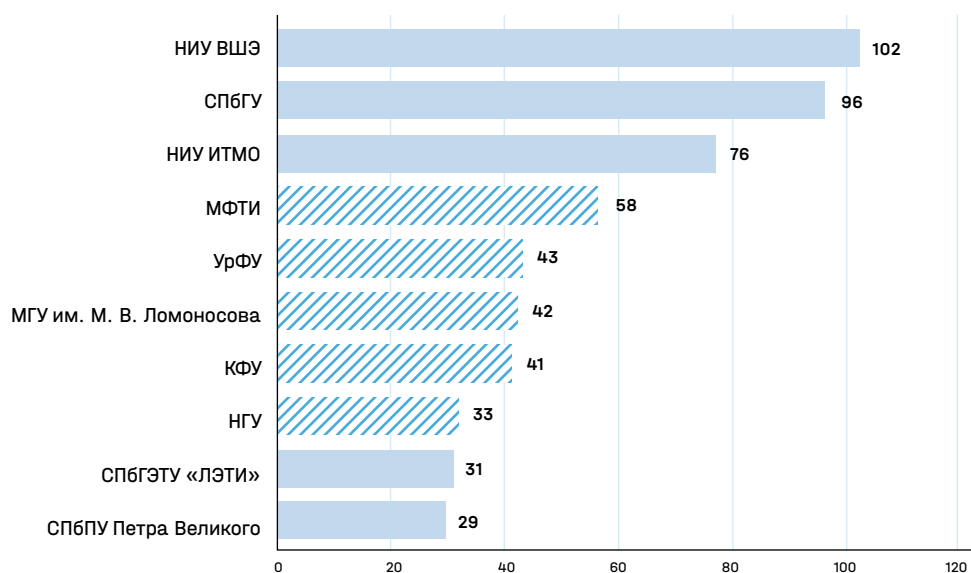


Рис. 14. Топ-10 университетов России по тематике ИИ в разделе «Математические науки» с 2015 по 2022 (1186 шт. по базе Scopus)

Источник: Scopus

В Санкт-Петербурге есть небольшая группа исследователей ИИ, развивающих свои научные школы. Это одно из конкурентных преимуществ города, в инженерных вузах которого трудятся генераторы новых идей. Среди научных организаций Петербурга в сфере ИИ можно выделить НИУ ВШЭ, СПбГУ, Университет ИТМО, СПбГЭТУ «ЛЭТИ» и СПбПУ Петра Великого.

По рейтингу академических и исследовательских учреждений SCImago Institutions Rankings, определяющему эффективность исследований университетов, результаты инноваций и влияние на общество, измеряемое их видимостью в Интернете, в топе лидеров — СПбГУ, СПбПУ («Политех»), НИУ ВШЭ и НИУ ИТМО (рис. 15). Эти же вузы лидируют среди университетов, специализирующихся на «компьютерных науках» (рис. 16).

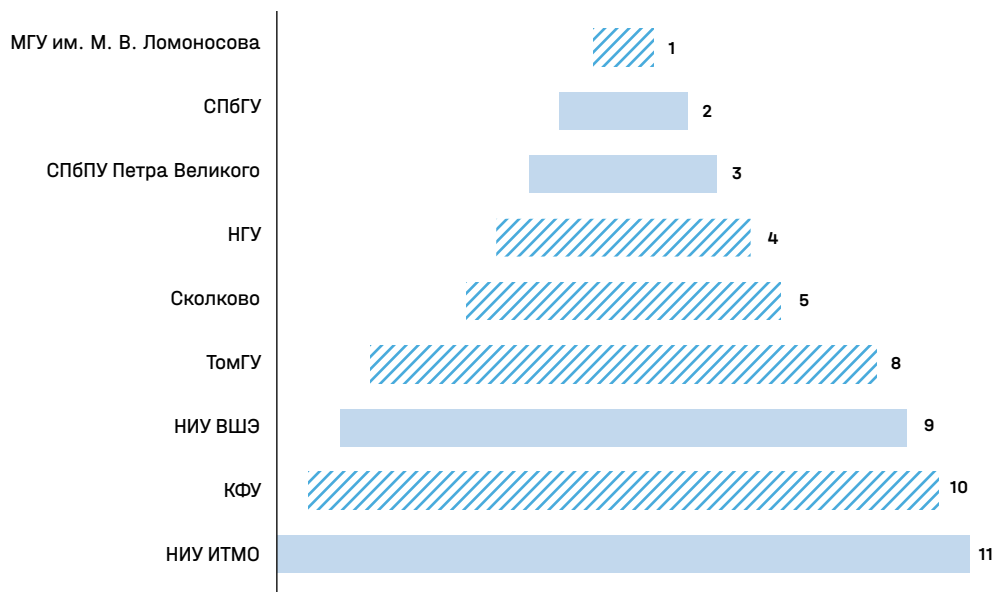


Рис. 15.  
Ранжирование университетов среди научных организаций России в разделе «Математические науки», 2021

Источник: SCImago

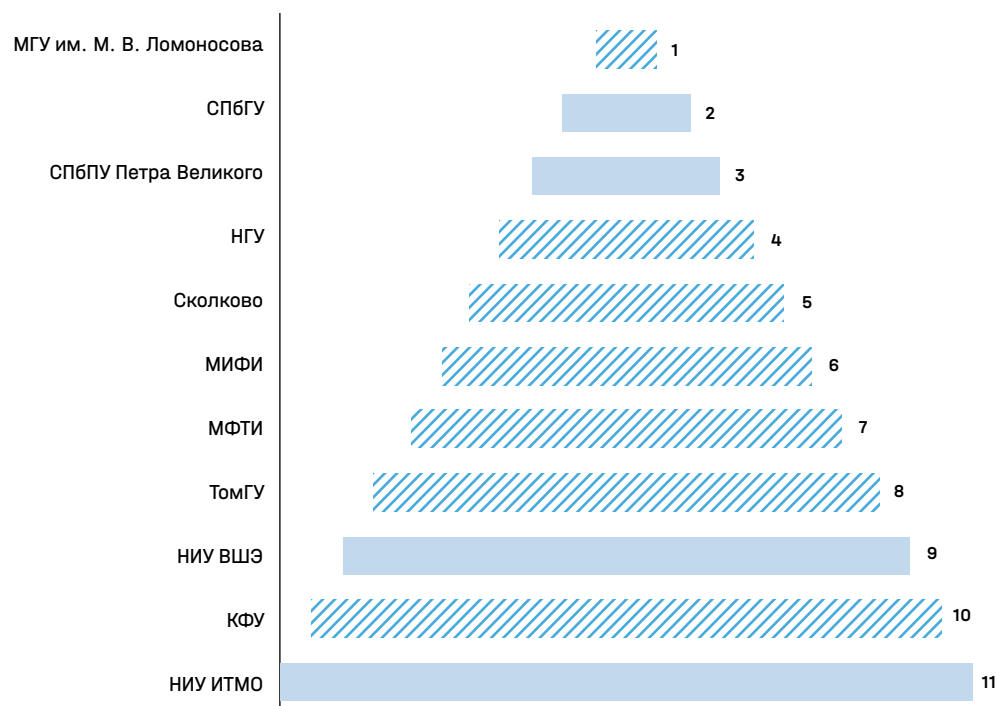
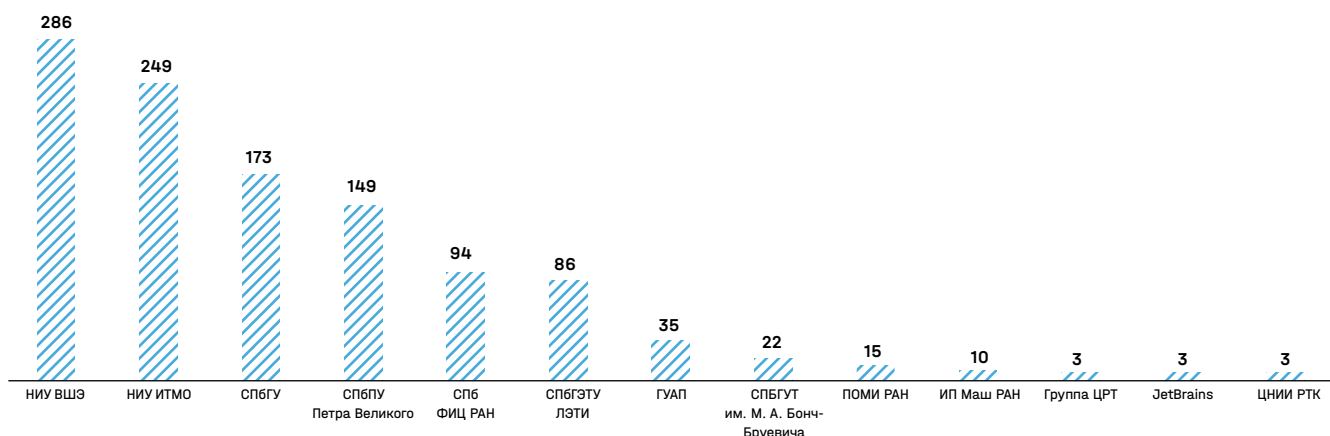


Рис. 16.  
Ранжирование университетов (топ-10) среди научных организаций России в разделе «Компьютерные науки», 2021

Источник: SCImago

Публикационная активность в сфере искусственного интеллекта в Санкт-Петербурге отмечается среди ограниченного числа исследовательских организаций. Первые места занимают университеты.



**Рис. 17.**  
Количество публикаций по теме ИИ среди исследовательских организаций Санкт-Петербурга за 2015-2022 (Scopus)

Источник: Scopus

По данным карты ИИ, в Петербурге работают 34 компании в сфере ИИ, что в пять раз меньше, чем в столице (187 компаний). Из крупных ИТ-компаний в Санкт-Петербурге есть Яндекс (в качестве подразделения «Яндекс.Облако», направления по беспилотникам Yandex Self-Driving Group, «Яндекс.Толока»), а также JetBrains и ВКонтакте.

В городе успешно функционируют два научных центра национального уровня в области искусственного интеллекта, созданных при Университете ИТМО и преследующих комплементарные цели. Совокупно они формируют самый крупный городской хаб человеческого капитала в области исследований и разработок систем прикладного ИИ, объединяющий более 300 специалистов.

Национальный центр когнитивных разработок (Центр компетенций НТИ) создан в 2018 году по сквозной технологии «Машинное обучение и когнитивные технологии». Он ориентирован на развитие технологий усиленного интеллекта в части создания отраслевых систем поддержки принятия решений в различных предметных областях и взаимодействует с промышленными партнерами на открытом рынке (включая промышленность, энергетику, ритейл, финансовый сектор, здравоохранение и др.).

Напротив, исследовательский центр «Сильный ИИ в промышленности», открывшийся в 2021 году в рамках федерального проекта «Искусственный интеллект», строит свою деятельность на фронтах технологий ИИ, обеспечивающих воспроизведение творческой активности отраслевых специалистов (конструкторов, технологов и пр.). Коллаборацию с промышленными партнерами он реализует посредством института единого заказчика — Ассоциации «Искусственный интеллект в промышленности», которая управляет заказами отдельных партнеров и привлекаемыми к ним ресурсами.

Совокупно оба центра формируют устойчивую модель, обеспечивающую полный цикл создания и внедрения перспективных технологий прикладного ИИ в различных задачах (не ограниченных промышленностью и существующими партнерами). При этом открытая структура организации и управления центрами позволяет на легитимной основе вовлекать команды исследователей и разработчиков из других университетов и научных организаций (как Петербурга, так и всей России) на коллаборативной основе. Это дает возможность дальнейшего расширения присутствия Санкт-Петербурга на рынке технологий ИИ и повышения профессиональной узнаваемости Северной столицы.

При поддержке Ассоциации «Искусственный интеллект в промышленности» организовано финансирование научно-исследовательских проектов, ведется наставничество и поддержка шести молодежных научных лабораторий, созданных на средства гранта Минобрнауки России, проводятся образовательные программы «Школа ключевых исследователей в ИИ» (для студентов и аспирантов).

рантов) и «Школа заказчика в ИИ» (для компаний и госорганов). Кроме того, реализуется оригинальный конкурс поисковых исследований BlueSkyResearch, поддерживающий поисковые исследования на ранних стадиях формирования идеи (финансируется Фондом поддержки инноваций и молодежных инициатив Санкт-Петербурга). Основная задача конкурса — тестирование междисциплинарного инновационного механизма выявления перспективных научных тем во фронтальных, высокорисковых направлениях с последующим созданием решений, основанных на нейронных сетях и/или машинном обучении<sup>74</sup>.

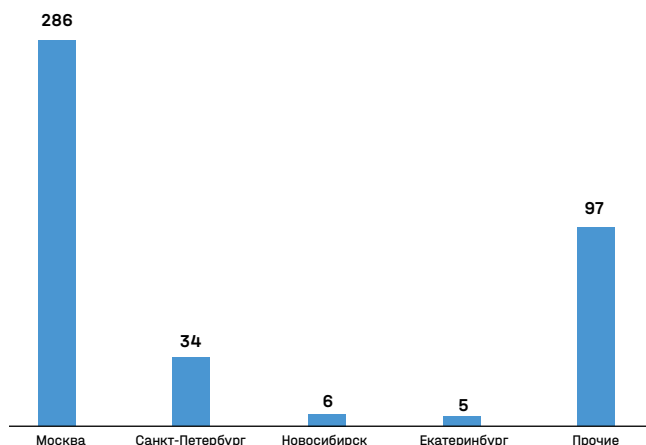
В области прикладного искусственного интеллекта город имеет компетенции в решениях для медицины и нефтегазового сектора. Во многом это определяется наличием крупных заказчиков (в первую очередь «Газпром нефть»). Несмотря на то, что разработчики ИИ и заказчики локализуются в Санкт-Петербурге, сбор данных и практическое применение созданных моделей зачастую происходит в других регионах РФ.

Большинство ключевых исследователей искусственного интеллекта в Санкт-Петербурге уверено: для того, чтобы город начал формироваться как самостоятельный исследовательский центр в области искусственного интеллекта, необходимо обеспечить ряд условий.

1. Создание площадки для кооперации между органами городской власти, университетами, исследовательскими центрами и бизнесом в виде Центра экспертизы в ИИ, который сможет реализовать практические проекты федерального масштаба.
2. Развитие и унификация (в части лучших практик) направлений подготовки по искусственному интеллекту в университетах. Хотя многие университеты открывали новые программы подготовки по ИИ в течение последних лет, до сих пор существует проблема привлечения и переподготовки преподавателей, без чего невозможно масштабировать подготовку специалистов по этим направлениям.
3. Публичное позиционирование Санкт-Петербурга как мегарегионального хаба в области искусственного интеллекта, в т. ч. за счет концентрации усилий на нишевых задачах для ИИ (прежде всего инфраструктурных), а также путем создания новых рабочих мест.

74 Конкурс Blue Sky Research Искусственный интеллект в науке // Blue Sky Research [сайт], 2022. — URL: blueskyresearch.ru.

География российского рынка AI и ML на начало 2019 (общее число компаний — 329)



Доля «цифровых» вакансий в России, в т. ч. в Петербурге, 2010 и 2019, % от общего числа вакансий на рынке

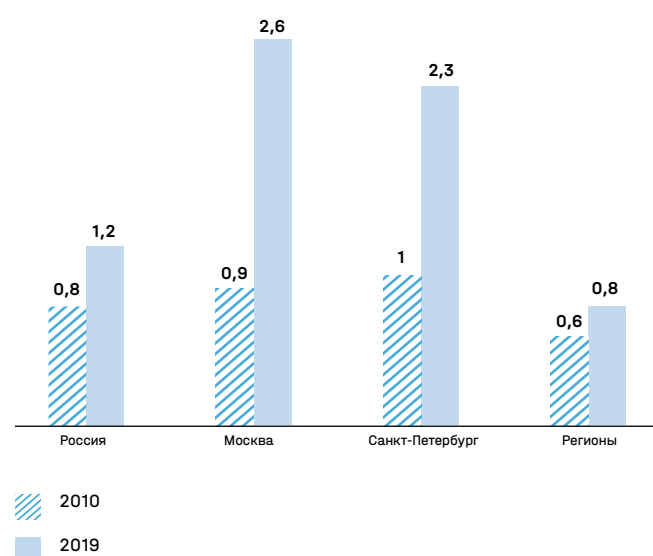


Рис. 18. Потенциал Санкт-Петербурга на российском рынке ИИ

Источник: Фонд ЦСР «Северо-Запад» по данным OpentalksAI и HeadHunter

Именно эти механизмы будут развиваться при реализации программы деятельности научно-образовательного центра мирового уровня «Искусственный интеллект в промышленности» в Санкт-Петербурге, вовлекая в свою орбиту всё новые организации со всей страны.

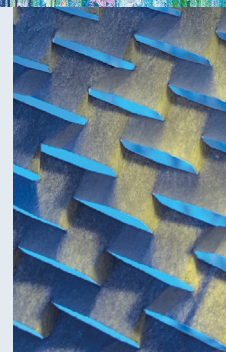


## Заключение

В условиях нестабильной геополитической обстановки приемлемой стратегией для научного сектора индустрии ИИ России станет наращивание и поддержка сотрудничества с нейтрально настроенными площадками и высокорейтинговыми журналами, разработка независимой внутренней системы оценки исследований в области ИИ силами работающих в отрасли экспертов, развитие взаимодействия между научно-исследовательскими коллективами страны, фокусировка на имеющих общественное значение задачах и сверхзадачах. Крайне важно, чтобы инвестиции в искусственный интеллект в ближайшие годы обладали достаточным объемом и концентрировались на технологиях, обеспечивающих прорыв в производстве, научных и конструкторских разработках и потребительских сервисах в России.



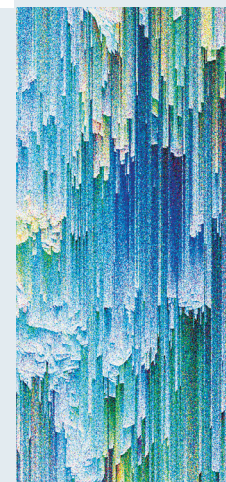
Именно промышленность способна стать основным после государства инвестором в индустрию ИИ в РФ. Нефтегазовый сектор претендует на статус наиболее активной отрасли, заинтересованной в развитии рынка технологий ИИ, наряду с металлургией и химической промышленностью.



В связи с сокращением импорта аппаратного обеспечения для искусственного интеллекта необходимо запустить программы реинжиниринга аппаратного и программного обеспечения. Технологии ИИ открывают новые возможности для реинжиниринга, ускоряя и упрощая процесс обратного проектирования устройств.



Санкт-Петербург является одним из крупнейших центров разработки и применения искусственного интеллекта в России благодаря наличию конкурентоспособных технических вузов, научных организаций и компаний, совершенствующих технологии ИИ. В интересах дальнейшего развития необходимо создать площадку для кооперации между органами городской власти, университетами, исследовательскими коллективами и бизнесом в виде Центра экспертизы по искусственному интеллекту, модернизировать и унифицировать направления подготовки в области ИИ в университетах, сконцентрировать усилия на нишевых задачах для искусственного интеллекта.



# Библиография

1. S.1260 — United States Innovation and Competition Act of 2021 // Congress.gov [сайт], 2021. — URL: congress.gov/bill/117th-congress/senate-bill/1260 (дата обращения: 18.04.2022).
2. GitHub начал блокировать аккаунты российских компаний и разработчиков // БФМ.РУ [сайт], 2022. — URL: bfm.ru/news/497819 (дата обращения: 18.04.2022).
3. Nicholson C. EU blocks new Russian research deals and payments / C. Nicholson // ResearchProfessional News [сайт], 2022. — URL: researchprofessionalnews.com/rr-news-europe-politics-2022-3-eu-blocks-new-russia-research-deals-and-payments/ (дата обращения: 05.04.2022).
4. Грибов М. Импортозамещение в IT: Цифровая трансформация на российском ПО / М. Грибов // RB.RU [сайт], 2022. — URL: rb.ru/opinion/importozameshenie-v-it/ (дата обращения: 05.04.2022).
5. Айвазян Д. Будущее инженерии: что такое генеративный дизайн и как его использовать / Д. Айвазян // RB.RU [сайт], 2022. — URL: rb.ru/opinion/generativnyj-dizajn/ (дата обращения: 05.04.2022).
6. Goasduff L. The 4 Trends That Prevail on the Gartner Hype Cycle for AI, 2021 / L. Goasduff // Gartner [сайт], 2021. — URL: gartner.com/en/articles/the-4-trends-that-prevail-on-the-gartner-hype-cycle-for-ai-2021 (дата обращения: 05.04.2022).
7. Multi-Publisher Statement 31 March 2022 // Mailchimp, 2022. — URL: mailchi.mp/4851e2a74119/joint-publisher-statement (дата обращения: 18.04.2022).
8. Российская Федерация. Постановление. О некоторых вопросах применения требований и целевых значений показателей, связанных с публикационной активностью : Постановление № 414: [принято Правительством Российской Федерации 19 марта 2022 г.]. — URL: ips.pravo.gov.ru:8080/default.aspx?pn=0001202203210040 (дата обращения: 05.04.2022).
9. 6 исследовательских центров по ИИ получат федеральные гранты до 1 млрд рублей // Аналитический центр при Правительстве Российской Федерации [сайт], 2021. — URL: ac.gov.ru/news/page/6-issledovateljskih-centrov-po-ii-polucata-federalnye-granty-do-1-mldr-rublej-27059 (дата обращения: 05.04.2022).
10. Total VC investments in AI by country and industry // OECD.AI [сайт], 2022. — URL: oecd.ai/en/data?selectedArea=investments-in-ai&selectedVisualization=total-vc-investments-in-ai-by-country-and-industry (дата обращения: 05.04.2022).
11. Artificial Intelligence Software Revenue to Reach \$59.8 Billion Worldwide by 2025 // Businesswire [сайт], 2017. — URL: businesswire.com/news/home/20170502006394/en/Artificial-Intelligence-Software-Revenue-to-Rreach-59.8-Billion-Worldwide-by-2025-According-to-Tractica (дата обращения: 05.04.2022).
12. Gartner Survey Reveals 66 % of Organizations Increased or Did Not Change AI Investments Since the Onset of COVID-19 // Gartner [сайт], 2020. — URL: gartner.com/en/newsroom/press-releases/2020-10-01-gartner-survey-reveals-66-percent-of-orgnizations-increased-or-did-not-change-ai-investments-since-the-onset-of-covid-19#:~:text=October%201%2C%202020,Gartner%20Survey%20Reveals%2066%25%20of%20Organizations%20Increased%20or%20Did%20Not,the%20Onset%20of%20COVID%2D19 (дата обращения: 05.04.2022).
13. Mitchell M. Why AI is Harder Than We Think / M. Mitchell // arXiv [сайт], 2021. — URL: arxiv.org/pdf/2104.12871.pdf (дата обращения: 05.04.2022).
14. 10 million self-driving cars will be on the road by 2020 // BI Intelligence [сайт], 2016. — URL: businessinsider.com/report-10-million-self-driving-cars-will-be-on-the-road-by-2020-2015-5-6 (дата обращения: 05.04.2022).
15. Funding a Revolution: Government Support for Computing Research // National Academy Press [сайт], 1999. — URL: web.archive.org/web/20080112001018/http://www.nap.edu/readingroom/books/far/ch9.html (дата обращения: 05.04.2022).
16. Маск объявил о создании человекоподобного робота Tesla Bot // Forbes [сайт], 2021. — URL: forbes.ru/newsroom/milliardery/437783-mask-obyavil-ozozdani-i-chelovekopodobnogo-robot-a-tesla-bot (дата обращения: 18.04.2022).
17. The dark ages of AI: A panel discussion at AAAI-84 / McDermott D., Waldrop M. M., Schank R. [et al.] // AI Magazine. — 1985. — № 8–3. — С. 122–134.
18. Brooks R. An Inconvenient Truth About AI — AI won't surpass human intelligence anytime soon / R. Brooks // IEEE Spectrum [сайт], 2021. — URL: morderintelligence.com/industry-reports/natural-language-processing-market (дата обращения: 05.04.2022).
19. Ясницкий Л. Зима близко. Почему искусственный интеллект может потерять популярность / Л. Ясницкий // НИУ ВШЭ [сайт], 2019. — URL: iq.hse.ru/news/298467405.html (дата обращения: 05.04.2022).
20. Nield T. Deep Learning Already Hitting its Limitations? / T. Nield // Towards Data Science [сайт], 2019. — URL: towardsdatascience.com/is-deep-learning-already-hitting-its-limitations-c81826082ac3 (дата обращения: 05.04.2022).
21. Funding a Revolution: Government Support for Computing Research // National Academy Press [сайт], 1999. — URL: archive.org/web/20080112001018/http://www.nap.edu/readingroom/books/far/ch9.html (дата обращения: 05.04.2022).
22. Hawkins A. J. Here are Elon Musk's wildest predictions about Tesla's self-driving cars / A. J. Hawkins // The Verge [сайт], 2019. — URL: theverge.com/2019/4/22/18510828/tesla-elon-musk-autonomy-day-investor-comments-self-driving-cars-predictions (дата обращения: 05.04.2022).
23. На основе интервью с Л. В. Уткиным (СПбПУ) // Фонд ЦСР «Северо-Запад», 2021. — URL: W:\Science\Регионы\САНКТ-ПЕТЕРБУРГ 2019\Проектные линии\\_НОЦ\\_ИИ\Искусственный интеллект\Тезисы интервью (дата обращения: 05.04.2022). — Режим доступа: в локальной сети.
24. Ford M. Rule of the Robots: Warning Signs / M. Ford // IEEE Spectrum [сайт], 2021. — URL: spectrum.ieee.org/rule-of-the-robots-book (дата обращения: 05.04.2022).
25. Heaven W. D. 2021 was the year of monster AI models / W. D. Heaven // MIT Technology Review [сайт], 2021. — URL: technologyreview.com/2021/12/21/1042835/2021-was-the-year-of-monster-ai-models/?truid=&utm\_source=the\_download&utm\_medium=email&utm\_campaign=the\_download.unpaid\_engagement&utm\_term=&utm\_content=12-22-2021&mc\_cid=eced389005&mc\_eid=fdfcf859c6 (дата обращения: 05.04.2022).
26. The Computational Limits of Deep Learning / N. C. Thompson, K. Greenewald, K. Lee, G. F. Manso // arXiv [сайт], 2020. — URL: arxiv.org/abs/2007.05558 (дата обращения: 05.04.2022).
27. Chivers T. How Deepmind is Reinventing the Robot / T. Chivers // IEEE Spectrum [сайт], 2021. — URL: spectrum.ieee.org/how-deepmind-is-reinventing-the-robot (дата обращения: 05.04.2022).
28. Равенство классов P и NP // Академик: академический словарь [сайт], 2010. — URL: ru.dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/93836 (дата обращения: 05.04.2022).

29. Investment in Artificial Intelligence Solutions Will Accelerate as Businesses Seek Insights, Efficiency, and Innovation, According to a New IDC Spending Guide // International Data Corporation, 2021. — URL: [idc.com/getdoc.jsp?containerId=prUS48191221](http://idc.com/getdoc.jsp?containerId=prUS48191221) (дата обращения: 05.04.2022).
30. На основе интервью с В. В. Климовым (НИЯУ МИФИ) // Фонд ЦСР «Северо-Запад», 2021. — URL: [W:\Science\Регионы\САНКТ-ПЕТЕРБУРГ 2019\Проектные линии\\\_НОЦ\\\_ИИ\Искусственный интеллект\Тезисы интервью \(дата обращения: 05.04.2022\)](http://W:\Science\Регионы\САНКТ-ПЕТЕРБУРГ 2019\Проектные линии\_НОЦ\_ИИ\Искусственный интеллект\Тезисы интервью (дата обращения: 05.04.2022)). — Режим доступа: в локальной сети.
31. На основе интервью с М. В. Болсуновской (СПбПУ) // Фонд ЦСР «Северо-Запад», 2021. — URL: [W:\Science\Регионы\САНКТ-ПЕТЕРБУРГ 2019\Проектные линии\\\_НОЦ\\\_ИИ\Искусственный интеллект\Тезисы интервью \(дата обращения: 05.04.2022\)](http://W:\Science\Регионы\САНКТ-ПЕТЕРБУРГ 2019\Проектные линии\_НОЦ\_ИИ\Искусственный интеллект\Тезисы интервью (дата обращения: 05.04.2022)). — Режим доступа: в локальной сети.
32. Shell, C3 AI, Baker Hughes, and Microsoft Launch the Open AI Energy Initiative, an Ecosystem of AI Solutions to Help Transform the Energy Industry // C3.ai [сайт], 2021. — URL: [c3.ai/shell-c3-ai-baker-hughes-and-microsoft-launch-the-open-ai-energy-initiative-an-ecosystem-of-ai-solutions-to-help-transform-the-energy-industry/](http://c3.ai/shell-c3-ai-baker-hughes-and-microsoft-launch-the-open-ai-energy-initiative-an-ecosystem-of-ai-solutions-to-help-transform-the-energy-industry/) (дата обращения: 05.04.2022).
33. Группа НЛМК тестирует инновации в области Интернета вещей и искусственного интеллекта // НЛМК [сайт], 2021. — URL: [nlmk.com/ru/media-center/press-releases/nlmk-pilots-iiot-and-ai-innovations/](http://nlmk.com/ru/media-center/press-releases/nlmk-pilots-iiot-and-ai-innovations/) (дата обращения: 05.04.2022).
34. Аршавский А. Искусственный интеллект в металлургии / А. Аршавский // НЛМК [сайт], 2018. — URL: [cloud-digital.ru/sites/default/files/13.25-13.45\\_arhavsky\\_nlmk\\_new.pdf](http://cloud-digital.ru/sites/default/files/13.25-13.45_arhavsky_nlmk_new.pdf) (дата обращения: 02.04.2022).
35. Шумский С. А. Воспитание машин: Новая история разума / С. А. Шумский. — Москва: Альпина нон-фикшн, 2021. — 174 с.
36. Dilmegani C. In-Depth Guide to Quantum Artificial Intelligence in 2022 / C. Dilmegani // AI Multiple [сайт], 2022. — URL: [research.aimultiple.com/quantum-ai/](http://research.aimultiple.com/quantum-ai/) (дата обращения: 11.02.2022).
37. На основе интервью с А. А. Фильченковым (ИТМО) // Фонд ЦСР «Северо-Запад», 2021. — URL: [W:\Science\Регионы\САНКТ-ПЕТЕРБУРГ 2019\Проектные линии\\\_НОЦ\\\_ИИ\Искусственный интеллект\Тезисы интервью \(дата обращения: 05.04.2022\)](http://W:\Science\Регионы\САНКТ-ПЕТЕРБУРГ 2019\Проектные линии\_НОЦ\_ИИ\Искусственный интеллект\Тезисы интервью (дата обращения: 05.04.2022)). — Режим доступа: в локальной сети.
38. На основе интервью с А. В. Самсоновичем (НИЯУ МИФИ) // Фонд ЦСР «Северо-Запад», 2021. — URL: [W:\Science\Регионы\САНКТ-ПЕТЕРБУРГ 2019\Проектные линии\\\_НОЦ\\\_ИИ\Искусственный интеллект\Тезисы интервью \(дата обращения: 05.04.2022\)](http://W:\Science\Регионы\САНКТ-ПЕТЕРБУРГ 2019\Проектные линии\_НОЦ\_ИИ\Искусственный интеллект\Тезисы интервью (дата обращения: 05.04.2022)). — Режим доступа: в локальной сети.
39. На основе интервью с П. О. Скобелевым (ИПУСС РАН) // Фонд ЦСР «Северо-Запад», 2021. — URL: [W:\Science\Регионы\САНКТ-ПЕТЕРБУРГ 2019\Проектные линии\\\_НОЦ\\\_ИИ\Искусственный интеллект\Тезисы интервью \(дата обращения: 05.04.2022\)](http://W:\Science\Регионы\САНКТ-ПЕТЕРБУРГ 2019\Проектные линии\_НОЦ\_ИИ\Искусственный интеллект\Тезисы интервью (дата обращения: 05.04.2022)). — Режим доступа: в локальной сети.
40. На основе интервью с А. Л. Тулупьевым (СПбГУ) // Фонд ЦСР «Северо-Запад», 2021. — URL: [W:\Science\Регионы\САНКТ-ПЕТЕРБУРГ 2019\Проектные линии\\\_НОЦ\\\_ИИ\Искусственный интеллект\Тезисы интервью \(дата обращения: 05.04.2022\)](http://W:\Science\Регионы\САНКТ-ПЕТЕРБУРГ 2019\Проектные линии\_НОЦ\_ИИ\Искусственный интеллект\Тезисы интервью (дата обращения: 05.04.2022)). — Режим доступа: в локальной сети.
41. На основе интервью с К. В. Кринкиным (СПбГЭТУ «ЛЭТИ») // Фонд ЦСР «Северо-Запад», 2021. — URL: [W:\Science\Регионы\САНКТ-ПЕТЕРБУРГ 2019\Проектные линии\\\_НОЦ\\\_ИИ\Искусственный интеллект\Тезисы интервью \(дата обращения: 05.04.2022\)](http://W:\Science\Регионы\САНКТ-ПЕТЕРБУРГ 2019\Проектные линии\_НОЦ\_ИИ\Искусственный интеллект\Тезисы интервью (дата обращения: 05.04.2022)). — Режим доступа: в локальной сети.
42. Co-evolutionary hybrid intelligence (preprint) / K. Krinkin, Y. Shichkina, A. Ignatyev // arXiv [сайт], 2021. — URL: [arxiv.org/ftp/arxiv/papers/2112/2112.04751.pdf](http://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/2112/2112.04751.pdf) (дата обращения: 11.02.2022).
43. На основе интервью с А. В. Бухановским (ИТМО) // Фонд ЦСР «Северо-Запад», 2021. — URL: [W:\Science\Регионы\САНКТ-ПЕТЕРБУРГ 2019\Проектные линии\\\_НОЦ\\\_ИИ\Искусственный интеллект\Тезисы интервью \(дата обращения: 05.04.2022\)](http://W:\Science\Регионы\САНКТ-ПЕТЕРБУРГ 2019\Проектные линии\_НОЦ\_ИИ\Искусственный интеллект\Тезисы интервью (дата обращения: 05.04.2022)). — Режим доступа: в локальной сети.
44. Das A. Opportunities and Challenges in Explainable Artificial Intelligence (XAI): A Survey / A. Das, P. Rad // arXiv [сайт], 2020. — URL: [arxiv.org/pdf/2006.11371.pdf](http://arxiv.org/pdf/2006.11371.pdf) (дата обращения: 11.02.2022).
45. На основе интервью с А. Н. Горбанем (Университет Лестера, Великобритания) // Фонд ЦСР «Северо-Запад», 2021. — URL: [W:\Science\Регионы\САНКТ-ПЕТЕРБУРГ 2019\Проектные линии\\\_НОЦ\\\_ИИ\Искусственный интеллект\Тезисы интервью \(дата обращения: 05.04.2022\)](http://W:\Science\Регионы\САНКТ-ПЕТЕРБУРГ 2019\Проектные линии\_НОЦ\_ИИ\Искусственный интеллект\Тезисы интервью (дата обращения: 05.04.2022)). — Режим доступа: в локальной сети.
46. Ray T. B. Google says 'exponential' growth of AI is changing nature of compute / T. Ray // ZDNet [сайт], 2018. — URL: [zdnet.com/article/google-says-exponential-growth-of-ai-is-changing-nature-of-compute/](http://zdnet.com/article/google-says-exponential-growth-of-ai-is-changing-nature-of-compute/) (дата обращения: 05.04.2022).
47. Mims C. Huang's Law Is the New Moore's Law, and Explains Why Nvidia Wants Arm / C. Mims // The Wall Street Journal [сайт], 2020. — URL: [wsj.com/articles/huangs-law-is-the-new-moores-law-and-explains-why-nvidia-wants-arm-11600488001](http://wsj.com/articles/huangs-law-is-the-new-moores-law-and-explains-why-nvidia-wants-arm-11600488001) (дата обращения: 03.04.2022).
48. Intel Loihi (нейроморфный процессор) // TAdviser [сайт], 2022. — URL: [\(tadviser.ru/index.php/%D0%9F%D1%80%D0%BE%D0%B4%D1%83%D0%BA%D1%82:Intel\\_Loihi\\_\(%D0%BD%D0%B5%D0%B9%D1%80%D0%BE%D0%BC%D0%BE%D1%80%D1%84%D0%BD%D1%8B%D0%B9.%D0%BF%D1%80%D0%BE%D1%86%D0%B5%D1%81%D1%81%D0%BE%D1%80\)](http://tadviser.ru/index.php/%D0%9F%D1%80%D0%BE%D0%B4%D1%83%D0%BA%D1%82:Intel_Loihi_(%D0%BD%D0%B5%D0%B9%D1%80%D0%BE%D0%BC%D0%BE%D1%80%D1%84%D0%BD%D1%8B%D0%B9.%D0%BF%D1%80%D0%BE%D1%86%D0%B5%D1%81%D1%81%D0%BE%D1%80)) (дата обращения: 25.03.2022).
49. Представлен нейроморфный процессор Intel Loihi 2 и среда программирования Lava // Аспект исследования и публикации [сайт], 2021. — URL: [ixbt.com/news/2021/09/30/intel-loihi-2-lava.html](http://ixbt.com/news/2021/09/30/intel-loihi-2-lava.html) (дата обращения: 25.03.2022).
50. Chu J. Engineers design artificial synapse for "brain-on-a-chip" hardware / J. Chu // MIT [сайт], 2018. — URL: [news.mit.edu/2018/engineers-design-artificial-synapse-brain-on-a-chip-hardware-0122](http://news.mit.edu/2018/engineers-design-artificial-synapse-brain-on-a-chip-hardware-0122) (дата обращения: 25.03.2022).
51. Квантовые процессоры поступают в продажу: что они могут и для чего созданы? // Selectel [сайт], 2021. — URL: [nanonewsnet.ru/news/2021/kvantovye-protsessory-postupayut-v-prodazhu-chto-oni-mogut-dlya-chego-sozdany](http://nanonewsnet.ru/news/2021/kvantovye-protsessory-postupayut-v-prodazhu-chto-oni-mogut-dlya-chego-sozdany) (дата обращения: 25.03.2022).
52. Notes from the AI frontier: Insights from hundreds of use cases / M. Chui, J. Manyika, M. Miremadi [et al.] // McKinsey [сайт], 2018. — URL: [mckinsey.com/featured-insights/artificial-intelligence/notes-from-the-ai-frontier-applications-and-value-of-deep-learning](http://mckinsey.com/featured-insights/artificial-intelligence/notes-from-the-ai-frontier-applications-and-value-of-deep-learning) (дата обращения: 04.04.2022).
53. Rykov M. The Top 10 Industrial AI use cases / M. Rykov // IoT Analytics [сайт], 2019. — URL: [iot-analytics.com/the-top-10-industrial-ai-use-cases/](http://iot-analytics.com/the-top-10-industrial-ai-use-cases/) (дата обращения: 25.03.2022).
54. Wunner F. How AI-driven generative design disrupts traditional value chains / F. Wunner, T. Krüger, B. Gierse // Accenture [сайт], 2020. — URL: [accenture.com/us-en/blogs/industry-digitization/how-ai-driven-generative-design-disrupts-traditional-value-chains](http://accenture.com/us-en/blogs/industry-digitization/how-ai-driven-generative-design-disrupts-traditional-value-chains) (дата обращения: 29.03.2022).
55. Из выступления Санджива Шривастава на семинаре AI Driven Design Approach // YouTube-канал Machine Learning Center at Georgia Tech [сайт], 2020. — URL: [youtube.com/watch?v=eitWsEM2ljk](http://youtube.com/watch?v=eitWsEM2ljk) (дата обращения: 08.04.2022).

56. Перспективы IoT и AI: эксперты обсудили этические дилеммы // Connect-wit [сайт], 2020. — URL: connect-wit.ru/perspektivy-iot-i-ai-eksperty-obsudili-eticheskie-dilemmy.html (дата обращения: 25.03.2022).
57. Automation systems and integration — Digital twin framework for manufacturing — Part 1: Overview and general principles // ISO [сайт], 2021. — URL: iso.org/ru/standard/75066.html (дата обращения: 25.03.2022).
58. Beck R. Digital Twins and AI: Transforming Industrial Operations / R. Beck // AspenTech [сайт]. — URL: reliableplant.com/Read/31897/digital-twins-ai (дата обращения: 25.03.2022).
59. Prahladrao S. The Future of Manufacturing to be AI Driven / S. Prahladrao // ARC Advisory Group [сайт]. — URL: arcweb.com/industry-best-practices/future-manufacturing-be-ai-driven (дата обращения: 30.03.2022).
60. Artificial Intelligence-Driven Customized Manufacturing Factory: Key Technologies, Applications, and Challenges / J. Wan, X. Li, H. Dai [et al.] // arXiv [сайт], 2020. — URL: arxiv.org/pdf/2108.03383.pdf (дата обращения: 01.04.2022).
61. Burian J. Is the 'Industrial Metaverse' the Next Big Thing? / J. Burian // Industry Week [сайт], 2022. — URL: industryweek.com/technology-and-iiot/emerging-technologies/article/21234184/is-the-industrial-metaverse-the-next-big-thing (дата доступа: 20.04.2022).
62. Bi Z. M. Safety assurance mechanisms of collaborative robotic systems in manufacturing / Z. M. Bi, C. Luo, Z. Miao [et al.] // ScienceDirect [сайт], 2021. — URL: sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0736584520302337 (дата доступа: 05.04.2022).
63. Malik A. A. Digital twins for collaborative robots: A case study in human-robot interaction / A. A. Malik, A. Brem // ScienceDirect [сайт], 2021. — URL: sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0736584520303021 (дата доступа: 05.04.2022).
64. Human-robot collaboration: 3 Case Studies // Wevolver [сайт], 2020. — URL: wevolver.com/article/humanrobot-collaboration.3.case.studies (дата обращения: 05.04.2022).
65. Demir K. A. Industry 5.0 and Human-Robot Co-working / K. A. Demir, G. Döven, B. Sezen // ScienceDirect [сайт], 2019. — URL: sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050919312748 (дата обращения: 19.01.2022).
66. Müller, J. Enabling Technologies for Industry 5.0. / J. Müller // Eurocomission [сайт], 2020. — URL: op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/8e5de100-2a1c-11eb-9d7e-01aa75ed71a1/language-en/format-PDF/source-248960047 (дата обращения: 19.01.2022).
67. Satellite Orbit Prediction Using Big Data and Soft Computing Techniques to Avoid Space Collisions / C. Puente, M. A. Sáenz-Nuño, A. Villa-Monte, J. A. Olivás // MDPI [сайт], 2021. — URL: mdpi.com/2227-7390/9/17/2040/htm (дата обращения: 04.04.2022).
68. Samuelson P., Scotchmer S. The Law and Economics of Reverse Engineering / P. Samuelson, S. Scotchmer // The Yale Law Journal. — 2002. — № 111-7. — С. 1575–1663.
69. Wiggers K. Researchers propose AI system that reverse-engineers black box apps / K. Wiggers // VentureBeat [сайт], 2020. — URL: venturebeat.com/2020/06/23/researchers-propose-ai-that-reverse-engineers-black-box-apps/ (дата обращения: 03.04.2022).
70. Шенкар О. Имитаторы. Как компании заимствуют и перерабатывают чужие идеи / О. Шенкар. — Москва: Альбина Паблицер, 2011.
71. Степанов Д. В России за 5,7 миллиарда создадут оборудование для печати процессоров по технологии 17-летней давности / Д. Степанов // CNews [сайт], 2021. — URL: cnews.ru/news/top/2021-11-22\_v\_rossii\_za\_57\_milliarda\_rublej (дата обращения: 28.03.2022).
72. Механик А. Литография без маски / А. Механик // Стимул [сайт], 2019. — URL: stimul.online/articles/innovatsii/litografiya-bez-maski/ (дата обращения: 28.03.2022).
73. Из выступления О. А. Тельминова (НИИМЭ) на семинаре Ассоциации «ИИ в промышленности» // YouTube [сайт], 2022. — URL:youtu.be/26vqoN-it7g?t=8842 (дата обращения: 05.04.2022).
74. Конкурс Blue Sky Research Искусственный интеллект в науке // Blue Sky Research [сайт], 2022. — URL: blueskyresearch.ru/ (дата обращения: 03.04.2022).



ISBN 978-5-9909736-4-0



9 785990 973640



ПРАВИТЕЛЬСТВО  
САНКТ-ПЕТЕРБУРГА



СТРАТЕГИЧЕСКИЙ  
ЦЕНТР  
РАЗРАБОТОК  
СЕВЕР-ЗАПАД



ФОНД ИНИЦИАТИВ  
САНКТ-ПЕТЕРБУРГА

АССОЦИАЦИЯ  
«ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ  
В ПРОМЫШЛЕННОСТИ»