

Связь между Индустрией 4.0 и устойчивым производством: анализ результатов обследования предприятий обрабатывающей промышленности

**Инна Сергеевна Лола,
Мурат Булатович Бакеев**

Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», г. Москва, Россия

Целью статьи является эмпирическое исследование потенциальной связи между внедрением в обрабатывающей промышленности технологий Индустрии 4.0 и развитием устойчивого производства, понимаемого как производство товаров с минимальным использованием энергии и природных ресурсов при сохранении максимальной прибыли и обеспечении здоровья и безопасности общества на протяжении всего жизненного цикла продукции. В статье впервые рассматриваются четыре исследовательских вопроса, первый из которых касается возможной связи между внедрением технологий Индустрии 4.0 и наличием на промышленном предприятии сертификата ISO 14001, рассматриваемого в качестве косвенного индикатора соответствия принципам устойчивого производства, второй – связи между внедрением технологий Индустрии 4.0 и «зеленых» промышленных технологий, третий – связи между внедрением технологий Индустрии 4.0 и продвижением по различным частным направлениям экологизации, а четвертый – связи между внедрением цифровых технологий и признанием значимых экологических выгод от использования на предприятии цифровых технологий. Анализ базировался на квантифицированных данных годового конъюнктурного обследования цифровой активности российских предприятий обрабатывающей промышленности (проведенного в 2021 г.), включающих набор показателей, характеризующих технологическую и цифровую активность в области экологизации и повышения ресурсной эффективности.

Полученные результаты анализа свидетельствуют о том, что хотя и на технологическом уровне связь между развитием в области Индустрии 4.0 и области «зеленых» промышленных технологий вполне однозначна, с точки зрения соответствия предприятия критериям устойчивого производства в меньшей степени можно говорить о существенной роли технологий Индустрии 4.0. Наличие экологических выгод от внедрения цифровых технологий чаще отмечали те респонденты, на предприятиях которых были внедрены технологии искусственного интеллекта и больших данных. Эти же технологии были признаны ключевыми технологиями Индустрии 4.0 для целей устойчивого развития, связанными с наибольшим количеством отдельных направлений экологизации производства, по итогам проведенного исследования.

Ключевые слова: Индустрия 4.0, устойчивое производство, экологизация, «зеленые» технологии, цифровые технологии, статистика обрабатывающей промышленности, статистика инноваций, конъюнктурные обследования.

JEL: O14, O33, Q20, Q40, Q50.

doi: <https://doi.org/10.34023/2313-6383-2022-29-6-44-58>.

Для цитирования: Лола И.С., Бакеев М.Б. Связь между Индустрией 4.0 и устойчивым производством: анализ результатов обследования предприятий обрабатывающей промышленности. Вопросы статистики. 2022;29(6):44–58.

The Link Between Industry 4.0 and Sustainable Manufacturing: An Analysis of the Results of a Survey of Manufacturing Enterprises

**Inna S. Lola,
Murat B. Bakeev**

National Research University Higher School of Economics (HSE University), Moscow, Russia

The purpose of this paper is to empirically explore the potential link between the adoption of Industry 4.0 technologies in the manufacturing industry and the development of sustainable manufacturing, understood as the production of goods with the minimum use of energy and natural resources, while maintaining maximum profit and ensuring the health and safety of society throughout the product life cycle. The article first addresses 4 research questions, the first of which concerns a possible connection between the introduction of Industry 4.0 technologies and the presence of an ISO 14001 certificate in an industrial enterprise, considered as an indirect indicator of compliance with the principles of sustainable manufacturing, the second – the connection between the implementation of Industry 4.0 technologies and «green» industrial technologies, the third – the links between the introduction of Industry 4.0 technologies and the promotion of various specific areas of greening, and the fourth – the links between the introduction of digital technologies and the recognition of significant environmental benefits from the use of digital technologies in the enterprise. The analysis was based on quantified data from the annual market survey of the digital activity of Russian manufacturing enterprises for 2021, which includes a set of indicators characterizing technological and digital activity in the field of greening and increasing resource efficiency.

The obtained results indicate that, although at the technological level, the relationship between the development in the field of Industry 4.0 and the field of «green» industrial technologies is quite unambiguous, from the viewpoint of the enterprise's compliance with the criteria for sustainable production, to a lesser extent, one can speak of the important role of Industry 4.0 technologies. The presence of environmental benefits from the introduction of digital technologies was more often noted by those respondents in whose enterprises artificial intelligence and big data technologies were introduced. The same technologies were recognized as the key technologies of Industry 4.0 for sustainable development, associated with the largest number of individual areas of greening production, according to the results of the study.

Keywords: Industry 4.0, sustainable manufacturing, greening, green technologies, digital technologies, manufacturing industry statistics, innovation statistics, business tendency surveys.

JEL: O14, O33, Q20, Q40, Q50.

doi: <https://doi.org/10.34023/2313-6383-2022-29-6-44-58>.

For citation: Lola I.S., Bakeev M.B. The Link Between Industry 4.0 and Sustainable Manufacturing: An Analysis of the Results of a Survey of Manufacturing Enterprises. *Voprosy Statistiki*. 2022;29(6):44–58. (In Russ.)

Введение

В последние годы развитие международной промышленной политики все больше фокусируется на повышении энергоэффективности, энергобезопасности, снижении энергоемкости производств, трансфере «зеленых» технологий и создании «зеленых» рабочих мест, развитии рынка вторичных отходов, стимулировании инноваций. Обеспечение «зеленого» роста, как мощного потенциального источника для новых экономических возможностей во многих странах определяется как одна из наиболее актуальных задач, одновременно обуславливая проблематику вопросов, связанных с экономико-статистическим измерением его эффектов.

Разрабатываемые в «Большой двадцатке» (G-20) и Международном Валютном Фонде (МВФ) планы предполагают, что правительству в следующие 5–10 лет предстоит сыграть решающую роль в переходе от высокоуглеродной к низкоуглеродной экономике, в том числе путем инвестирования в «зеленую» инфраструктуру, создания стимулов для активности предприятий в области экологизации и введения тарифов на выбросы углекислого газа¹. О стратегиях достижения углеродной нейтральности заявили круп-

нейшие экономики мира (США, Китай, Индия), а в октябре–ноябре 2021 г. в г. Глазго состоялась 26-я Конференция Сторон (КС-26) по климату, на которой были достигнуты новые договоренности по реализации Рамочной конвенции ООН об изменении климата (РКИК)². Если говорить о странах БРИКС, то среди их конкретных инициатив на направлении устойчивого развития можно назвать цель достичь мощности возобновляемых источников энергии в размере 175 ГВт к концу 2022 г. и увеличить ее до 500 ГВт к 2030 г. (Индия³), цель достичь углеродной нейтральности к 2060 г. (Китай⁴, Россия⁵).

Широкую популярность среди инвесторов и остальных стейкхолдеров получили критерии ESG (Environment, Social, Corporate Governance – Экологическое, социальное и корпоративное управление), позволяющие оценить достижения компаний в решении экологических, социальных и управлеченческих проблем. По данным Bloomberg, к 2025 г. мировые ESG-активы могут превысить 53 трлн \$ и составить более трети от общего объема активов под управлением⁶. В России, согласно оценке представителя Deloitte, сделанной в ноябре 2021 г., при сохранении сложившегося тренда ESG-активы должны составить около 360 трлн рублей к 2036 г., а кредиты, ориентиро-

¹ Reaching Net Zero Emissions. International Monetary Fund; 2021. URL: <https://www.imf.org/external/np/g20/pdf/2021/062221.pdf> (дата обращения 26.04.2022).

² Круглый стол «Воздействие изменения климата на человеческий потенциал, экономику и экосистемы». ИСИЭЗ НИУ ВШЭ; 2022. URL: <https://issek.hse.ru/announcements/577968702.html> (дата обращения 25.04.2022).

³ Creating a sustainable world. Invest India; 2022. URL: <https://www.investindia.gov.in/sector/renewable-energy> (дата обращения 26.04.2022).

⁴ China's new carbon market aims to substantially reduce its emissions. Here's how. World Economic Forum; 2021. URL: <https://www.weforum.org/agenda/2021/11/new-carbon-market-slash-chinas-emissions/> (дата обращения 25.04.2022).

⁵ Правительство утвердило стратегию низкоуглеродного развития РФ до 2050 года. Интерфакс; 2021. URL: <https://www.interfax.ru/russia/800746> (дата обращения 25.04.2022).

⁶ Bloomberg; 2021. URL: <https://www.bloomberg.com/professional/blog/esg-assets-may-hit-53-trillion-by-2025-a-third-of-global-aum/> (дата обращения 26.04.2022).

ванные на цели в области устойчивого развития (далее – ЦУР⁷) и «зеленую» экономику, должны превысить 1,3 трлн рублей в 2030 г.⁸

Результаты опроса топ-менеджеров российских предприятий из 13 различных отраслей, проведенного Accenture, показывают, что в 2021 г. ЦУР и ESG стали как никогда актуальными для российского бизнеса: 64% респондентов отнесли ESG-вопросы к топ-3 основных направлений работы своей организации, а 74% уверены, что внедрение устойчивых инициатив способствует улучшению финансово-экономических показателей⁹. Кроме того, более трети респондентов обследования заботятся о сокращении выбросов углекислого газа и около 30% занимаются сокращением отходов.

Для обрабатывающей промышленности, опережающей многие отрасли экономики по таким показателям, как выбросы парниковых газов и энергопотребление, ЦУР являются особенно важным вызовом. Устойчивое развитие в промышленности часто связывается с термином «устойчивое производство» (sustainable manufacturing), которое можно определить, как промышленное производство, направленное на производство товаров с минимальным использованием энергии и природных ресурсов при сохранении максимальной прибыли и обеспечении здоровья и безопасности общества на протяжении всего жизненного цикла продукции [1].

Повышение внимания к устойчивому производству в обрабатывающей промышленности совпало с таким отраслевым технологическим трендом, как четвертая промышленная революция (Индустрия 4.0), который предполагает цифровую трансформацию промышленных цепочек создания стоимости на основе ряда продвинутых цифровых технологий. Индустрия 4.0 может служить целям экологической устойчивости, поскольку влечет за собой оптимизацию потребления ресурсов, энергоэффективность и снижение отходов [2]. Мониторинг энергопотребления

в режиме реального времени, сокращение отходов благодаря разработке и производству продукции по индивидуальным заказам, снижение выбросов, связанных с транспортировкой, за счет высокоеффективной коммуникации в рамках производственной сети – все это примеры возможных экологических выгод от применения технологических инструментов Индустрии 4.0 [3].

Несмотря на то, что сохранение окружающей среды не было изначальным стратегическим приоритетом в рамках Индустрии 4.0, к сегодняшнему моменту и в деловой, и в академической среде связь между Индустрией 4.0 и устойчивым производством активно исследуется и обсуждается. Свидетельством академического интереса является появление множества обзорных библиометрических работ, анализирующих большие массивы литературы по этой проблеме (см., например, [2–8]). В качестве примера интереса зарубежного бизнеса можно привести отчет Huawei, где была обнаружена 90-процентная корреляция между инвестициями в цифровые технологии и прогрессом в достижении шести ключевых ЦУР¹⁰.

Российский бизнес, как показывает упомянутый выше опрос Accenture, вполне осознает ключевую роль технологических инструментов в рамках развития устойчивого производства. К технологиям, внедрение которых, по мнению респондентов опроса, является наиболее важным для устойчивого развития, были отнесены многие технологии Индустрии 4.0: продвинутая аналитика (отмечена 24,8% респондентов), роботизация (22,1), искусственный интеллект (21,5), «облачные» технологии (14,1), Интернет вещей (8,1), технологии виртуальной и дополненной реальности (5,4), блокчейн (2,7%).

Тем не менее, существуют аргументы, ставящие позитивную связь между Индустрией 4.0 и устойчивым производством под сомнение. Во-первых, использование продвинутых цифровых технологий может быть источником негативного влияния на окружающую среду: оборудование может соз-

⁷ Семнадцать взаимосвязанных целей, разработанных в 2015 г. Генеральной ассамблеей ООН в качестве «плана достижения лучшего и более устойчивого будущего для всех», которые среди прочего включают недорогостоящую и чистую энергию, ответственное потребление и производство, борьбу с изменением климата.

⁸ ТАСС; 2021. URL: <https://tass.ru/ekonomika/13018465> (дата обращения 25.04.2022).

⁹ Курс на устойчивость: как российский бизнес становится ответственным. Исследование в области устойчивого развития. Accenture; 2021. URL: https://www.accenture.com/_acnmedia/PDF-162/Accenture-Sustainability-Survey-2021-RUSSIA.pdf (дата обращения 25.04.2022).

¹⁰ Huawei Study Shows Critical Role for Technology in UN SDGs. Huawei; 2017. URL: <https://www.huawei.com/en/news/2017/6/critical-role-un-sdgs> (дата обращения 26.04.2022).

давать большое количество электронных отходов, а растущий спрос на электроэнергию в центрах обработки данных может вести к увеличению вредных выбросов в атмосферу [3]. Во-вторых, риторика стейкхолдеров может не соотноситься с реальным положением дел: скажем, заявления бизнеса о достижении углеродной нейтральности могут основываться на искаженных, сомнительных свидетельствах¹¹. В-третьих, не все имеющиеся данные подтверждают тезис о понимании экологических выгод от внедрения технологий Индустрии 4.0 предпринимателями и менеджерами: например, согласно результатам [9], компании редко считают Индустрию 4.0 полезной для экологической устойчивости, а экономические возможности для них имеют приоритет над экологическими и социальными выгодами.

Таким образом, связь между Индустрией 4.0 и устойчивым производством остается неочевидной. Несмотря на широкое распространение в последние несколько лет исследований, посвященных этой проблеме, большая часть из них опирается на концептуальный подход, расчет агрегированных индексов или же предоставляет частные эмпирические результаты, по которым сложнее судить об общей картине. В рамках этой статьи мы хотели бы сделать вклад в литературу по теме, заключающийся в широком эмпирическом исследовании этой потенциальной связи с учетом основных технологий Индустрии 4.0 на результатах опросов предпринимателей и менеджеров высшего звена предприятий обрабатывающей промышленности в России. Используемая выборка является репрезентативной для российской обрабатывающей промышленности и включает все основные ее подотрасли, что позволяет судить о состоянии этого сектора в целом на базе данных обследования. Безусловно, наши результаты могут обладать ограниченной внешней валидностью в контексте понимания проблемы на мировом уровне, особенно учитывая развивающийся характер российской экономики с точки зрения достигнутого уровня и интенсивности внедрения Индустрии 4.0 в промышленности. Тем не менее итоги обследования являются важным свидетельством для понимания связи между Индустрией 4.0 и устойчивым производством на начальных этапах четвертой промыш-

ленной революции в условиях развивающейся экономики.

Исходя из постановки общей проблемы, мы хотели бы в этой статье обратиться к следующим исследовательским вопросам.

Первый вопрос касается связи между внедрением технологий Индустрии 4.0 и наличием у предприятия сертификата ИСО 14001, который мы используем в качестве индикатора соответствия промышленного предприятия основным принципам устойчивого производства.

Исследовательский вопрос № 1: существует ли связь между внедрением технологий Индустрии 4.0 и наличием на предприятии сертификата ИСО 14001? Если да, то для каких технологий можно проследить эту связь? Если таких технологий несколько, то роль каких из них более существенна?

Следующий вопрос фокусируется на технологическом аспекте устойчивого производства, рассматривая связь между Индустрией 4.0 и внедрением «зеленых» промышленных технологий.

Исследовательский вопрос № 2: существует ли связь между использованием технологий Индустрии 4.0 и внедрением «зеленых» промышленных технологий? Если да, то для каких технологий Индустрии 4.0 можно проследить эту связь? Если таких технологий несколько, то роль каких из них более существенна?

Наш третий исследовательский вопрос касается связи между использованием технологий Индустрии 4.0 и продвижением по различным аспектам устойчивого производства, информацию о которых можно было получить из доступных нам данных: повышение энергоэффективности, создание чистой и безопасной энергии, снижение материоемкости, повышение эффективности водоиспользования и использования сырья, повышение эффективности выбросов парниковых газов и загрязняющих веществ (углеродной эффективности), переход к возобновляемым источникам энергии и утилизации отходов.

Исследовательский вопрос № 3: существует ли связь между продвижением в области различных аспектов устойчивого производства и внедрением каких-либо технологий Индустрии 4.0? Если да, то роль каких технологий проявляется в большей степени?

¹¹ Corporate Climate Responsibility Monitor. New Climate Institute; 2022. URL: <https://newclimate.org/wp-content/uploads/2022/02/CorporateClimateResponsibilityMonitor2022.pdf> (дата обращения 26.04.2022).

Наконец, четвертый исследовательский вопрос предполагает проверку связи между внедрением технологий Индустрии 4.0 и восприятием экологических выгод от использования на предприятии цифровых технологий.

Исследовательский вопрос № 4: существует ли связь между внедрением каких-либо технологий Индустрии 4.0 и признанием значимых экологических выгод от использования на предприятии цифровых технологий? Если да, то роль каких технологий проявляется в большей степени?

Оставшаяся часть статьи состоит из трех разделов. В первом разделе описывается концептуальная рамка исследования (обсуждение и выбор переменных), данные и методы. Во втором разделе даны результаты и их обсуждение. В третьем разделе представлено заключение.

Концептуальная рамка исследования, данные и методы

Используемые в работе данные – это результаты ежегодных пилотных конъюнктурных обследований, которые проводятся по заказу Института статистических исследований и экономики знаний НИУ ВШЭ (ИСИЭЗ НИУ ВШЭ) с 2018 г. Информационно-издательским центром «Статистика России» в рамках измерения динамики и анализа тенденций ключевых составляющих процесса технологической трансформации в промышленности. Опросы осуществляются по специально разработанному инструментарию – «Обследование деловых тенденций и цифровой активности промышленности», который базируется на интегрированном сквозном подходе, предполагающем интеграцию и регулярную актуализацию показателей в контексте комплексного измерения процессов цифровизации. Получаемая информация носит неколичественный характер.

Программа наблюдений основана на международном опыте измерения деловых тенденций и цифрового развития в части рекомендаций ОЭСР и Европейской Комиссии по обследованию деловой активности, а также практики Европейской комиссии в области цифровой повест-

ки, разработки, актуализации инструментария наблюдения и проведения ежегодных опросов по информационному обществу¹².

Формирование выборочной совокупности осуществляется на основе ведущегося Федеральной службой государственной статистики (Росстатом) Единого государственного регистра предприятий и организаций. Отбор организаций по видам экономической деятельности внутри указанных секторов экономики для обеспечения репрезентативных первичных данных производится в соответствии со структурой генеральной совокупности. По каждому виду деятельности определено количество предприятий для опроса. Выборка репрезентативна по всем единицам наблюдения, многомерна, стратифицирована, районирована по восьми федеральным округам и представительна по основным экономическим параметрам тридцати регионов Российской Федерации. Отобранные регионы являются наиболее представительными по основным социально-экономическим показателям, характеризующим деятельность промышленных предприятий различных видов деятельности, в соответствующих федеральных округах. В работе используются результаты обследования 2021 г., охват которого составил 1158 промышленных предприятий, зарегистрированных на территории России и входящих в раздел С классификации ОКВЭД¹³.

При оценке влияния Индустрии 4.0 мы использовали бинарные переменные, отражающие факт внедрения на предприятии шести отдельных технологий, относимых к Индустрии 4.0. В целом эти технологии включают в себя большинство наиболее распространенных ключевых элементов Индустрии 4.0, которые упоминаются в литературе (см., например, [10–14]). В частности, были рассмотрены следующие технологии (и образованные на основе данных об их внедрении переменные), как они были указаны в анкете:

- Технологии искусственного интеллекта (нейронные сети и машинное обучение);
- Аддитивные технологии (3D-печать);
- Интернет вещей;
- Хранение информации и проведение вычислений на распределенных ресурсах («облачные» технологии, «границевые» технологии);

¹² Community survey on ICT usage in enterprises. Eurostat; 2017. URL: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Community_survey_on_ICT_usage_in_enterprises (дата обращения 25.04.2022).

¹³ «OK 029-2014 (КДЕС Ред. 2). Общероссийский классификатор видов экономической деятельности» (утв. Приказом Росстандарта от 31.01.2014 № 14-ст) (ред. от 26.07.2022). URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_163320/ (дата обращения 17.11.2022).

- Технологии радиочастотной идентификации (RFID);
- Технологии сбора, обработки, анализа больших объемов данных.

Данные о внедрении технологий Индустрии 4.0 на предприятиях выборки формируются на основе вопроса анкеты «Цифровые технологии, которые используются/планируются к внедрению на предприятии». Если респондентом отмечалось, что технология использовалась на каком-то уровне на предприятии на момент проведения опроса, то мы интерпретировали это как факт внедрения данной технологии.

Безусловно, выбранная степень детализации отдельных технологий оставляет большое пространство для различий между предприятиями, представители которых дали идентичные ответы. Тем не менее, она представляется достаточной для наших целей, а именно понимания общей связи между Индустрией 4.0 и устойчивым производством.

Среди рассматриваемых технологий в литературе особенно широко обсуждается положительная роль в устойчивом производстве Интернета вещей (см., например, [15–17]), искусственного интеллекта (см., например, [18–20]), больших данных (см., например, [21–23]), «облачных» технологий (см., например, [24–26]). Кроме того, анализируется роль аддитивного производства (см., например, [27 и 28]), меток RFID (см., например, [29 и 30]) и т. д.

Актуализированная для обследования в 2021 г. анкета наряду с различными индикаторами цифровой активности включила ряд вопросов, касающихся активности предприятия в области экологизации, что стало причиной появления используемой нами эмпирической базы, где в формате перекрестных данных совмещены сведения о внедрении технологий Индустрии 4.0 и различные показатели в области устойчивой промышленности.

Во-первых, нам доступны данные (оценки респондентов) о наличии на обследованном предприятии сертификата ИСО 14001, широко признаваемого самым важным типом экологической сертификации в мире [31]. Эта добровольная сертификация охватывает очень широкий спектр отраслей, включая всю обрабатывающую промышленность, распространена в более чем 170 странах и до сих пор с каждым годом набирает популярность. Данные о наличии сертификата

можно использовать в качестве довольно точного прокси-индикатора соответствия промышленного предприятия базовым принципам устойчивого производства, поскольку он предназначен для использования организациями, стремящимися систематически управлять своими экологическими обязанностями, что способствует устойчивому развитию.

Во-вторых, наряду с вопросами относительно внедрения технологий Индустрии 4.0 в анкете также представлен вопрос, касающийся внедрения «зеленых» промышленных технологий на предприятии, который позволяет раскрыть технологический аспект устойчивого развития предприятия. Данные использовались в бинарном формате «технология не внедрена» / «технология внедрена на каком-либо уровне», как в случае с технологиями Индустрии 4.0.

Эмпирическое моделирование основывается на эконометрической оценке с использованием моделей логистической регрессии с контролем региональных и отраслевых эффектов с помощью фиктивных переменных, а также численности занятых. Мы хотим оценить, насколько факт внедрения рассматриваемых технологий Индустрии 4.0 может быть статистически связан с соответствием предприятия базовым принципам устойчивого производства, оцениваемым через наличие сертификата ИСО 14001, а также с внедрением «зеленых» промышленных технологий на предприятии. Кроме проверки самого факта наличия статистической связи мы оцениваем ее относительную силу через расчет и сравнение средних предельных эффектов переменных, представляющих технологии Индустрии 4.0, на рассматриваемые зависимые переменные.

Следующий исследовательский вопрос, на который мы хотели бы ответить в этой статье, относительно соответствия технологий Индустрии 4.0 различным аспектам устойчивого производства, анализируется на базе группы вопросов об использовании на предприятии в текущем году цифровых технологий для повышения экологической и ресурсной эффективности по ряду направлений. Прежде всего, это направления экологизации процессного типа, связанные с оптимизацией и экологизацией процесса промышленного производства, а именно повышение энергоэффективности, эффективности водоиспользования и использования сырья, эффективности выбросов парниковых газов и загрязняющих веществ, эф-

фективности утилизации отходов, а также снижение материоемкости. Дополнительно в анкете присутствует блок вопросов, позволивших получить данные по экологизации энергопотребления: создание чистой и безопасной энергии, переход к возобновляемым источникам энергии.

Представленные направления экологизации соответствуют ЦУР ООН, а также экологической части критериев ESG. В частности, это ЦУР № 6 (связь с направлением «эффективность водоиспользования»), ЦУР № 7 («чистая и безопасная энергия», «переход к возобновляемым источникам энергии»), ЦУР № 12 («энергоэффективность», «эффективность водоиспользования и использования сырья», «эффективность утилизации отходов», «снижение материоемкости»), ЦУР № 13 («эффективность выбросов парниковых газов и загрязняющих веществ»). Экологические критерии ESG среди прочего включают в себя использование компанией возобновляемых источников энергии, ее программу управления отходами, то, как она решает потенциальные проблемы загрязнения воздуха или воды, возникающие в результате ее деятельности, а также ее действия относительно проблем изменения климата.

Безусловно, список рассматриваемых направлений ограничен возможностями анкеты, и нам сложнее судить о роли цифровых технологий, например, в повышении экологичности производимого промышленного продукта. Тем не менее, доступный нам список направлений, как представляется, достаточен для того, чтобы установить тенденции основных аспектов экологизации процесса промышленного производства. В работе мы аналогичным образом исследуем наличие связи между продвижением предприятия по обозначенным направлениям экологизации и уровнем внедрения рассматриваемых технологий Ин-

дустрии 4.0 с помощью эконометрической оценки на базе логит-моделей. Используется тот же набор контрольных переменных, что и выше: отрасль промышленности, регион и размер предприятия, измеряемый через численность занятых. Для количественной оценки вычисляются средние предельные эффекты переменных.

Наш последний исследовательский вопрос, касающийся мотивации предпринимателей при внедрении технологий Индустрии 4.0, изучается с помощью данных о том, как предприниматели оценивают разные типы выгод от внедрения цифровых технологий. Среди представленных видов выгод в анкете присутствуют выгоды от повышения экологичности (возможны варианты ответов «высокий уровень», «умеренный уровень», «низкий уровень», «затрудняюсь ответить» и отсутствие ответа). Преобразовав эти ответы в бинарный формат «выгоды присутствуют на высоком или умеренном уровне»/«выгоды присутствуют на низком уровне, нет ответа или затрудняюсь ответить», мы использовали полученный показатель в качестве зависимой бинарной переменной, которая анализировалась с помощью моделей логит-регрессий на перекрестных данных за 2021 г. с аналогичным набором контрольных переменных и количественными оценками, основанными на средних предельных эффектах.

Перед расчетом моделей выполнялась их проверка на наличие мультиколлинеарности с помощью вычисления коэффициента инфляции дисперсии (VIF), по результатам которой все модели были признаны соответствующими стандартам (коэффициент для всех переменных был ниже 2,5).

В таблице 1 представлен полный свод используемых в работе переменных с их описанием и краткими обозначениями.

Свод используемых переменных

Таблица 1

Переменная	Краткое обозначение	Описание
Наличие сертификата ИСО 14001	ISO	Бинарная зависимая переменная, отражающая наличие сертификата ИСО 14001 на предприятии (0 – сертификата нет, 1 – сертификат есть)
«Зеленые» промышленные технологии	Greentech	Бинарная зависимая переменная, отражающая уровень внедрения «зеленых» промышленных технологий на предприятии, по оценке респондента (0 – отсутствие внедрения, 1 – наличие внедрения)
Повышение энергоэффективности	Energy efficiency	Бинарная зависимая переменная, отражающая наличие использования на предприятии цифровых технологий для повышения энергоэффективности в текущем году, по оценке респондента (0 – нет использования, 1 – есть использование)

Переменная	Краткое обозначение	Описание
Создание чистой и безопасной энергии	Clean energy	Бинарная зависимая переменная, отражающая наличие использования на предприятии цифровых технологий для создания чистой и безопасной энергии в текущем году, по оценке респондента (0 – нет использования, 1 – есть использование)
Снижение материалоемкости	Material consum.	Бинарная зависимая переменная, отражающая наличие использования на предприятии цифровых технологий для снижения материалоемкости в текущем году, по оценке респондента (0 – нет использования, 1 – есть использование)
Повышение эффективности водоиспользования и использования сырья	Water and raw	Бинарная зависимая переменная, отражающая наличие использования на предприятии цифровых технологий для повышения эффективности водоиспользования и использования сырья в текущем году, по оценке респондента (0 – нет использования, 1 – есть использование)
Повышение эффективности выбросов парниковых газов и загрязняющих веществ (углеродной эффективности)	Carbon efficiency	Бинарная зависимая переменная, отражающая наличие использования на предприятии цифровых технологий для повышения эффективности выбросов парниковых газов и загрязняющих веществ (углеродной эффективности) в текущем году, по оценке респондента (0 – нет использования, 1 – есть использование)
Переход к возобновляемым источникам энергии	Renewables	Бинарная зависимая переменная, отражающая наличие использования на предприятии цифровых технологий для перехода к возобновляемым источникам энергии в текущем году, по оценке респондента (0 – нет использования, 1 – есть использование)
Утилизация отходов	Waste management	Бинарная зависимая переменная, отражающая наличие использования на предприятии цифровых технологий для утилизации отходов в текущем году, по оценке респондента (0 – нет использования, 1 – есть использование)
Повышение экологичности	Environmental benefits	Бинарная зависимая переменная, отражающая уровень дивидендов (выгод) в виде повышения экологичности, которые предприятие получает от внедрения цифровых технологий, по оценке респондента (0 – выгоды присутствуют на низком уровне, нет ответа или затрудняюсь ответить, 1 – выгоды присутствуют на высоком или умеренном уровне)
Технологии искусственного интеллекта (нейронные сети и машинное обучение)	AI	Бинарная независимая переменная, отражающая факт внедрения на предприятии технологий искусственного интеллекта (нейронных сетей и машинного обучения), по оценке респондента (0 – нет внедрения, 1 – есть внедрение)
Аддитивные технологии (3D-печать)	3D printing	Бинарная независимая переменная, отражающая факт внедрения на предприятии аддитивных технологий (3D-печати), по оценке респондента (0 – нет внедрения, 1 – есть внедрение)
Интернет вещей	IoT	Бинарная независимая переменная, отражающая факт внедрения на предприятии технологий Интернета вещей, по оценке респондента (0 – нет внедрения, 1 – есть внедрение)
Хранение информации и проведение вычислений на распределенных ресурсах («облачные» технологии, «границевые» технологии)	Cloud	Бинарная независимая переменная, отражающая факт внедрения на предприятии технологий, предполагающих хранение информации и проведение вычислений на распределенных ресурсах («облачные» технологии, «границевые» технологии), по оценке респондента (0 – нет внедрения, 1 – есть внедрение)
Технологии радиочастотной идентификации (RFID)	RFID	Бинарная независимая переменная, отражающая факт внедрения на предприятии технологий радиочастотной идентификации (RFID), по оценке респондента (0 – нет внедрения, 1 – есть внедрение)
Технологии сбора, обработки, анализа больших объемов данных	Big data	Бинарная независимая переменная, отражающая факт внедрения на предприятии технологий сбора, обработки, анализа больших объемов данных, по оценке респондента (0 – нет внедрения, 1 – есть внедрение)
Подотрасль обрабатывающей промышленности согласно классификатору ОКВЭД2 (второй уровень иерархии)	Industry	Категориальная контрольная независимая переменная, отражающая принадлежность предприятия к одному из 24-х видов экономической деятельности в рамках обрабатывающих производств (код С) согласно классификатору ОКВЭД2
Субъект Российской Федерации (регион), в котором зарегистрировано предприятие	Region	Категориальная контрольная независимая переменная, отражающая географическую локализацию предприятия в одном из 30-ти субъектов (регионов) Российской Федерации
Численность занятых	Size	Порядковая контрольная независимая переменная (в моделях рассматривается как непрерывная переменная). Отражает численность занятых на предприятии. Принимает значения от 1 до 12 согласно следующему принципу (ранжирование используется в опросной анкете): 1: 1–50 занятых 7: 301–350 занятых 2: 51–100 занятых 8: 351–400 занятых 3: 101–150 занятых 9: 401–450 занятых 4: 151–200 занятых 10: 451–500 занятых 5: 201–250 занятых 11: 501–1000 занятых 6: 251–300 занятых 12: более 1000 занятых

Результаты

В таблице 2 представлены результаты расчета двух логит-моделей, соответствующих первому и второму исследовательским вопросам, обозначенным в начале работы. В целом полученные результаты указывают на то, что о возможной связи между внедрением технологий Индустрии 4.0 и соответствием предприятия базовым критериям устойчивого производства следует говорить с большой осторожностью. Среди шести рассматриваемых технологий только AI оказалась статистически значимым предиктором наличия у предприятия сертификата ИСО 14001 – и то лишь на слабом уровне значимости. Согласно рассчитанному среднему предельному эффекту, если на предприятии внедрена технология искусственного интеллекта, то вероятность обладания сертификатом увеличивается на 4,3%.

Впрочем, иначе обстоят дела в случае с «зелеными» промышленными технологиями, для которых связь с Индустрией 4.0 была обнаружена в случае пять из шести рассматриваемых нами технологий (все за исключением «облачных» вычислений) на очень высоких уровнях значимости. Как следует из средних предельных эффектов этих переменных, наименьшей в количественном плане была роль аддитивных технологий (увеличение вероятности использования «зеленых» промышленных технологий на 6,6% при использовании 3D-печати), а наибольшей – больших данных (10,4%). Между этими технологиями близко друг к другу расположились AI (9,2%), Интернет вещей и метки RFID (по 10,1%).

Таблица 2
Результаты расчета логит-моделей с зависимыми переменными ISO и Greentech¹⁴

Переменная	Модель № 1 (ISO)		Модель № 2 (Greentech)	
	Коэффициент (Стандартная ошибка)	Средний предельный эффект – для значимых предикторов	Коэффициент (Стандартная ошибка)	Средний предельный эффект – для значимых предикторов
AI	0,456* (0,261)	0,043	1,584*** (0,32)	0,092
3D printing	-0,197 (0,34)		1,126*** (0,334)	0,066
IoT	0,09 (0,352)		1,728*** (0,357)	0,101
Cloud	0,152 (0,318)		0,407 (0,325)	
RFID	-0,213 (0,313)		1,739*** (0,307)	0,101
Big data	-0,276 (0,298)		1,781*** (0,293)	0,104

Примечание. *** p < 0,01, ** p < 0,05, * p < 0,1.

Источник: расчеты авторов.

Рассмотрим теперь результаты по отдельным направлениям экологизации промышленного производства с помощью цифровых технологий, касающиеся третьего исследовательского вопроса. В таблице 3 представлены результаты расчета моделей для таких направлений, как повышение энергоэффективности и создание чистой и безопасной энергии. В первом случае на высоком уровне значимой оказалась технология искусственного интеллекта (вероятность использования цифровых технологий для повышения энергоэффективности выше на 12,5% для тех предприятий, которые используют эту технологию), а технология Интернета вещей была значимой на слабом уровне в обоих случаях (пре-

дельный эффект равен 7,5% для повышения энергоэффективности и 4,8% для чистой и безопасной энергии). Кроме того, для чистой и безопасной энергии на слабом уровне значимой оказалась технология больших данных (предельный эффект – 4,4%).

В таблице 4 даны результаты моделей по снижению материоемкости и повышению эффективности водоиспользования и использования сырья. Была обнаружена статистическая связь между внедрением технологии больших данных и использованием цифровых технологий для снижения материоемкости (на среднем уровне значимости, предельный эффект – 5,1%), связь между внедрением AI и использованием

¹⁴ Здесь и далее константа и контрольные переменные опущены.

Таблица 3

Результаты расчета логит-моделей с зависимыми переменными Energy efficiency и Clean energy

Переменная	Модель № 3 (Energy efficiency)		Модель № 4 (Clean energy)	
	Коэффициент (Стандартная ошибка)	Средний предельный эффект – для значимых предикторов	Коэффициент (Стандартная ошибка)	Средний предельный эффект – для значимых предикторов
AI	0,958*** (0,231)	0,125	-0,077 (0,432)	
3D printing	-0,312 (0,3)		-0,128 (0,518)	
IoT	0,572* (0,309)	0,075	1,033* (0,513)	0,048
Cloud	-0,138 (0,277)		0,147 (0,473)	
RFID	0,048 (0,259)		-0,112 (0,427)	
Big data	0,193 (0,245)		0,958* (0,414)	0,044

Примечание. *** p < 0,01, ** p < 0,05, * p < 0,1.

Источник: расчеты авторов.

цифровых технологий для снижения материальноемкости (на слабом уровне значимости, предельный эффект – 4,3%) и повышения эффективности водоиспользования и использования сырья (на высоком уровне значимости, предельный эффект – 8,9%), а также связь между внедре-

нием технологий «облачных» вычислений и повышением эффективности водоиспользования и использования сырья с помощью цифровых технологий (на слабом уровне значимости, предельный эффект – 5,9%).

Таблица 4

Результаты расчета логит-моделей с зависимыми переменными Material consum. и Water and raw

Переменная	Модель № 5 (Material consum.)		Модель № 6 (Water and raw)	
	Коэффициент (Стандартная ошибка)	Средний предельный эффект – для значимых предикторов	Коэффициент (Стандартная ошибка)	Средний предельный эффект – для значимых предикторов
AI	0,614* (0,338)	0,043	0,741*** (0,24)	0,089
3D printing	0,176 (0,407)		-0,085 (0,305)	
IoT	-0,228 (0,429)		0,034 (0,316)	
Cloud	0,459 (0,375)		0,495* (0,271)	0,059
RFID	0,166 (0,374)		-0,126 (0,276)	
Big data	0,723** (0,346)	0,051	0,128 (0,255)	

Примечание. *** p < 0,01, ** p < 0,05, * p < 0,1.

Источник: расчеты авторов.

В таблице 5 приведены результаты, касающиеся моделей по повышению углеродной эффективности и использованию возобновляемых источников энергии. Здесь, прежде всего, обращает на себя внимание неожиданный результат, согласно которому внедрение 3D-печати статистически снижает вероятность использования цифровых технологий как для повышения углеродной эффективности (на высоком уровне значимости, отрицательный предельный эффект – 7,8%), так и для перехода к возобновляемым источникам

энергии (на слабом уровне значимости, отрицательный предельный эффект – 2,2%). Остальные результаты более предсказуемы: это положительная роль AI (предельные эффекты – 5,5% в первом и 1,9% – во втором случае), больших данных (предельные эффекты – 4,4% в первом и 2,7% – во втором случае), а также позитивная роль на слабом уровне значимости Интернета вещей для использования цифровых технологий для повышения углеродной эффективности (предельный эффект – 3,9%).

Таблица 5

Результаты расчета логит-моделей с зависимыми переменными Carbon efficiency и Renewables

Переменная	Модель № 7 (Carbon efficiency)		Модель № 8 (Renewables)	
	Коэффициент (Стандартная ошибка)	Средний предельный эффект – для значимых предикторов	Коэффициент (Стандартная ошибка)	Средний предельный эффект – для значимых предикторов
AI	1,189*** (0,384)	0,055	2* (1,18)	0,019
3D printing	-1,697*** (0,531)	-0,078	-2,341* (1,318)	-0,022
IoT	0,846* (0,485)	0,039	0,507 (1,296)	
Cloud	0,187 (0,438)		1,447 (1,302)	
RFID	-0,174 (0,438)		0,179 (1,16)	
Big data	0,967** (0,393)	0,044	2,876** (1,316)	0,027

Примечание. *** p < 0,01, ** p < 0,05, * p < 0,1.

Источник: расчеты авторов.

Наконец, в таблице 6 представлены результаты относительно утилизации отходов. Здесь единственной значимой переменной оказался AI: внедрение этой технологии на 6,7% повышает вероятность использования цифровых технологий по данному направлению устойчивого развития.

Таблица 6

Результаты расчета логит-модели с зависимой переменной Waste management

Переменная	Модель № 9 (Waste management)	
	Коэффициент (Стандартная ошибка)	Средний предельный эффект – для значимых предикторов
AI	0,475** (0,22)	0,067
3D printing	-0,305 (0,283)	
IoT	0,179 (0,292)	
Cloud	-0,022 (0,249)	
RFID	-0,242 (0,254)	
Big data	0,39 (0,239)	

Примечание. ** p < 0,05.

Источник: расчеты авторов.

Перейдем теперь к четвертому исследовательскому вопросу, который изучается с помощью модели, результаты которой описаны в таблице 7. Они показывают, что внедрение двух технологий, а именно AI и больших данных, было статистически связано с большей вероятностью для респондента указать на экологические выгоды от использования цифровых технологий. Для AI увеличение вероятности в среднем составило 10,1%, а для больших данных – 9,6%.

Таблица 7
Результаты расчета логит-модели с зависимой переменной Environmental benefits

Переменная	Модель № 10 (Environmental benefits)	
	Коэффициент (Стандартная ошибка)	Средний предельный эффект – для значимых предикторов
AI	0,485*** (0,183)	0,101
3D printing	-0,067 (0,23)	
IoT	0,107 (0,247)	
Cloud	0,171 (0,208)	
RFID	0,016 (0,205)	
Big data	0,46** (0,194)	0,096

Примечание. *** p < 0,01, ** p < 0,05.

Источник: расчеты авторов.

Заключение

Таким образом, наши результаты свидетельствуют о том, что хотя и на технологическом уровне связь между развитием в области Индустрии 4.0 и области «зеленых» промышленных технологий вполне однозначна, с точки зрения соответствия предприятия критериям устойчивого производства мы скорее не можем говорить о существенной роли технологий Индустрии 4.0 на данном этапе обследований.

Тем не менее, в полученных результатах явно просматривается важная роль технологии искусственного интеллекта, которая оказалась положительным статистически значимым предиктором для наличия у предприятия сертификата

ISO 14001, внедрения «зеленых» промышленных технологий и продвижения по практическим всем отдельным направлениям экологизации, рассмотренным в статье. Следом по важности шли большие данные, значимый предиктор внедрения «зеленых» технологий и продвижения по четырем из шести рассмотренных направлений экологизации с помощью цифровых технологий. Замыкал тройку «лидеров» Интернет вещей, который также показал себя значимым предиктором внедрения «зеленых» технологий и продвижения по трем из шести рассмотренных направлений экологизации.

Технология меток RFID не оказалась связанной с какими-то отдельными видами экологических выгод от внедрения цифровых технологий, которые отмечались респондентами, хотя и была значимым предиктором внедрения «зеленых» промышленных технологий. «Облачные» вычисления были единственной технологией, внедрение которой не означало повышение вероятности внедрения «зеленых» промышленных технологий, однако для них была выявлена возможная связь с продвижением в области повышения эффективности водоиспользования и использования сырья.

Роль 3D-печати получилась противоречивой. Несмотря на то, что связь между внедрением аддитивных и «зеленых» промышленных технологий была положительной, по отдельным направлениям экологизации для 3D-печати были выявлены только негативные статистические связи. В частности, это коснулось продвижения в области углеродной эффективности и перехода к возобновляемым источникам энергии. Несмотря на большой потенциал аддитивного производства с точки зрения сокращения влияния на окружающую среду, его использование связано с рядом дополнительных вызовов, которые, возможно, повлияли на результаты: во многих процессах аддитивного производства вспомогательное оборудование является значительным источником отходов, и решить эту проблему по-прежнему сложно [32], а также этот тип производства требует большого количества энергии, что напрямую связано с выбросами углекислого газа в атмосферу [33 и 34].

Наши результаты относительно восприятия экологических выгод от использования цифровых технологий самими респондентами показывают, что их понимание согласуется с реальной картиной. Важные экологические выгоды от цифровых

технологий чаще отмечали именно те респонденты, на предприятиях которых были внедрены технологии искусственного интеллекта и больших данных, которые стали ключевыми технологиями Индустрии 4.0 для устойчивого развития производства в России.

Из полученных результатов не следует вывод о большей или меньшей применимости определенных технологий Индустрии 4.0 как таковых для целей устойчивой промышленности. Они только характеризуют ситуацию на текущих этапах промышленного развития, где важнейшим инструментом извлечения ценности, включая экологическую ценность, становится «умная» работа с данными. Дальнейшие исследования, опирающиеся на информацию о динамике как технологического, так и экологического развития позволят оценить, насколько эти результаты устойчивы. Тем не менее, наши выводы призывают тех, перед кем стоят задачи в области экологизации обрабатывающей промышленности, обратить сейчас наиболее пристальное внимание на решения в области искусственного интеллекта, больших данных, а также Интернета вещей.

Литература

1. Kumar M., Mani M. Sustainability Assessment in Manufacturing: Perspectives, Challenges, and Solutions. Sustainable Manufacturing / Gupta K., Saloniatis K. Elsevier, 2021. Ch. 11. P. 287–311. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818115-7.00013-4>.
2. Ghobakhloo M. et al. Industry 4.0 Ten Years On: A Bibliometric and Systematic Review of Concepts, Sustainability Value Drivers, and Success Determinants // Journal of Cleaner Production. 2021. Vol. 302. Article 127052. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127052>.
3. Chen X., Despeisse M., Johansson B. Environmental Sustainability of Digitalization in Manufacturing: A Review // Sustainability. 2020. Vol. 12. No. 24. Article 10298. doi: <https://doi.org/10.3390/su122410298>.
4. Costa I. et al. The Degree of Contribution of Digital Transformation Technology on Company Sustainability Areas // Sustainability. 2022. Vol. 14. No. 1. P. 462. doi: <https://doi.org/10.3390/su14010462>.
5. Enyoghasi C., Badurdeen F. Industry 4.0 for Sustainable Manufacturing: Opportunities at the Product, Process, and System Levels // Resources, Conservation and Recycling. 2021. Vol. 166. Article 105362. doi: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105362>.
6. Sharma R., Jabbour C.J.C., Lopes de Sousa Jabbour A.B. Sustainable Manufacturing and Industry 4.0: What We Know and What We Don't // Journal of Enterprise Information Management. 2021. Vol. 34. No.1. P. 230–266. doi: <https://doi.org/10.1108/JEIM-01-2020-0024>.

7. **Machado C.G., Winroth M.P., Ribeiro da Silva E.H.D.** Sustainable Manufacturing in Industry 4.0: An Emerging Research Agenda // International Journal of Production Research. 2020. Vol. 58. No. 5. P. 1462–1484. doi: <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1652777>.
8. **Acerbi F., Taisch M.** A Literature Review on Circular Economy Adoption in the Manufacturing Sector // Journal of Cleaner Production. 2020. Vol. 273. Article 123086. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123086>.
9. **Brozzi R.** et al. The Advantages of Industry 4.0 Applications for Sustainability: Results from a Sample of Manufacturing Companies // Sustainability. 2020. Vol. 12. No. 9. P. 3647. doi: <https://doi.org/10.3390/su12093647>.
10. **Jamwal A.** et al. Industry 4.0 Technologies for Manufacturing Sustainability: A Systematic Review and Future Research Directions // Applied Sciences. 2021. Vol. 11. No. 12. P. 5725. doi: <https://doi.org/10.3390/app11125725>.
11. **Raj A.** et al. Barriers to the Adoption of Industry 4.0 Technologies in the Manufacturing Sector: An Inter-Country Comparative Perspective // International Journal of Production Economics. 2020. Vol. 224. Article 107546. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.107546>.
12. **Oztemel E., Gursev S.** Literature Review of Industry 4.0 and Related Technologies // Journal of Intelligent Manufacturing. 2020. Vol. 31. No. 1. P. 127–182. doi: <https://doi.org/10.1007/s10845-018-1433-8>.
13. **Klingenbergs C.O., Borges M.A.V., Antunes Jr J.A.V.** Industry 4.0 as a Data-Driven Paradigm: A Systematic Literature Review on Technologies // Journal of Manufacturing Technology Management. 2021. Vol. 32. No. 3. P. 570–592. doi: <https://doi.org/10.1108/JMTM-09-2018-0325>.
14. **Frank A.G., Dalenogare L.S., Ayala N.F.** Industry 4.0 Technologies: Implementation Patterns in Manufacturing Companies // International Journal of Production Economics. 2019. Vol. 210. P. 15–26. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.01.004>.
15. **Ranta V., Aarikka-Stenroos L., Väisänen J.M.** Digital Technologies Catalyzing Business Model Innovation for Circular Economy – Multiple Case Study // Resources, Conservation and Recycling. 2021. Vol. 164. Article 105155. doi: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105155>.
16. **Ingemarsdotter E., Jamsin E., Balkenende R.** Opportunities and Challenges in IoT-Enabled Circular Business Model Implementation – A case study // Resources, Conservation and Recycling. 2020. Vol. 162. Article 105047. doi: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105047>.
17. **Jagtap S., Rahimifard S.** The Digitisation of Food Manufacturing to Reduce Waste – Case study of a Ready Meal Factory // Waste Management. 2019. Vol. 87. P. 387–397. doi: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.02.017>.
18. **Jones P., Wynn M.** The Leading Digital Technology Companies and Their Approach to Sustainable Development // Sustainability. 2021. Vol. 13. No. 12. P. 6612. doi: <https://doi.org/10.3390/su13126612>.
19. **Gan V.J.** et al. Simulation Optimisation Towards Energy Efficient Green Buildings: Current Status and Future Trends // Journal of Cleaner Production. 2020. Vol. 254. Article 120012. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120012>.
20. **Bonilla S.H.** et al. Industry 4.0 and Sustainability Implications: A Scenario-Based Analysis of the Impacts and Challenges // Sustainability. 2018. Vol. 10. No. 10. P. 3740. doi: <https://doi.org/10.3390/su10103740>.
21. **Kumar N., Kumar G., Singh R.K.** Big Data Analytics Application for Sustainable Manufacturing Operations: Analysis of Strategic Factors // Clean Technologies and Environmental Policy. 2021. Vol. 23. No. 3. P. 965–989. doi: <https://doi.org/10.1007/s10098-020-02008-5>.
22. **Bag S.** et al. Big Data Analytics as an Operational Excellence Approach to Enhance Sustainable Supply Chain Performance // Resources, Conservation and Recycling. 2020. Vol. 153. Article 104559. doi: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104559>.
23. **Singh S.K., El-Kassar A.N.** Role of Big Data Analytics in Developing Sustainable Capabilities // Journal of Cleaner Production. 2019. Vol. 213. P. 1264–1273. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.199>.
24. **Mourtzis D.** et al. A Cloud-Based Resource Planning Tool for the Production and Installation of Industrial Product Service Systems (IPSS) // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2020. Vol. 106. No. 11. P. 4945–4963. doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04746-3>.
25. **Ávila-Gutiérrez M.J.** et al. Eco-Holonic 4.0 Circular Business Model to Conceptualize Sustainable Value Chain towards Digital Transition // Sustainability. 2020. Vol. 12. No. 5. P. 1889. doi: <https://doi.org/10.3390/su12051889>.
26. **Savastano M.** et al. Contextual Impacts on Industrial Processes Brought by the Digital Transformation of Manufacturing: A Systematic Review // Sustainability. 2019. Vol. 11. No. 3. P. 891. doi: <https://doi.org/10.3390/su11030891>.
27. **Godina R.** et al. Impact Assessment of Additive Manufacturing on Sustainable Business Models in Industry 4.0 Context // Sustainability. 2020. Vol. 12. No. 17. P. 7066. doi: <https://doi.org/10.3390/su12177066>.
28. **Výtisk J.** et al. Current Options in the Life Cycle Assessment of Additive Manufacturing Products // Open Engineering. 2019. Vol. 9. No. 1. P. 674–682. doi: <https://doi.org/10.1515/eng-2019-0073>.
29. **Varriale V.** et al. Sustainable Supply Chains with Blockchain, IoT and RFID: A Simulation on Order Management // Sustainability. 2021. Vol. 13. No. 11. P. 6372. doi: <https://doi.org/10.3390/su13116372>.
30. **Denuwara N., Maijala J., Hakovirta M.** Sustainability Benefits of RFID Technology in the Apparel Industry. // Sustainability. 2019. Vol. 11. No. 22. P. 6477. doi: <https://doi.org/10.3390/su11226477>.
31. **Sartor M.** et al. ISO 14001 Standard: Literature Review and Theory-Based Research Agenda // Quality Management Journal. 2019. Vol. 26. No. 1. P. 32–64. doi: <https://doi.org/10.1080/10686967.2018.1542288>.
32. **Li T., Yeo J.** Strengthening the Sustainability of Additive Manufacturing through Data-Driven Approaches and Workforce Development // Advanced Intelligent Systems. 2021. Vol. 3. No. 12. Article 2100069. doi: <https://doi.org/10.1002/aisy.202100069>.

33. Shuaib M. et al. Impact of 3D Printing on the Environment: A Literature-Based Study // Sustainable Operations and Computers. 2021. Vol. 2. P. 57–63. doi: <https://doi.org/10.1016/j.susoc.2021.04.001>.

34. Rejeski D., Zhao F., Huang Y. Research Needs and Recommendations on Environmental Implications of Additive Manufacturing // Additive Manufacturing. 2018. Vol. 19. P. 21–28. doi: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.10.019>.

Информация об авторах

Лола Инна Сергеевна – канд. экон. наук, заместитель директора Центра конъюнктурных исследований Института статистических исследований и экономики знаний, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики». 101000, г. Москва, Славянская пл., д. 4, стр. 2. E-mail: ilola@hse.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0974-8723>.

Бакеев Мурат Булатович – аналитик Центра конъюнктурных исследований Института статистических исследований и экономики знаний, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики». 101000, г. Москва, Славянская пл., д. 4, стр. 2. E-mail: mbakeev@hse.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3144-2544>.

Финансирование

Статья подготовлена в рамках Программы фундаментальных исследований Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики».

References

1. Kumar M., Mani M. Sustainability Assessment in Manufacturing: Perspectives, Challenges, and Solutions. In: Gupta K., Salonitis K. (eds) *Sustainable Manufacturing*. Ch. 11. Elsevier; 2021. P. 287–311. Available from: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818115-7.00013-4>.
2. Ghobakhloo M. et al. Industry 4.0 Ten Years on: A Bibliometric and Systematic Review of Concepts, Sustainability Value Drivers, and Success Determinants. *Journal of Cleaner Production*. 2021;302:127052. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127052>.
3. Chen X., Despeisse M., Johansson B. Environmental Sustainability of Digitalization in Manufacturing: A Review. *Sustainability*. 2020;12(24):10298. Available from: <https://doi.org/10.3390/su122410298>.
4. Costa I. et al. The Degree of Contribution of Digital Transformation Technology on Company Sustainability Areas. *Sustainability*. 2022;14(1):462. Available from: <https://doi.org/10.3390/su14010462>.
5. Enyoghasi C., Badurdeen F. Industry 4.0 for Sustainable Manufacturing: Opportunities at the Product, Process, and System Levels. *Resources, Conservation and Recycling*. 2021;166:105362. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105362>.
6. Sharma R., Jabbour C.J.C., Lopes de Sousa Jabbour A.B. Sustainable Manufacturing and Industry 4.0: What We Know and What We Don't. *Journal of Enterprise Information Management*. 2021;34(1):230–266. Available from: <https://doi.org/10.1108/JEIM-01-2020-0024>.
7. Machado C.G., Winroth M.P., Ribeiro da Silva E.H.D. Sustainable Manufacturing in Industry 4.0: An Emerging Research Agenda. *International Journal of Production Research*. 2020;58(5):1462–1484. Available from: <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1652777>.
8. Acerbi F., Taisch M. A Literature Review on Circular Economy Adoption in the Manufacturing Sector. *Journal of Cleaner Production*. 2020;273:123086. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123086>.
9. Brozzi R. et al. The Advantages of Industry 4.0 Applications for Sustainability: Results from a Sample of Manufacturing Companies. *Sustainability*. 2020;12(9):3647. Available from: <https://doi.org/10.3390/su12093647>.
10. Jamwal A. et al. Industry 4.0 Technologies for Manufacturing Sustainability: A Systematic Review and Future Research Directions. *Applied Sciences*. 2021;11(12):5725. Available from: <https://doi.org/10.3390/app11125725>.
11. Raj A. et al. Barriers to the Adoption of Industry 4.0 Technologies in the Manufacturing Sector: An Inter-Country Comparative Perspective. *International Journal of Production Economics*. 2020;224:107546. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.107546>.
12. Oztemel E., Gursev S. Literature Review of Industry 4.0 and Related Technologies. *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2020;31(1):127–182. Available from: <https://doi.org/10.1007/s10845-018-1433-8>.
13. Klingenberg C.O., Borges M.A.V., Antunes Jr J.A.V. Industry 4.0 as a Data-Driven Paradigm: A Systematic Literature Review on Technologies. *Journal of Manufacturing Technology Management*. 2021;32(3):570–592. Available from: <https://doi.org/10.1108/JMTM-09-2018-0325>.
14. Frank A.G., Dalenogare L.S., Ayala N.F. Industry 4.0 Technologies: Implementation Patterns in Manufacturing Companies. *International Journal of Production Economics*. 2019;210:15–26. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.01.004>.
15. Ranta V., Aarikka-Stenroos L., Väistönen J.M. Digital Technologies Catalyzing Business Model Innovation for Circular Economy – Multiple Case Study. *Resources, Conservation and Recycling*. 2021;164:105155. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105155>.
16. Ingemarsdotter E., Jamsin E., Balkenende R. Opportunities and Challenges in IoT-Enabled Circular Business

- Model Implementation – A case study. *Resources, Conservation and Recycling*. 2020;162:105047. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105047>.
17. Jagtap S., Rahimifard S. The Digitisation of Food Manufacturing to Reduce Waste – Case Study of a Ready Meal Factory. *Waste Management*. 2019;87:387–397. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.02.017>.
 18. Jones P., Wynn M. The Leading Digital Technology Companies and Their Approach to Sustainable Development. *Sustainability*. 2021;13(12):6612. Available from: <https://doi.org/10.3390/su13126612>.
 19. Gan V.J. et al. Simulation Optimisation Towards Energy Efficient Green Buildings: Current Status and Future Trends. *Journal of Cleaner Production*. 2020; 254:120012. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120012>.
 20. Bonilla S.H. et al. Industry 4.0 and Sustainability Implications: A Scenario-Based Analysis of the Impacts and Challenges. *Sustainability*. 2018;10(10):3740. Available from: <https://doi.org/10.3390/su10103740>.
 21. Kumar N., Kumar G., Singh R.K. Big Data Analytics Application for Sustainable Manufacturing Operations: Analysis of Strategic Factors. *Clean Technologies and Environmental Policy*. 2021;23(3):965–989. Available from: <https://doi.org/10.1007/s10098-020-02008-5>.
 22. Bag S. et al. Big Data Analytics as an Operational Excellence Approach to Enhance Sustainable Supply Chain Performance. *Resources, Conservation and Recycling*. 2020;153:104559. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104559>.
 23. Singh S.K., El-Kassar A.N. Role of Big Data Analytics in Developing Sustainable Capabilities. *Journal of Cleaner Production*. 2019;213:1264–1273. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.199>.
 24. Mourtzis D. et al. A Cloud-Based Resource Planning Tool for the Production and Installation of Industrial Product Service Systems (IPSS). *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2020;106(11):4945–4963. Available from: <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04746-3>.
 25. Ávila-Gutiérrez M.J. et al. Eco-Holonic 4.0 Circular Business Model to Conceptualize Sustainable Value Chain towards Digital Transition. *Sustainability*. 2020;12(5):1889. Available from: <https://doi.org/10.3390/su12051889>.
 26. Savastano M. et al. Contextual Impacts on Industrial Processes Brought by the Digital Transformation of Manufacturing: A Systematic Review. *Sustainability*. 2019; 11(3):891. Available from: <https://doi.org/10.3390/su11030891>.
 27. Godina R. et al. Impact Assessment of Additive Manufacturing on Sustainable Business Models in Industry 4.0 Context. *Sustainability*. 2020;12(17):7066. Available from: <https://doi.org/10.3390/su12177066>.
 28. Výtisk J. et al. Current Options in the Life Cycle Assessment of Additive Manufacturing Products. *Open Engineering*. 2019;9(1):674–682. Available from: <https://doi.org/10.1515/eng-2019-0073>.
 29. Varriale V. et al. Sustainable Supply Chains with Blockchain, IoT and RFID: A Simulation on Order Management. *Sustainability*. 2021;13(11):6372. Available from: <https://doi.org/10.3390/su13116372>.
 30. Denuwara N., Maijala J., Hakovirta M. Sustainability Benefits of RFID Technology in the Apparel Industry. *Sustainability*. 2019;11(22):6477. Available from: <https://doi.org/10.3390/su11226477>.
 31. Sartor M. et al. ISO 14001 Standard: Literature Review and Theory-Based Research Agenda. *Quality Management Journal*. 2019;26(1):32–64. Available from: <https://doi.org/10.1080/10686967.2018.1542288>.
 32. Li T., Yeo J. Strengthening the Sustainability of Additive Manufacturing through Data-Driven Approaches and Workforce Development. *Advanced Intelligent Systems*. 2021;3(12):2100069. Available from: <https://doi.org/10.1002/aisy.202100069>.
 33. Shuaib M. et al. Impact of 3D Printing on the Environment: A Literature-Based Study. *Sustainable Operations and Computers*. 2021;2:57–63. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.susoc.2021.04.001>.
 34. Rejeski D., Zhao F., Huang Y. Research Needs and Recommendations on Environmental Implications of Additive Manufacturing. *Additive Manufacturing*. 2018;19:21–28. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.10.019>.

About the authors

Inna S. Lola – Cand. Sci. (Econ.), Deputy Director, Centre for Business Tendency Studies, Institute for Statistical Studies and Economics of Knowledge, National Research University Higher School of Economics (HSE University). 4, Slavyanskaya Sq., Bld. 2, Moscow, 101000, Russia. E-mail: ilola@hse.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0974-8723>.

Murat B. Bakeev – Analyst, Centre for Business Tendency Studies, Institute for Statistical Studies and Economics of Knowledge, National Research University Higher School of Economics (HSE University). 4, Slavyanskaya Sq., Bld. 2, Moscow, 101000, Russia. E-mail: mbakeev@hse.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3144-2544>.

Funding

The article is based on the study funded by the Basic Research Program of the HSE University.