

## Предпосылки, возможности и риски перспективного развития нанотехнологий на глобальном уровне

Жанна Викторовна Писаренко<sup>1,2\*</sup> , Наталия Александровна Симченко<sup>1</sup> , Леонид Алексеевич Иванов<sup>2</sup> ,  
Вэнькай Се<sup>3</sup> , Гульмира Анатольевна Насырова<sup>4</sup> 

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Российская инженерная академия, Москва, Россия

<sup>3</sup> Чжэцзянский университет Ванли, Центр исследований России и Центральной Азии, Научно-исследовательское подразделение Института морского Шёлкового пути, Нинбо, Китай

<sup>4</sup> Республиканский научно-исследовательский институт по охране труда Министерства труда и социальной защиты населения Республики Казахстан, Астана, Казахстан

\* Автор, ответственный за переписку: e-mail: z.pisarenko@spbu.ru

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Исследования показали, что современное научно-технологическое развитие тесно связано с ростом интеллектуализации производственных отношений, появлением новых технологий, что, в свою очередь, приводит к актуализации понимания и противодействия угроз в области цифровой, энергетической, климатической, ментальной безопасности. Раскрыто конвергентное содержание в развитии нанотехнологий. **Целью** работы является обоснование предпосылок, возможностей и идентификация рисков перспективного развития нанотехнологий на глобальном уровне. **Методы и материалы.** Использование междисциплинарного подхода, основанного на конвергентной природе развития современного технологического базиса, является значимым в исследовании предпосылок и закономерностей перспективного развития нанотехнологий на глобальном уровне. **Результаты и обсуждение.** На основе проведенных исследований в области применения нанотехнологий в стратегически значимых отраслях промышленности предложены постулаты новой мировоззренческой концепции изучения перспективного развития нанотехнологий, которые базируются на цельной концепции взаимоувязывания таких важнейших составляющих: предпосылки возникновения угроз; угрозы и их идентификация; факторы, влияющие на возникновение и проявление угроз; проблемы; риски, влияющие на усугубление действия негативных факторов. Выделены и обоснованы социокультурные, технократические и институциональные предпосылки изучения возможностей и рисков перспективного развития нанотехнологий. **Заключение.** Представлена взаимообусловленность социокультурных, технократических и институциональных предпосылок и возможностей возникновения угроз и рисков перспективного развития нанотехнологий. Обоснована важность институционального регулирования перспективного развития нанотехнологий с учетом целого ряда возникающих институциональных ловушек на стыке использования нанотехнологий в отдельных отраслях. Предложены рекомендации по институциональному регулированию развития нанотехнологий.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** нанотехнологии, конвергенция, социокультурные предпосылки, технократические предпосылки, институциональные предпосылки, риски, перспективы развития

**БЛАГОДАРНОСТИ:** Данное исследование выполнено при поддержке Лаборатории азиатских экономических исследований Санкт-Петербургского государственного университета, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

### ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Писаренко Ж.В., Симченко Н.А., Иванов Л.А., Се В., Насырова Г.А. Предпосылки, возможности и риски перспективного развития нанотехнологий на глобальном уровне. *Нанотехнологии в строительстве*. 2025;17(6):775–786. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-6-775-786>. – EDN: RBJCOI.

## Prerequisites, opportunities and risks for the future development of nanotechnology at the global level

Zhanna V. Pisarenko<sup>1,2\*</sup> , Natalia A. Simchenko<sup>1</sup> , Leonid A. Ivanov<sup>2</sup> , Wenkai Xie<sup>3</sup> , Gulmira A. Nasyrova<sup>4</sup> 

<sup>1</sup> St. Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russia

<sup>2</sup> Russian Academy of Engineering, Moscow, Russia

<sup>3</sup> Zhejiang Wanli University Ningbo Maritime Silk Road Institute, Ningbo, China

<sup>4</sup> Republican Research Institute for Occupational Safety and Health; Astana, Republic of Kazakhstan

\* Corresponding author: e-mail: z.pisarenko@spbu.ru

### ABSTRACT

**Introduction.** Studies have shown that current science and technology development is closely related to the growth of intellectualization of industrial relations, the emergence of new technologies, which, in turn, leads to the actualization of understanding and countering threats in the field of digital, energy, climate, and mental security. The convergent basis in the development of nanotechnology is revealed. **The aim** of this research is to establish the prerequisites and opportunities for the promising rapid development of nanotechnology on a global scale, as well as to identify potential risks associated with it. **Methods and materials.** An interdisciplinary approach, based on the convergent nature of modern technology foundation, is significant in studying the prerequisites and patterns for the cross-cutting edge development of nanotechnology on a global scale. **Results and discussion.** On the basis of the existing research in the field of nanotechnology application in strategically important industries, the postulates of a new worldview concept мировоззренческой концепции for studying the future path of nanotechnologies are proposed. The postulates are based on an integral concept of interlinking such major components: the prerequisites for of threats emergence; threats and their identification; factors forming the emergence and manifestation of threats; problems; risks affecting the aggravation of negative factors. Socio-cultural, technocratic and institutional prerequisites for studying the opportunities and risks of the further development of nanotechnologies are identified and substantiated. **Conclusion.** The interdependence of socio-cultural, technocratic and institutional prerequisites and opportunities for the emergence of threats and risks for the future development of nanotechnologies is presented. The need for institutional regulation of the long-term development of nanotechnologies is justified, highlighting several emerging institutional challenges that could hinder their industrial application. Recommendations for how to regulate the development of nanotechnologies through institutions are also proposed.

**KEYWORDS:** nanotechnology, convergence, social and cultural prerequisites, technocratic prerequisites, institutional prerequisites, risks, development prospects

**ACKNOWLEDGEMENTS:** This study was supported by the Laboratory for Asian Economic Research, St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russian Federation.

### FOR CITATION:

Pisarenko Zh.V., Simchenko N.A., Ivanov L.A., Xie W., Nasyrova G.A. Prerequisites, opportunities and risks for the future development of nanotechnology at the global level. *Nanotechnologies in construction*. 2025;17(6):775–786. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-6-775-786>. – EDN: RBJCOI.

### ВВЕДЕНИЕ

Формирование технологического базиса современного развития общества на глобальном уровне опирается на беспрецедентное развитие нано-, био-, IT-, когнитивных технологий, которые имеют сквозной характер и воздействуют на формирование новой социотехнологической структуры мироустройства. Развитие современной науки имеет конвергентный характер и связано с междисциплинарными исследованиями в области медицины, электроники, энергетики, химической промышленности, аэрокосмической и оборонной промышленности, строительства и других сфер.

Современное научно-технологическое развитие тесно связано с ростом интеллектуализации производственных отношений, появлением новых технологий, что, в свою очередь, приводит к актуализации понимания и противодействия угроз в области цифровой, энергетической, климатической, ментальной безопасности. Еще в начале XX века русский ученый В.И. Вернадский в своем известном труде «Биосфера и ноосфера» писал, что «неуклонный научно-технический прогресс ведет к торжеству разума и рациональной организации природы: биосфера XX столетия превращается в ноосферу, создаваемую прежде всего ростом науки, научного понимания и основанного на ней социального труда человека» [1].

Называя ноосферу «царством разума» [1, с. 35], В.И. Вернадский подчеркивал, что «как создание ноосферы из биосферы есть природное явление, более глубокое и мощное в своей основе, чем человеческая история. Оно требует проявления человечества как единого целого. Это его неизбежная предпосылка» [1, с. 38]. Данное заключение ученого очень важно, т.к. оно обосновывает необходимость бережного отношения человека к окружающему природному разнообразию, к другим людям и сообществам. Однако в настоящее время мы наблюдаем стремительное нарастание угроз и рисков перспективного развития новых технологий более быстрыми темпами, чем когда бы то ни было.

Развитие современных технологий носит конвергентный характер. Одним из современных прочтений теории конвергенции является концепция, предложенная Питером Уотсоном (Watson Peter) – концепция конвергенции как всеобщей исторической траектории развития всей современной науки [2]. По мнению нобелевского лауреата Steven Weinberg, «конвергенция – это самая главная идея Вселенной» [3].

Различные научные дисциплины, несмотря на изначально разные фундаментальные основы, за последние 150 лет из разрозненных областей превратились в междисциплинарные научные направления. Взаимосвязь и взаимозависимость демонстрируют квантовая химия и молекулярная биология, астрономия и физика, психология с физикой, химией и экономикой. Этот список можно продолжить. Вывод один – конвергенция является глубочайшей идеей развития человечества и важнейшим из аспектов развития науки в XXI веке.

По существу, в понятии «конвергенция» раскрывается вектор эволюции современного глобального общества. По мнению российского философа Н.А. Князева [4], «конвергенция – это такая характерная черта глобализации, такой статус ее качественной определенности, который соответствует раскрытию содержания социально-экономических, технологических и управленческих изменений современного мирового сообщества на уровне радикальных изменений социально онтологической основы общества». Конвергенция позволяет субъектам экономических отношений «совместными системными усилиями» отвечать на глобальные вызовы современности.

Конвергентное содержание в развитии нанотехнологий зафиксировано и на международном институциональном уровне в международных стандартах серии ISO/TS 80004 [5, 6]. Процессы нанотехнологического производства являются большой и разнообразной группой производственных процессов, применяемых в различных отраслях промышленности (табл. 1).

Усложняющийся характер процессов нанотехнологического производства обуславливает важность исследования предпосылок, возможностей и рисков перспективного развития нанотехнологий на глобальном уровне.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Использование системной методологии, междисциплинарного и интегративного подходов, основанных на конвергентной природе развития современного технологического базиса, является значимым в исследовании предпосылок и закономерностей перспективного развития нанотехнологий.

Принимая во внимание классический принцип построения отчетов о развитии глобального рынка нанотехнологий признанных международных правительственных и неправительственных организаций, консалтинговых компаний (например, Юнктад, <https://unctad.org/publication/technology-and-innovation-report-2025>; Fortune <https://www.fortunebusinessinsights.com/nanotechnology-market-108466>; РБК <https://marketing.rbc.ru/research/47612/> и др.) с использованием количественных методов исследования по сбору и анализу первичной и вторичной информации, в нашем исследовании, помимо указанных статистических методов научного исследования, использованы также и специфические методы, включая методы качественного анализа взаимообусловленности социокультурных, технократических и институциональных предпосылок и возможностей возникновения угроз и рисков перспективного развития нанотехнологий.

При этом в основу обоснования такой взаимообусловленности предпосылок положена авторская методология исследования, опирающаяся на единый контур взаимосвязей «предпосылки – угрозы – факторы – проблемы – риски» [24].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ДИСКУССИЯ

Развитие нанотехнологий является важнейшим направлением обеспечения технологического суверенитета стран в XXI веке. По данным IMARC Group [26], ожидается, что к 2033 г. объем мирового рынка нанотехнологий достигнет 102,8 млрд долл., а темпы роста (CAGR) составят 27,68% к 2025–2033 гг. Оценки экспертов Fortune Business Insights еще более оптимистичные: объем мирового рынка нанотехнологий, по их мнению, вырастет с 91,18 млрд долл. в 2024 г. до 332,73 млрд долл. к 2032 г., что в среднегодовом выражении составит около 17,6% [25]. Растущее применение нанотехнологий в различных отраслях промышленности, все более широкое внедрение нанотехнологий, прежде все-

**Таблица 1.** Перспективные направления применения нанотехнологий в стратегически значимых отраслях промышленности

Отрасль	Перспективные направления применения
Полупроводниковая промышленность	<ul style="list-style-type: none"> <li>– производство мощных приборов с полупроводниками на основе карбида кремния;</li> <li>– применение GaN-преобразователей для зарядных систем, DC-DC-преобразователей на автомобильном рынке;</li> <li>– развитие рынка для GaN – СВЧ-устройства для станций сотовой связи поколений 5G и 6G, радаров гражданского и военного назначений, спутниковых систем и т.д. [7]</li> </ul>
Производство электроники и телекоммуникационного оборудования	<p>Электроника:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– применение в литий-ионных аккумуляторах наночастиц кремния [8] и олова [9] для увеличения реверсивной мощности, по сравнению с традиционными графитовыми;</li> <li>– применение наночастиц оксидов ванадия в качестве катода литий-ионных аккумуляторов [10], оксида олова для натрий- и калий-ионных, оксидов марганца в литий-ионных аккумуляторах [10] и др.</li> </ul>
Аэрокосмическая и оборонная промышленность	<p>Авиастроение:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– увеличение срока службы и надежности компонентов двигателя, а именно в таких компонентах двигателя, как лопатки турбин и компрессоров, камеры сгорания и системы теплозащиты;</li> <li>– экологические преимущества применения наноматериалов в авиационных двигателях проявляются в двух основных аспектах: снижении выбросов вредных веществ и уменьшении потребления топлива и др. [11]</li> </ul>
Энергетика и транспорт	<p>Водородная энергетика:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– фотоэлектрохимическое разложение воды;</li> <li>– фотокаталитическое получение водорода [12];</li> <li>– твердотельное хранение водорода и топливные элементы с протоннообменной мембраной [13].</li> </ul> <p>Солнечная энергетика:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– использование самоочищающихся стекол с нанопокровками [14];</li> <li>– использование наночастиц в качестве высокопроизводительных полупроводников n- и p-типа, а также в качестве замены органических красителей, что также влияет на выход энергии солнечных элементов [15–17]</li> </ul>
Химическая промышленность	<ul style="list-style-type: none"> <li>– наночастицы в катализе и синтезе: ускорение химических реакций; создание новых соединений [18];</li> <li>– разработка нанокатализаторов, которые позволяют в больших объемах и с высокой селективностью превращать многоатомные спирты в практически важные химические вещества – олефины [18]</li> </ul>
Биомедицина, биотехнологии и фармацевтическая промышленность	<p>Медицина:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– использование наночастиц для доставки лекарств к определенным типам клеток;</li> <li>– диагностика;</li> <li>– восстановление тканей;</li> <li>– лечение раковых опухолей и др. [10]</li> </ul>
Строительство	<ul style="list-style-type: none"> <li>– повышение устойчивости цеолитовых суспензий для цементных систем [19];</li> <li>– влияние технологий усиления основания земляного полотна на устойчивость сооружения, проектируемого на высокотемпературных многолетнемерзлых грунтах [20];</li> <li>– новые виды наноматериалов используются при изготовлении самовосстанавливающегося бетона, нанопеностекла, умных и функциональных покрытий и т.д. [21]</li> </ul>
Биологическая рекультивация	<ul style="list-style-type: none"> <li>– применение наночастиц кремния для очистки воды [22] и в сельском хозяйстве [23];</li> <li>– производство биоорганических наноудобрений к повышению урожайности и качества с/х культур и т.д.</li> </ul>

го, для медицинской диагностики и визуализации, а также растущий спрос на титановые наноматериалы являются одними из ключевых факторов, определяющих развитие рынка [27]. На рис. 1 представлена ожидаемая динамика глобального рынка нанотехнологий на ближайшее десятилетие. Данные характеризуют значительную динамику роста производства нанокомпозитов, наноматериалов и других наноизделий.

Отметим, что разные консалтинговые агентства дают различные оценки относительно будущего размера рынка нанотехнологий. Это связано, отчасти, с тем, что ежегодно в обращение на мировой рынок поступают тысячи тонн новых наноматериалов, применяемых в вышеуказанных отраслях, напри-

мер, технический углерод и коллоидный диоксид кремния. В ближайшем будущем будут разработаны новые уникальные наноматериалы, которые внесут существенные изменения в развитие таких отраслей, как биотехнология, технологии очистки воды, энергетика, строительство.

Как правило, в различных аналитических отчетах анализ представляется по таким типам нанотехнологий: наносенсоры, наноустройства, наноматериалы, другие нанотехнологии. Международная консалтинговая компания StartUs. Insights выделяет топ-9 трендов в развитии нанотехнологий в 2025 г.: карбоновые наноматериалы, полупроводниковые наноустройства, зеленые нанотехнологии, нанокompозиты, наносенсоры, нанопленки, наноинкапсулирование,

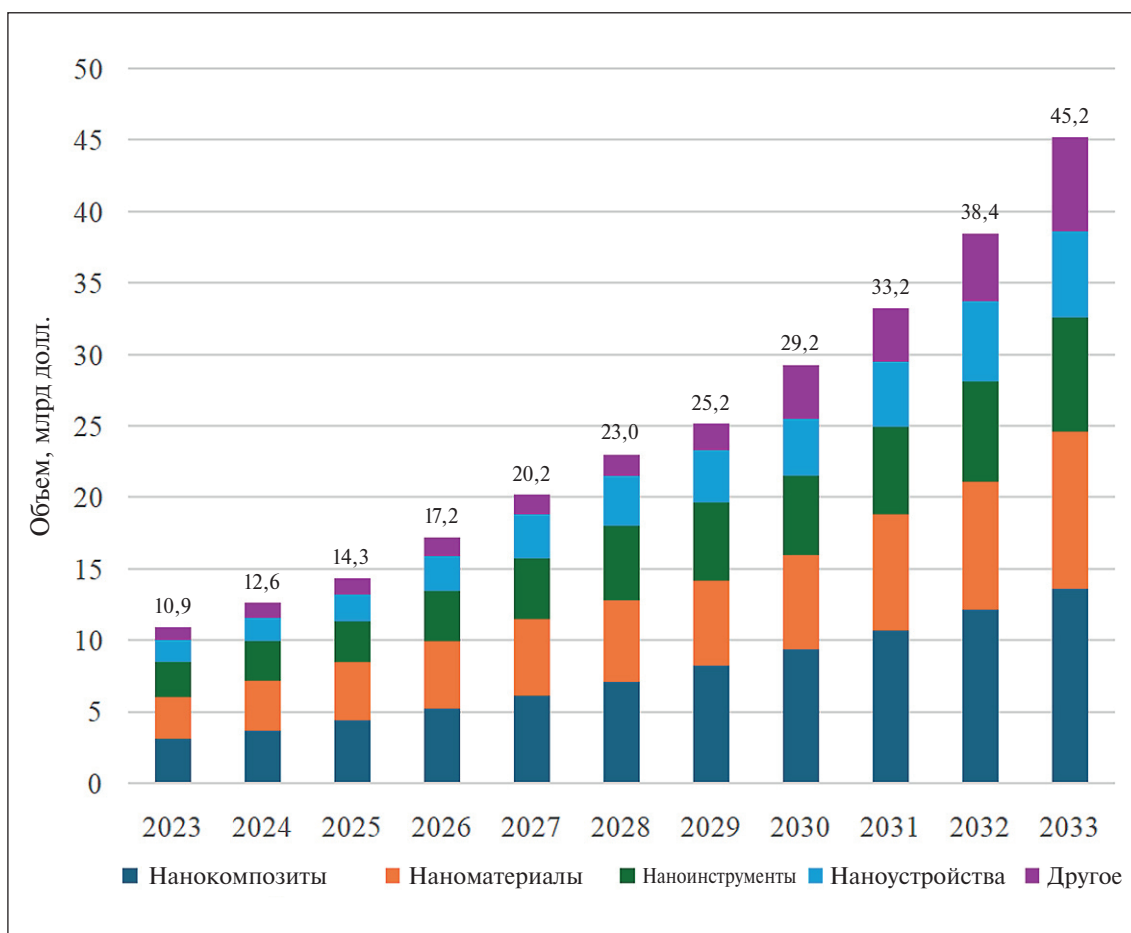


Рис. 1. Динамика мирового рынка нанотехнологий [28]

наноматериалы в энергетике, вычислительные нанотехнологии [27].

Согласно оценкам Credence Research, по состоянию на начало 2025 года 35% доли рынка нанотехнологий занимали США благодаря имеющейся в распоряжении ученых мощной научно-исследовательской инфраструктуре. За ними следует Европа с долей рынка около 27%, что обусловлено, прежде всего, достижениями в области нанотехнологий для здравоохранения, энергетики и «устойчивых» технологий. Ожидается также, что Азиатско-Тихоокеанский регион будет быстро расти и в перспективе займет более 20% рынка, главным образом, благодаря растущей индустриализации и инвестициям в разработки новых наноматериалов в таких странах, как Китай, Япония и Индия. На долю остального мира, включая Латинскую Америку, Ближний Восток и Африку, приходится около 18% рынка, где также появляются новые области применения нанотехнологий в энергетике и здравоохранении. [27].

Ниже на рис. 2 приведена динамика развития нанотехнологий на рынке Биотеха. Отчетные данные компании Market.us свидетельствуют о значительном

росте таких сегментов рынка по использованию нанотехнологий, как фармацевтика и медицина.

Безусловно, нанотехнологии меняют и будут значительно менять стратегически важные сферы жизнедеятельности человека. Выше нами рассмотрены основные области, в которые активно внедряются нанотехнологические разработки. Однако внедрение нанотехнологий имеет как важные преимущества, так и серьезные риски, что требует систематических исследований в области обеспечения безопасности на глобальном уровне.

#### Постулаты новой мировоззренческой концепции изучения перспективного развития нанотехнологий

Проблематика рассмотрения угроз развития новых технологий в настоящее время достаточно актуальна, однако пока в различных источниках не представлена цельная концепция взаимоувязывания таких важнейших составляющих:

- предпосылки возникновения угроз;
- угрозы и их идентификация;

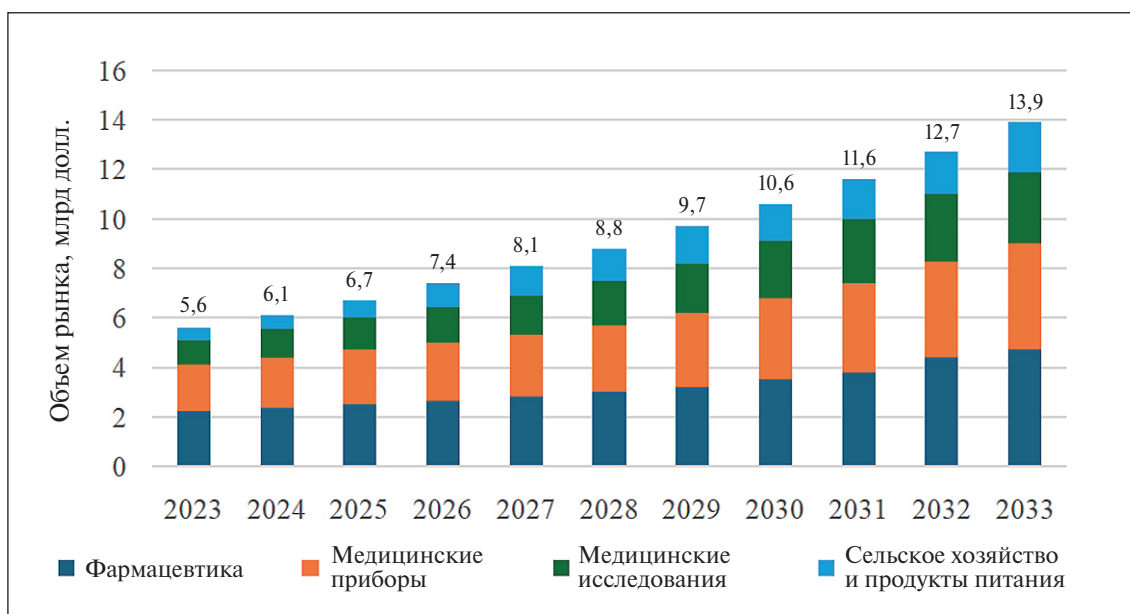


Рис. 2. Динамика развития рынка нанотехнологий в сегменте Биотеха [28]

- факторы, влияющие на возникновение и проявление угроз;
- проблемы;
- риски, влияющие на усугубление действия негативных факторов.

Риски могут быть вызваны различными негативными факторами. Здесь важно понять сложный разнородный характер влияния угроз на возникновение рисков. Фактически риски есть количественное мерило действия угроз. Если угрозы, в основном, описываются качественно с точки зрения содержания, то риски предусматривают оценку последствий действия угроз по отношению к определенному объекту воздействия.

Анализ научной литературы и экспертных оценок позволил выделить типы предпосылок, вызывающих возникновение угроз, связанных с дальнейшим развитием нанотехнологий (табл. 2).

## 1. Социокультурные предпосылки

Нанотехнологии ведут к серьезным социальным и культурным изменениям, определяющим ценностные угрозы.

1.1. Ценностные угрозы связаны с ценностным восприятием новых технологий, что приводит к росту атомизации общества, нарастанию социальной отчужденности. В свою очередь, рост автономности индивидов приводит к зарождению новых сообществ, новых социальных норм в рамках существующих систем.

1.2. Угрозы информационной безопасности государства, семьи, человека. Всеобщая виртуализация

социума, компьютеризация всех сфер общества приводит к формированию «гибридной реальности», что вызывает риски обеспечения информационной безопасности личности и обществ.

1.3. Киберсоциальные угрозы связаны со сложностью и многофакторностью техносферы. Развитие киборгизации и, как следствие, появление новых видов людей, может вызвать новые формы социально-политических конфликтов и войн, что активизирует риски появления кибернетических нанобиоструктур.

1.4. Угрозы в сфере развития человеческого капитала. Рост интеллектуализации профессионального образования характеризуется снижением уровня доступности образования для части населения, имеющего физиологические, психические и социальные особенности, препятствующие обучению. Речь идет о высвобождении из процессов создания добавленной стоимости увеличивающейся доли людей с низким и средним уровнем интеллектуального развития.

1.5. Этические угрозы. Стремительное и слабоконтролируемое развитие nano-, био-, IT, когнитивных технологий актуализирует проблему «human enhancement». Технологическое усиление, приращение человеческих способностей, модификация человеческой телесности и интеллекта создает риски возникновения «постчеловеческой» фазы цивилизации [29].

## 2. Технократические предпосылки

Рассмотрение технократических предпосылок для формирования возможностей развития нанотехнологий следует рассматривать в контексте со-

**Таблица 2.** Взаимообусловленность социокультурных, технократических и институциональных предпосылок, возможностей и рисков перспективного развития нанотехнологий

Предпосылки	Угрозы	Факторы	Постановка проблемы	Риски
1. Социокультурные предпосылки	Ценностные угрозы	Ценностное восприятие новых технологий	Рост атомизации общества. Нарастание социальной отчужденности	Риск роста автономности индивидов приводит к зарождению новых сообществ, новых социальных норм в рамках существующих систем
	Угрозы информационной безопасности государства, семьи, человека	Всеобщая виртуализация социума, компьютеризация всех сфер общества	Формирование «гибридной реальности»	Риски обеспечения информационной безопасности личности и общества
	Киберсоциальные угрозы	Сложность и многофакторность техносферы	Развитие киборгизации и, как следствие, появление новых видов людей, что также может вызвать новые формы социально-политических конфликтов и войн.	Риски появления кибернетических нанобиоструктур
	Угрозы в сфере развития человеческого капитала	Рост интеллектуализации профессионального образования	Снижение уровня доступности образования для части населения, имеющего физиологические, психические и социальные особенности, препятствующие обучению	Высвобождение из процессов создания добавленной стоимости увеличивающейся доли людей с низким и средним уровнем интеллектуального развития
	Этические угрозы	Стремительное и слабоконтролируемое развитие nano-, био-, IT, когнитивных технологий	Проблема «human enhancement». Технологическое усиление, приращение человеческих способностей, модификация человеческой телесности и интеллекта	Риск возникновения «постчеловеческой» фазы цивилизации
2. Технократические предпосылки	Демографические сдвиги	Старение населения	Замедление прироста населения мира, увеличение продолжительности жизни	Сокращение доли экономически активного населения Земли
	Угрозы в сфере здоровьесбережения	Слабая прогнозируемость позитивного влияния новейших nano- и биотехнологий на здоровье человека	Неблагоприятное воздействие на здоровье новейших технологий, которые, с одной стороны, позволяют лечить существующие болезни, а с другой стороны, могут стать причиной новых болезней	Появление новых заболеваний вследствие применения новейших nano- и биотехнологий
	Технологические угрозы	Глобальный характер развития NBIC-технологий	Обеспечение безопасности продукции нанотехнологий. Технологии утилизации нанопродукции	Производственные и экологические риски, связанные с безопасностью продукции нанотехнологий, утилизацией нанопродукции
	Технологическая и временная ограниченность в апробации новых и природоподобных материалов, не встречающихся в природе	Новые и природоподобные материалы, не встречающиеся в природе наноматериалы	Переоценка модифицированных наночастицами материалов при использовании в промышленности и строительстве. Разрушение конструкций	Риски использования модифицированных наночастицами материалов без их достаточной апробации и тестирования
	Экологические угрозы	Локальный характер регулирования последствий масштабных катастроф	Частота возникновения сверхкатастроф на локальном уровне (уровне отдельных стран и регионов)	Риски возникновения сверхкатастроф на локальном уровне (ущерб от катастроф в сфере атомной энергетики, утилизации радиоактивных отходов и др.).
	Экологические угрозы	Отходы nano- и биотехнологий, возникновение круговорота искусственных наночастиц	Глобальное ухудшение экологической ситуации	Засорения отходами nano- и биотехнологий. Риск усиления круговорота искусственных наночастиц
3. Институциональные предпосылки	Институциональные угрозы в области конкуренции	Конкуренция в сфере нанотехнологий	Повышение вероятности возникновения «гонки вооружений»	Политические риски, обусловленные нанотехнологической конкуренцией
	Институциональные угрозы применения NBIC-технологий	Применение NBIC-технологий	Невозможность полной локализации отрицательных последствий применения NBIC-технологий	NBIC-риски как системные риски, влияющие на фундаментальные основы человеческого существования и мироздания
	Институциональные угрозы в области инвестирования разработок	Политические и экономические интересы институциональных инвесторов в сфере nano- и биотехнологий	Рост неподконтрольных государствам акторов, активно ведущих разработки в сфере nano- и биотехнологий, что может привести к росту военных, террористических и экстремистских явлений	Институциональные риски, связанные с наличием множества неподконтрольных государствам акторов, активно ведущих разработки в указанной сфере

циогуманитарных, технологических и экологических аспектов развития технологий.

2.1. Демографические сдвиги в развитии современного общества тесно связаны со старением населения, замедлением прироста населения мира вследствие увеличения продолжительности жизни. Это вызывает риск сокращения доли экономически активного населения Земли.

2.2. Угрозы в сфере здоровьесбережения связаны со слабой прогнозируемостью позитивного влияния новейших нано- и биотехнологий на здоровье человека. Отметим, что имеет место риск неблагоприятного воздействия на здоровье новейших технологий, которые, с одной стороны, позволяют лечить существующие болезни, а с другой стороны, могут стать причиной новых болезней. Таким образом, технократические предпосылки тесно связаны с появлением новых заболеваний вследствие применения новейших нано- и биотехнологий.

2.3. Технологические угрозы. Глобальный характер развития NBIC-технологий требует важность обеспечения безопасности продукции нанотехнологий, включая применение технологий утилизации нанопродукции. В данном контексте возрастают производственные и экологические риски, связанные с безопасностью продукции нанотехнологий, утилизацией нанопродукции.

Также в контексте технологических угроз важно обратить внимание на технологическую и временную ограниченность в апробации новых и природоподобных материалов, не встречающихся в природе. Это актуализирует риски использования модифицированных наночастицами материалов без их достаточной апробации и тестирования.

2.4. Экологические угрозы связаны с проявляющимся локальным характером регулирования последствий масштабных катастроф, увеличением частоты возникновения сверхкатастроф на локальном уровне (уровне отдельных стран и регионов), что приводит к росту ущербов от катастроф в сфере атомной энергетики, утилизации радиоактивных отходов и др. Подчеркнем, что управление рисками сверхкатастроф на локальном (национальном и/или региональном) уровне недостаточно эффективно и должно осуществляться совместными усилиями государств и международных организаций в глобальном масштабе.

Более того, перспективные направления развития нанотехнологий тесно связаны с малоизученностью отходов нано- и биотехнологий, возникновением круговорота искусственных наночастиц. Засорение отходами нано- и биотехнологий усиливает риск усиления круговорота искусственных наночастиц, что может влиять в целом на глобальное ухудшение экологической ситуации.

### 3. Институциональные предпосылки

Высокий уровень неопределенности при оценке технологических, экологических, экономических, социально-политических и других последствий NBIC-конвергенции требует упреждающих политических управленческих решений.

3.1. Институциональные угрозы в области конкуренции нанотехнологий рассматриваются с позиций повышения вероятности возникновения «гонки вооружений». Это приводит и к возникновению политических рисков, обусловленных нанотехнологической конкуренцией.

3.2. Институциональные угрозы применения NBIC-технологий связаны со слабой возможностью полной локализации отрицательных последствий применения NBIC-технологий. Здесь NBIC-риски нужно рассматривать как системные риски, влияющие на фундаментальные основы человеческого существования и мироздания: приватность, идентичность, равенство, безопасность и саму человеческую природу.

3.3. Институциональные угрозы в области инвестирования разработок. Данный тип угроз опосредованно вызван противоречиями в политических и экономических интересах институциональных инвесторов в сфере нано- и биотехнологий. Прогрессирующая конфликтность интересов приводит к росту неподконтрольных государствам акторов, активно ведущих разработки в сфере нано- и биотехнологий, что потенциально может активизировать военные, террористические и экстремистские действия.

Отметим, что указанные нами риски требуют управления как на уровне отдельных стран, макро-регионов, так и на глобальном уровне. Здесь приведем цитату F. Fukuyama, который в своей книге «Our Posthuman Future: Consequences of the Biotechnology Revolution» писал: «Мы не обязаны считать себя рабами неизбежного технологического прогресса, если этот прогресс не служит человеческим целям. Истинная свобода означает свободу политической общественности защищать *ценности*, которые ей всего дороже, и именно этой свободой мы должны воспользоваться сегодня по отношению к биотехнологической революции» [30].

В современном обществе полемика относительно общих ценностей разворачивается преимущественно в контексте действия геополитических факторов. Важнейшим направлением регулирования перспективного развития нанотехнологий является институциональное регулирование. Но здесь важно понять, что технологическое развитие осуществляется гораздо быстрее, чем формирование и развитие норм и правил, регулирующих конвергенцию нано-, био-, IT-, когнитивных технологий.

Проблема «запаздывания институтов» является весьма актуальной в данном контексте. В данном случае целесообразно вспомнить теорию институциональных ловушек В.М. Полтеровича, который описывал институциональные ловушки как неэффективные и устойчивые нормы, имеющие самоподдерживающийся характер [31]. Несмотря на то, что проблема институциональных ловушек исследована В.М. Полтеровичем в контексте трансформационных, или переходных экономик, изучение закономерностей и рисков перспективного развития нанотехнологий на глобальном уровне тесно связано с подобными институциональными ловушками (табл. 3).

Отметим, что приведенные в табл. 3 институциональные ловушки представляют собой направления для дальнейших исследований и более тщательного изучения с позиций понимания социокультурных и институциональных перспектив регулирования нанотехнологий.

Одним из важнейших вызовов перспективного развития нанотехнологий является опережающее развитие технологий по сравнению с институциональными рамками их регулирования и контроля. Отметим, что изучение и осознание рисков перспективного развития нанотехнологий является критически важной задачей для ученых, политиков, военных деятелей, представителей бизнеса и гражданского общества. Ведь прогнозируемые риски часто несоизмеримы с их положительными эффектами на общество, в результате чего человечество может стать заложником собственных высокотехнологических изобретений.

Говоря о важности институционального регулирования перспективного развития нанотехнологий, обратим внимание на управление экономическими отношениями в данной области с точки зрения ужесточения международных стандартов, обязательной сертификации, прозрачных исследований.

Если развитие биотехнологий обусловило динамичное развитие биоэкономики, то проведение nanoисследований является междисциплинарным направлением в современной науке, тесно связанным с развитием базисных отраслей глобальной экономики в XXI веке – IT-инженерией, медициной, энергетикой и др. Следует отметить, что направление «наноэкономика» вследствие развития nanoиндустрии не получило широкого развития. Вообще сам термин «nanoeconomics» исследован Нобелевским лауреатом Kenneth J. Arrow, который рассматривал nanoэкономику с позиций поведения отдельных экономических агентов: «a more detailed analysis of the buying and selling decisions of individual economic agents» [32]. Если предметом исследования в макроэкономике являются транзакции на уровне регионов или стран, а в микроэкономике – транзакции на уровне фирм и домохозяйств, то в nanoэкономике К. Arrow интересовали поведенческие модели индивидуальных агентов. Фактически под nanoэкономикой Arrow понимал «the economic theory of single transactions» [33].

Вообще вопрос о связи развития технологий и экономики ставил еще в 1904 году Кэрролл Д. Райт, экс-президент Американской ассоциации содействия развитию науки. Он подчеркивал, что «Экономисты еще недостаточно изучили великие прогнозы современности в отношении их влияния на экономическое развитие и условия жизни людей в целом» [34]. Кэрролл Д. Райт правомерно указывал на необходимость изменения политической экономии под воздействием индустриальных и социальных изменений.

«Политическая экономия (...) должна стремиться объединиться со всеми великими науками в каждой области деятельности и прийти к выводам, которые будут иметь жизненно важное значение для трудящихся масс всего мира» [34]. Прошло более ста лет, и данная позиция не потеряла своей актуальности,

**Таблица 3.** Матрица институциональных ловушек перспективного развития nano- и других технологий в некоторых отраслях

Технологии	Отрасли			
	Нейробиология	HealthCare	Энергетика	Строительство
<b>Нанотехнологии</b>	Ловушка непредсказуемости реакции систем жизнеобеспечения	Ловушка стандартизации наночастиц	Ловушка токсичности и утилизации наноматериалов	Ловушка изменчивости свойств в биосредах
<b>Генная инженерия</b>	Ловушка алгоритмизации манипулирования сознанием	Ловушка социального «равенства»	Ловушка оценки долгосрочных последствий	Ловушка биологической опасности
<b>ИИ</b>	Ловушка технологической сингулярности	Ловушка регулирования нейросетей	Ловушка регуляторная и тарифная	Ловушка «цифрового» и ценового разрывов

особенно применительно к развитию нанотехнологий.

Таким образом, принимая во внимание устоявшийся в экономической теории терминологический подход к пониманию наноэкономики, обратим внимание на важность исследования конвергентного влияния нанотехнологий на экономическое развитие стран и мира в целом. В этой связи важно выделить такое перспективное направление исследований как управление наноэкономикой nanoиндустрии.

Как отмечает Э. Куполи, «Наноэкономика – это союз нанонауки и экономики для ускорения темпов технологических изменений. Это не применение одной области для изучения другой. Это... признание того, что наука, технология и экономика не могут быть полностью разделены или поняты с помощью традиционного «изолированного» подхода» [35]. Таким образом, перспективой дальнейших исследований в данной сфере является институциональная конвергенция методов социокультурного и кратического воздействия на перспективы развития нанотехнологий.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Развитие нанотехнологий представляет собой стратегически значимый вектор обеспечения технологического превосходства стран. Полученные в статье результаты научных исследований позволят исследователям и экспертам из разных профессиональных областей глубже разобраться в предпосылках и возможностях применения нанотехнологий. Безусловно, возможности применения нанотехнологий огромны, однако весьма значимы и риски. Представленные в статье социокультурные, кратические и институциональные предпосылки возникновения угроз в перспективном развитии нанотехнологий показывают взаимообусловленность возможностей и рисков в управлении реализацией нанотехнологий. А наличие ряда институциональных

ловушек на стыке использования нанотехнологий в отдельных отраслях свидетельствует об особой важности институционального регулирования перспективного развития нанотехнологий.

В связи с этим, сформулируем следующие рекомендации для дальнейшего институционального регулирования развития нанотехнологий:

- организация эффективного статистического наблюдения в сфере nanoиндустрии;
- стандартизация и сертификация наномодифицированных материалов для различных отраслей промышленности;
- развитие программы научных исследований и разработок мирового уровня в области нанотехнологий;
- стимулирование роста количества патентных заявок по направлению нанотехнологий;
- государственная поддержка развития предпринимательского сектора в сфере нанотехнологий;
- стимулирование развития благоприятной институциональной среды, обеспечивающей ответственное развитие нанотехнологий, что предполагает ответственное отношение к рискам и управление ими;
- исследования в области создания «умных» наноматериалов, способных адаптироваться к изменяющимся условиям работы;
- активизация междисциплинарных исследований, объединяющих достижения в области материаловедения, химии, физики, инженерных и социальных наук, что может привести к появлению принципиально новых решений в области наноматериалов для различных отраслей.

Подчеркнем, вышеуказанные нами направления институционального регулирования развития нанотехнологий не являются исчерпывающими, однако отражают исключительную приоритетность и важность институционального регулирования развития нанотехнологий с учетом технологических и социокультурных паттернов.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Вернадский В. И. *Биосфера и ноосфера*. М.: Айрис-пресс Рольф, 2002. 573 с.
2. Prasser D. *Discover the Top 9 Nanotechnology Trends in 2025*. Available from: <https://www.startus-insights.com/innovators-guide/nanotechnology-trends/> (date of access: 27.08.2025).
3. Watson P. *Convergence: The Deepest Idea in the Universe*. Simon and Schuster; 2016. Available from: <http://www.simonandschuster.co.uk/books/Convergence/Peter-Watson/9781471129001> (date of access: 02.07.2025).
4. Князев Н.А. Философские уровни анализа сущности процессов глобализации. *Вестник НГПУ*. 2013;4(14). <http://cyberleninka.ru/article/n/filosofskie-urovni-analiza-suschnostiprotsessov-globalizatsii> (дата обращения: 16.08.2025).
5. ISO/TS 80004-6:2021. Nanotechnologies – Vocabulary Part 6: Nano-object characterization. Available from: <https://www.iso.org/standard/74665.html> (date of access: 08.08.2025).

6. GOST ISO/TS 80004-1-2017. Available from: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293743/4293743509.pdf?ysclid=mex21ly7ws874118534> (date of access: 08.08.2025).
7. Учёные МИФИ проанализировали перспективы нового поколения полупроводников. <https://www.atomic-energy.ru/news/2023/12/14/141490> (дата обращения: 08.08.2025).
8. Yin S. et al. Silicon lithium-ion battery anode with enhanced performance: Multiple effects of silver nanoparticles. *J Mater Sci Technol. Chinese Society of Metals*. 2018;34(10):1902–1911.
9. Zhao X., Yang Q., Quan Z. Tin-based nanomaterials: Colloidal synthesis and battery applications. *Chemical Communications. Royal Society of Chemistry*. 2019; 55(60):8683–8694.
10. Шитова Е.С., Макаров Ф.В., Перцев А.А., Пономаренко А.П., Штраус А.А. Обзор перспективных применений наночастиц в различных отраслях промышленности. *Наноиндустрия*. 2023;16(1):30–40. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2023.16.1.30.40> (дата обращения: 29.07.2025).
11. Шумилов А.Е. Перспективы применения наноматериалов в авиационном двигателестроении. *Universum: технические науки*. 2024;8(125). <https://universum.com/ru/tech/archive/item/18024> (дата обращения: 13.09.2025).
12. Ramalingam V. Multifunctionality of gold nanoparticles: Plausible and convincing properties. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2019;271:101989. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2019.101989>
13. Burduşel A.C. et al. Biomedical applications of silver nanoparticles: An up-to-date overview. *Nanomaterials*. 2018;8(9).
14. Alanbari M.H. et al. Nanotechnology applied to renewable energy. *The Online Journal of Science and Technology*. 2019;9(4):244–251.
15. Avci B., Caglar Y., Caglar M. Controlling of surface morphology of ZnO nanopowders via precursor material and Al doping. *Mater Sci Semicond Process*. 2019;99:149–158.
16. Ozturk T. et al. An insight into titania nanopowders modifying with manganese ions: A promising route for highly efficient and stable photoelectrochemical solar cells. *Solar Energy*. 2017;157:47–57.
17. Chewchinda P. et al. Preparation of Si nanoparticles by laser ablation in liquid and their application as photo-voltaic material in quantum dot sensitized solar cell. *Journal of Physics: Conference Series. Institute of Physics Publishing*. 2014;518(1).
18. Nanotechnology in the Chemical Industry. Available from: <https://nano.sfedu.ru/press-center/news/novosti/nanotekhnologii-v-khimicheskoy-promyshlennosti/> (date of access: 13.09.2025).
19. Samchenko S.V., Kozlova I.V., Sinotova M.V., Vovchensky D.N., Sirotkina K.A. Study of the stability of zeolite suspensions for cement systems. *Nanotechnologies in Construction*. 2025;17(3):224–234. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-3-224-234>. – EDN: ZQZZZV.
20. Shepitko T.V., Artyushenko I.A., Akulich V.Yu., Polyansky A.V., Nozdrachev A.S. Analysis of the impact of subgrade reinforcement technologies on the stability of structures designed on high-temperature permafrost soils. *Nanotechnologies in Construction*. 2025;17(4):415–426. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-4-415-426>. – EDN: CCATHQ.
21. Bessonov I.V., Zhukov A.D., Bobrova E.Yu., Gorbunova E.A., Govryakov I.S. Optimization of properties and structure of lightweight materials using digital methods. *Nanotechnologies in Construction*. 2025;17(2):109–118. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-2-109-118>. – EDN: WXZIJJ.
22. Jeelani P.G. et al. Multifaceted Application of Silica Nanoparticles. A Review. *Silicon*. 2020;12(6):1337–1354.
23. Rastogi A., Tripathi D.K., Yadav S. et al. Application of silicon nanoparticles in agriculture. *3 Biotech*. 2019;9:90. <https://doi.org/10.1007/s13205-019-1626-7>
24. Razmanova S., Pisarenko Z., Nesterova O., Toan N.K., Ivanov L. Environmental Hazards and Risk Identification in the Arctic Shelf Development as Part of China and Russia Energy Interests. *Energies*. 2023;16:1800. <https://doi.org/10.3390/en16041800>
25. Nanotechnology Market Size. Fortune Business Insights. Available from: <https://www.fortunebusinessinsights.com> (date of access: 29.08.2025).
26. Nanotechnology Market Report by Type (Nanosensor, Nano Devices, Nanomaterials, and Others), Application (Electronics, Energy, Chemical Manufacturing, Aerospace and Defense, Healthcare, and Others), and Region 2025–2033. Available from: <https://www.imarcgroup.com/nanotechnology-market> (date of access: 29.08.2025).
27. Nanotechnology market. Available from: <https://www.credenceresearch.com/report/nanotechnology-market> (date of access: 29.08.2025).
28. Nanotechnology in Biotech Market. Available from: <https://market.us/report/nanotechnology-in-biotech-market/> (date of access: 10.09.2025).
29. Анныев Д.А., Акмырадов Г.Ч., Хошвагтова О.Д.Г., Эсенов Р.Б. Нанотехнологии: современные достижения, перспективы и вызовы. *In Situ*. 2025;3:18–20.

30. Fukuyama F. *Our Posthuman Future: Consequences of the Biotechnology Revolution*. New York: Farrar, Straus & Giroux; 2003.

31. Полтерович В.М. *Институциональные ловушки и экономические реформы*. М.: Рос. экон. школа, 1998. 42 с.

32. Arrow K.J. *Economic welfare and the allocation of resources for invention*. The Rate and Direction of Inventive Activity: Economic and Social Factors. 1962;609–626. Available from: <https://www.nber.org/system/files/chapters/c2144/c2144.pdf>

33. Maskin E.S. The Economics of Kenneth J. Arrow: A Selective Review. *Annual Review of Economics*. 2019;11:1–26. Available at: [https://scholar.harvard.edu/files/maskin/files/the\\_economics\\_of\\_kenneth\\_j\\_arrow\\_a\\_selective\\_review\\_e\\_maskin\\_05.06.2019.pdf](https://scholar.harvard.edu/files/maskin/files/the_economics_of_kenneth_j_arrow_a_selective_review_e_maskin_05.06.2019.pdf)

34. Wright C.D. Science and Economics. *Science*. 1904;20(522):897-909.

35. Cupoli E. *The Relationship Between Nanotechnology and Economics*. Available from: <https://www.azonano.com/article.aspx?articleID=2545> (date of access: 10.09.2025).

#### ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Авторы заявляют о том, что при подготовке статьи не использовались технологии генеративного искусственного интеллекта и технологии, основанные на искусственном интеллекте.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Писаренко Жанна Викторовна** – доктор экономических наук, профессор Кафедры управления рисками и страхования Санкт-Петербургского государственного университета; председатель научной комиссии в области экономики и бизнеса СПбГУ; член-корреспондент Российской инженерной академии, Санкт-Петербург, Россия, [z.pisarenko@spbu.ru](mailto:z.pisarenko@spbu.ru), <https://orcid.org/0000-0002-9082-2897>

**Симченко Наталия Александровна** – доктор экономических наук, профессор, заведующий Кафедрой экономической теории и экономической политики Санкт-Петербургского государственного университета, Санкт-Петербург, Россия, [n.simchenko@spbu.ru](mailto:n.simchenko@spbu.ru), <https://orcid.org/0000-0001-8364-2313>

**Иванов Леонид Алексеевич** – кандидат технических наук, вице-президент Российской инженерной академии, член Международной федерации журналистов; Москва, Россия, [L.a.ivanov@mail.ru](mailto:L.a.ivanov@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0001-9513-8712>

**Се Венькай** – кандидат экономических наук, директор Института морского Шёлкового пути, Чжэцзянский университет Ванли, Центр исследований России и Центральной Азии, Научно-исследовательское подразделение Института морского Шёлкового пути, Нинбо, Китай, [xie@zww.edu.cn](mailto:xie@zww.edu.cn), <https://orcid.org/0000-0001-7742-175X>

**Насырова Гульмира Анатольевна** – доктор экономических наук, ассоциированный профессор, руководитель отдела стратегического развития и международного сотрудничества Республиканского научно-исследовательского института по охране труда Министерства труда и социальной защиты населения Республики Казахстан, Астана, Казахстан, [gnassyrova@yandex.ru](mailto:gnassyrova@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0001-6819-4946>

#### ВКЛАД АВТОРОВ

**Писаренко Ж.В.** – научные консультации, доработка текста, окончательное заключение; концепция исследования, разработка методологии, окончательное заключение.

**Симченко Н.А.** – концепция исследования, написание оригинального текста, разработка методологии, окончательное заключение.

**Иванов Л.А.** – администрирование проекта, доработка текста, проверка достоверности результатов исследования и заключения.

**Се В.** – методологическое сопровождение исследования, участие в формулировании цели и задач исследования.

**Насырова Г.А.** – разработка общей структуры статьи, методологическое сопровождение исследования.

#### Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 04.11.2025; одобрена после рецензирования 01.12.2025; принята к публикации 05.12.2025