

Том 94, Номер 3

ISSN 0869-5873

Март 2024



ВЕСТНИК РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК



НАУКА

— 1727 —

ВСЕПРЕВЛАДШИИ ДЕРЖАВ

СОДЕРЖАНИЕ

Том 94, номер 3, 2024

Научная сессия общего собрания членов РАН

Прембула	185
О деятельности Российской академии наук в 2023 году <i>Доклад президента РАН академика РАН Г.Я. Красникова</i>	189
<i>В.А. Садовничий</i> Российские университеты как ключевой элемент подготовки кадров для обеспечения технологического суверенитета страны	192
<i>А.И. Аветисян</i> Доверенный искусственный интеллект	200
<i>Н.А. Тестов</i> Российская навигационная спутниковая система и её перспективы	210
<i>С.М. Алдошин</i> Критические технологии освоения минерально-сырьевой базы Российской Федерации — от прогноза и добычи руд к извлечению металлов и созданию высокотехнологичной продукции	218
<i>А.В. Макаров, А.А. Иноземцев, В.Г. Дегтярь, Е.В. Харанжевский, А.Б. Котельников, А.А. Воннерук</i> Обеспечение технологического суверенитета России в металлургии и машиностроении	232
<i>В.А. Семенов</i> Изменения климата: причины, последствия, актуальные задачи	246
<i>Б.Н. Порфирьев, А.А. Широков</i> Структурно-технологические сдвиги и модернизация экономики России (средне- и долгосрочные перспективы)	255
<i>А.А. Дынкин</i> Структура будущего мирового порядка: дискуссионные вопросы	266
<i>Я.П. Лобачевский</i> Научное обеспечение приоритетных технологий агропромышленного комплекса Российской Федерации	275
<i>А.Д. Каприн</i> Онкология как перспективное направление в отечественных исследованиях и прикладных методах лечения неинфекционных заболеваний	283
<i>В.Г. Акимкин, В.В. Зверев, М.П. Кирпичников, Е.Д. Свердлов, В.И. Стародубов, Н.К. Янковский</i> Эпидемиологические, клеточные, генетические и эпигенетические аспекты биобезопасности	287
<i>В.И. Скворцова, В.В. Белоусов</i> Биомедицинские нейротехнологии: от изучения живых систем к коррекции патологии нервной системы	299
О научной сессии общего собрания членов РАН “Российская академия наук в решении проблем научно-технологического развития Российской Федерации” <i>Постановление общего собрания членов РАН</i>	305

CONTENTS

Vol. 94, No. 3, 2024

Scientific Session of the General Meeting of RAS Members

Preamble	185
On the activities of the Russian Academy of Sciences in 2023 <i>Report of the President of the Russian Academy of Sciences, Academician G.Ya. Krasnikov</i>	189
<i>V.A. Sadovnichy</i> Russian universities as a key element of personnel training to provide technological sovereignty of the country	192
<i>A.I. Avetisyan</i> Trusted artificial intelligence	200
<i>N.A. Testodov</i> Russian navigation satellite system: results and prospects	210
<i>S.M. Aldoshin</i> Critical technologies for the development of base of the mineral resources of the Russian Federation: from forecasting and ore mining to metal extraction and the creation of high-tech products	218
<i>A.V. Makarov, A.A. Inozemtsev, V.G. Degtyar, E.V. Kharanzhevskiy, A.B. Kotelnikov, A.A. Vopneruk</i> Ensuring of technological sovereignty of Russia in metallurgy and machine building	232
<i>V.A. Semenov</i> Climate change: causes, consequences, imperatives	246
<i>B.N. Porfiriev, A.A. Shirov</i> Structural and technological shifts and modernization of the Russian economy: mid-term and long-term prospects	255
<i>A.A. Dynkin</i> The structure of the future world order: controversial issues	266
<i>Ya.P. Lobachevsky</i> Scientific support of priority technologies of agro-industrial complex of the Russian Federation	275
<i>A.D. Kaprin</i> Oncology as a promising field in domestic research and applied methods of treatment of non-communicable diseases	283
<i>V.G. Akimkin, V.V. Zverev, M.P. Kirpichnikov, E.D. Sverdlov, V.I. Starodubov, N.K. Yankovsky</i> Epidemiological, cellular, genetic and epigenetic aspects of biosafety	287
<i>V.I. Skvortsova, V.V. Belousov</i> Biomedical neurotechnologies: from the study of living systems to the correction of pathology of the nervous system	299
About the scientific session of the general meeting of the RAS members "The Russian Academy of Sciences in the decision of problems of scientific and technological development of the Russian Federation" <i>Resolution of the general meeting of the RAS members</i>	305

НАУЧНАЯ СЕССИЯ ОБЩЕГО СОБРАНИЯ ЧЛЕНОВ РАН

ПРЕАМБУЛА

12 и 13 декабря 2023 г. в Москве, в Большом зале РАН состоялась Научная сессия Общего собрания членов Российской академии наук. В ней приняли участие помощник Президента РФ А.А. Фурсенко, министр науки и высшего образования РФ В.Н. Фальков, министр здравоохранения РФ М.А. Мурашко, министр сельского хозяйства РФ Д.Н. Патрушев, министр строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ И.Э. Файзуллин, руководитель Федерального медико-биологического агентства В.И. Скворцова, председатель Комитета по науке, образованию и культуре Совета Федерации ФС РФ Л.С. Гумерова, председатель Комитета по науке и высшему образованию Государственной думы ФС РФ С.В. Кабышев, генеральный директор ГК “Роскосмос” Ю.И. Борисов, президент Российской академии художеств З.К. Церетели. Официальные лица обратились к участникам собрания с приветствиями.

Помощник Президента РФ А.А. Фурсенко напомнил о важном предстоящем событии — 300-летию Академии наук. По его словам, в стране найдётся немного институтов, которые имели бы столь узнаваемое название и за которыми числилось бы так много достижений. Академия всегда откликалась, когда страна сталкивалась с серьёзными вызовами. Именно такая ситуация сложилась сейчас, и слово “наука” стало ассоциироваться с развитием государства и общества. А.А. Фурсенко выразил уверенность в том, что Академия наук сможет предложить руководству страны верные подходы к решению острых проблем современности.

На необходимость обеспечения подлинного технологического суверенитета страны обратил внимание министр науки и высшего образования РФ В.Н. Фальков. В 2023 г. реализован целый ряд проектов, нацеленных на решение этой задачи, в том числе по развитию инженерного образования. Подведены итоги второго тура отбора передовых инженерных школ, в основу которого легли экспертизы членов Российской академии наук. Ставится задача повышения качества школьного образования по физике, математике, химии и биологии.

Важная работа — совершенствование подходов к оценке результатов научных исследований и к категорированию организаций. Эта система должна быть направлена на формирование конкурентной среды в сфере исследований

и разработок, обеспечивать институтам возможность активно двигаться вперёд.

Говоря о результатах двух лет Десятилетия науки и технологий, В.Н. Фальков подчеркнул, что в реализации инициатив, проектов и мероприятий десятилетия принимают участие все субъекты Российской Федерации, в 79 из них приняты соответствующие региональные планы, а треть субъектов подготовила региональные программы научно-технологического развития. Увеличился и охват участников: в федеральных и региональных мероприятиях плана Десятилетия науки и технологий приняли участие более 30 млн человек.

По мнению министра здравоохранения РФ М.А. Мурашко, сегодняшнюю ситуацию в развитии медицины и медицинской науки можно охарактеризовать как глобальное изменение технологического уклада. Толчком к этому, безусловно, послужила пандемия коронавируса, которая заставила многие страны переосмыслить значимость научных разработок. Новые технологии кардинально меняют подход к пациенту, большинство из них — сквозные, то есть используются не только в здравоохранении. Особенно заметные успехи достигнуты в области создания лекарственных препаратов — отрасли экономики со значительным экспортным потенциалом.

Среди направлений исследований, в которых особенно важно сотрудничество с фундаментальной наукой, М.А. Мурашко назвал аналитику больших данных, биотехнологии, создание новой медицинской техники, в том числе сложной, ключевые подходы, которые меняют, в частности, принципы получения изображений, а также обеспечение активного долголетия и увеличение ожидаемой продолжительности жизни. К настоящему времени сформирован блок инициатив “Медицинская наука для человека”. По сути, речь идёт об управлении здоровьем индивида.

РАН традиционно выступает площадкой, которая объединяет различные ведомства в решении вопросов научного сопровождения деятельности, заявил в своём приветствии министр сельского хозяйства РФ Д.Н. Патрушев, и у Министерства сельского хозяйства с академией выстроено плодотворное взаимодействие. Оно направлено на повышение импортонезависимости агропромышленного комплекса, на обеспечение продовольственной безопасности России. Эксперты Академии наук

оценивают актуальность исследований, которые проводятся подведомственными образовательными и научными организациями Минсельхоза. В 2023 г. таких экспертиз было проведено более ста, в том числе в рамках федерального проекта “Аграрная наука”.

Сейчас усилия сконцентрированы на развитии российской селекции растений и животных. В частности, создаются методики оформления генетических паспортов сельхозрастений. В совокупности с другими мерами это позволит практически исключить использование фальсифицированных семян, вести мониторинг изменений генетического разнообразия. И здесь очень важна поддержка Академии наук.

Минсельхоз продолжает реализацию федеральной научно-технической программы, которая в 2023 г. претерпела ряд изменений, что позволит обеспечить основные сферы АПК собственными актуальными разработками и технологиями. В настоящее время проводится отбор комплексных научно-технических проектов, причём при анализе заявок министерство руководствуется мнением экспертного сообщества.

Обращаясь к участникам Общего собрания, министр строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ **И.Э. Файзуллин** подчеркнул, что Минстрой России активно сотрудничает с Российской академией наук в рамках экспертизы проектов научных исследований. Их результаты позволяют эффективно внедрять инновации в существующую нормативную базу и становятся методической основой, регламентирующей проектирование, строительство и эксплуатацию объектов. По заданию Минстроя в 2023 г. институтами РАН выполняется порядка 90 фундаментальных и 86 прикладных научных исследований. И.Э. Файзуллин выразил уверенность, что совместная работа будет продолжена и позволит выработать решения, направленные на развитие отраслей строительства и жилищно-коммунального хозяйства.

Нынешний период в развитии нашей страны, период активного технологического развития и достижения технологического суверенитета напрямую зависит от деятельности Российской академии наук, отметила руководитель Федерального медико-биологического агентства **В.И. Скворцова**. Федеральное медико-биологическое агентство является не только постоянным стратегическим партнёром Академии наук, но и своего рода её частью, поскольку директору многих учреждений ФМБА, большая часть его профессуры — члены РАН, состоящие в отделениях медицинских наук, физиологии, биологии и др.

Одно из основных направлений деятельности ФМБА — научные, научно-технические и инновационные разработки. В состав ФМБА входят

36 крупных научных центров, 12 из них занимаются фундаментальной биомедициной, 11 располагают собственным опытным производством, 21 центр имеет мощную клиническую базу. Благодаря этому обеспечена возможность осуществления полного цикла исследований, разработок, испытаний и внедрения инноваций. Например, за один лишь 2023 г. фактически полностью удалось переоснастить войска радиационной, химической и биологической защиты новыми изделиями, разработанными в агентстве, включая сенсорные и детекторные приборы, тест-системы, антидотные препараты, радиопротекторы, препараты крови, кровоостанавливающие препараты. Создаются новые универсальные вакцины, лекарства, различные медицинские изделия гражданского назначения.

С учётом полученного на сегодняшний день опыта можно утверждать, что любая биомедицинская проблема, в том числе в области нейротехнологий, выходит далеко за пределы и фундаментальной, и клинической медицины и требует мультидисциплинарного подхода, участия в её решении математиков, физиков, химиков, материаловедов, инженеров, а иногда и представителей социально-гуманитарных наук. Этот принцип внедряется на уровне Федерального медико-биологического агентства, но наилучшей площадкой для междисциплинарного объединения является, по мнению **В.И. Скворцовой**, Российская академия наук. Поэтому ФМБА предлагает сформировать при Президиуме РАН междисциплинарный совет в области нейротехнологии, предложив войти в него заинтересованным участникам всех отделений академии.

Изучение космического пространства всегда было предметом пристального интереса учёных, подчеркнул генеральный директор ГК “Роскосмос” **Ю.И. Борисов**. Ответ на фундаментальные вопросы строения и развития окружающей нас Вселенной позволит найти ключ к решению проблем, от которых в долгосрочной перспективе зависит существование нашей цивилизации. Поэтому сотрудничество ГК “Роскосмос” с Академией наук в деле исследований и освоения космического пространства имеет первостепенное значение. Трудно переоценить вклад академической науки в создание передовой ракетной космической техники. В 2023 г. отмечалось 25-летие Международной космической станции и 35-летие запуска космического корабля “Буран”. Такие масштабные передовые космические проекты были бы невозможны без тесного сотрудничества инженеров и представителей академической науки.

Понятно, сколь велико искушение повторить то, что уже смогли сделать другие, двигаться в чужой колее, отметил **Ю.И. Борисов**. Однако целенаправленное в отечественной науке должно исключать слепое повторение зарубежных достижений, следует

научиться пользоваться чужим опытом, но для себя ставить задачи по их дальнейшему прорывному развитию.

Большой вклад как в фундаментальную, так и в прикладную науку вносят исследования на Международной космической станции. На МКС в рамках российской экспедиции уже проведено более 400 научных экспериментов и целевых работ по широкому кругу направлений, включая медико-биологическое обеспечение полёта человека в космос. Если раньше космонавтам после нескольких дней пребывания в космосе приходилось проходить серьёзную реабилитацию, то сейчас, в первую очередь силами Института медико-биологических проблем РАН, удаётся обеспечивать длительные экспедиции. На МКС ведётся исследование свойств конструкций и материалов в космосе, отработка космической техники и технологий, изучение фундаментальных вопросов строения Вселенной и нашей планеты.

Такие исследования — необходимый этап дальнейшей экспансии человека в космос. Госкорпорация совместно с зарубежными партнёрами по МКС стремится продлить работу станции столько, сколько это будет возможно. Но ничего вечного не бывает. Ю.И. Борисов выразил признательность руководству страны и в первую очередь Президенту В.В. Путину за то, что был поддержан проект создания российской орбитальной станции. Сегодня работы в этом направлении уже идут полным ходом. Для разработки эскизного проекта привлекли широкую кооперацию исполнителей, новых постановщиков задач, обеспечено активное взаимодействие с научными институтами Российской академии наук и высшими учебными заведениями. При защите этого проекта госкорпорация подвергалась серьёзной критике — критике объективной. Придётся переосмыслить будущие проекты по изучению околоземного пространства, имея в виду прежде всего эффективность исследований.

Большая научная программа запланирована по освоению Луны, создаётся аппарат для исследований Венеры. Для получения знаний о происхождении и эволюции Вселенной, Галактики, Солнечной системы и Земли совместно с Российской академией наук создаются астрофизические обсерватории на базе автоматических космических аппаратов, которые по основным техническим характеристикам соответствуют зарубежным аналогам либо опережают их.

Одним из реально прорывных проектов для «Роскосмоса» стала работа по созданию транспортно-энергетического модуля на ядерном топливе. Сегодня мы впереди по этому направлению, но мир не стоит на месте, и всякое промедление в реализации этого проекта чревато утратой преимущества, считает Ю.И. Борисов. Поэтому необходимо

продумать, как организовать взаимодействие корпорации и РАН, чтобы сохранить темп движения вперёд.

Обращаясь к Общему собранию, председатель Комитета по науке и высшему образованию Государственной думы ФС РФ **С.В. Кабышев** подчеркнул, что сегодня наука призвана служить не только основной производительной силой, но и важнейшим ценностно-мировоззренческим фактором развития России, способствовать осмыслению нашей страны как самобытной державы-цивилизации и становлению справедливого многополярного мира.

Благодаря принципиальной позиции академика РАН Т.Я. Хабриевой в Конституции России в 2020 г. в соответствии с многовековыми национальными традициями были определены стратегические основы российской науки и её роль в решении проблем научно-технологического развития России. Конституция исходит из необходимости развития науки в качестве государственной функции, обязывает государство создавать правовые, организационные, кадровые, финансовые и иные условия, способствующие сохранению научного потенциала страны и научно-технологическим прорывам.

По мнению С.В. Кабышева, финансирование науки должно строиться на принципах экономической солидарности, что предполагает серьёзное увеличение вклада частного капитала в её развитие. Бизнес не только должен видеть для себя понятные стимулы в виде налоговых вычетов, различных субсидий, но и осознавать свою социальную ответственность. Научно-технологический прогресс начинается с безусловного приоритета научного подхода во всех сферах развития государства и общества, в реальном возвышении науки, её роли и престижа. В связи с этим председатель Комитета Государственной думы по науке и высшему образованию считает необходимым поставить на обсуждение Общего собрания вопрос о правовом обеспечении патриотической мобилизации российской науки. Нужно подумать над тем, чтобы на законодательном уровне закрепить положение о науке как основе суверенного развития российской государственности. Следует чётко определить сопряжение целей и задач единой государственной научно-технической политики с документами стратегического планирования, чтобы обеспечить сбалансированное пространственно-территориальное развитие России, её независимость и конкурентоспособность. С.В. Кабышев готов внести соответствующий законопроект в Государственную думу.

По словам председателя Комитета по науке, образованию и культуре Совета Федерации ФС РФ **Л.С. Гумеровой**, Российская академия наук — не только хранитель 300-летних традиций отечественных научных школ, это главная экспертная

организация страны и координатор осуществления фундаментальных исследований. В преддверии своего 300-летия академия заняла значимое место в национальной системе стратегического управления наукой. Законодательно закреплённая координирующая роль РАН в распространении научных знаний, повышении престижа науки, популяризации достижений науки и техники делает РАН ключевым исполнителем задач Десятилетия науки и технологий.

Совет Федерации, Комитет по науке, образованию и культуре находятся в плотном взаимодействии с Российской академией наук, её Президиумом по вопросам развития законодательства в сфере науки и технологий, подчеркнула Л.С. Гумерова. В сфере постоянного внимания — законодательное обеспечение благоприятных условий осуществления научных исследований, совершенствование

механизмов актуализации приоритетных направлений исследований и разработок, меры по сохранению и развитию кадрового потенциала науки, правовые основы научного руководства крупными научно-техническими проектами. Один из главных приоритетов Совета Федерации как палаты регионов — развитие науки в субъектах Российской Федерации, в том числе через институт заместителей глав регионов, ответственных за научно-технологическое развитие и интеллектуальную собственность.

По завершении приветственной части состоялась Научная сессия Общего собрания членов РАН “Российская академия наук в решении проблем научно-технологического развития Российской Федерации”. Мы предлагаем вниманию наших читателей доклады, представленные участниками сессии.

НАУЧНАЯ СЕССИЯ ОБЩЕГО СОБРАНИЯ ЧЛЕНОВ РАН

О ДЕЯТЕЛЬНОСТИ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК В 2023 ГОДУ

ДОКЛАД ПРЕЗИДЕНТА РАН АКАДМИКА РАН

Г.Я. КРАСНИКОВА

Российская академия наук, Москва, Россия

E-mail: g_krasnikov@pran.ru

Поступил в редакцию 16.01.2024 г.

После доработки 16.01.2024 г.

Принят к публикации 27.02.2024 г.

Ключевые слова: Российская академия наук, стратегические государственные решения, важнейшие научные достижения, Санкт-Петербургское отделение РАН, 300-летие РАН.

DOI: 10.31857/S0869587324030012, EDN: GHQSFK

Нынешнее Общее собрание посвящено прежде всего обсуждению научных вопросов. Тем не менее, пользуясь случаем, я хотел бы остановиться на отдельных результатах работы за время, прошедшее с нашего весеннего собрания. За этот период мы усилили взаимодействие Академии наук со всеми ветвями власти. Сегодня РАН активно участвует в принятии стратегических государственных решений и получает ощутимую поддержку со стороны всех государственных органов власти.

В рамках правительственного часа 7 декабря в Государственной думе Российской Федерации был заслушан отчёт вице-премьера Д.Н. Чернышенко, значительная часть которого была посвящена работе Российской академии наук и встретила одобрение депутатского корпуса. 9 ноября Академия наук представила Комитету Государственной думы по науке и высшему образованию доклад о реализации государственной научно-технической политики и важнейших научных достижениях.

Очень важно, что мы завершили создание Санкт-Петербургского отделения Академии наук. Многие из вас наверняка помнят, как за появление в северной столице такого центра консолидации научных сил в своё время активно выступал академик Ж.И. Алфёров и другие представители научного сообщества. Для этого был изменён устав академии, а в октябре 2023 г. состоялись выборы председателя отделения. Им стал академик РАН Андрей Иванович Рудской. Выбран и утверждён состав Президиума отделения, решены все юридические вопросы. Академии было возвращено историческое здание на Университетской набережной, 5, где до 1934 г. проводились заседания Президиума АН СССР.

Мы начали активно взаимодействовать с южным регионом, где создана и работает Ассоциация научных учреждений Юга России. Регулярно встречаемся с её представителями, весной 2023 г. собирались в Ростове, в сентябре — в Севастополе.

РАН находится в постоянном диалоге с научными организациями, с федеральными и региональными органами исполнительной власти, стремится быстро реагировать на возникающие вопросы. В частности, удалось оперативно решить вопрос стипендии для бывших членов Академии наук Украины, которые сейчас работают в научных организациях в новых субъектах Российской Федерации.

Несколько слов об экспертизе. Российская Академия существенно усилила своё участие в экспертном и научном обеспечении государственной деятельности. По сравнению с 2022 г. количество экспертиз выросло в полтора раза. Мы проводим большую работу с тем, чтобы экспертиза Академии наук была окончательной и не подлежала пересмотру. Государство доверило нам не только экспертизу государственных заданий и отчётов по ним, но и многих других стратегически значимых государственных инициатив, в том числе дорожных карт по десяти важнейшим государственным высокотехнологичным проектам, таким как квантовые вычисления, квантовые коммуникации, технология новых материалов и веществ, современные перспективные сети мобильной связи, перспективные космические системы и сервисы и др.

Мы продолжаем отрабатывать механизмы научно-методического руководства. Принципиально важно, чтобы оно было содержательным, а не формальным и закреплялось нормативными актами, в соответствии с которыми Академия наук играла

бы определяющую роль. В этом направлении руководство РАН активно взаимодействует с Минобрнауки России. Как вы знаете, весной 2023 г. под научно-методическое руководство Академии наук перешёл Курчатовский институт. Сегодня мы проводим регулярные совместные оперативные совещания по выработке механизмов научно-методического руководства, которые планируем затем реализовать в работе со всеми научными учреждениями. Продолжается работа по введению в оценку работ по госзаданиям критерия востребованности научных результатов. Это позволит создать в нашей стране единый, целостный научный ландшафт, обеспечить преемственность научных исследований.

Как уже сказал в своём приветствии собранию министр науки и высшего образования РФ В.Н. Фальков, с начала 2024 г. будет отменена категорийность институтов РАН, которая являлась предметом постоянных обсуждений и которая мешала развиваться институтам, причисленным ко второй и третьей категориям.

Важнейшим для науки событием стал запуск шестой подпрограммы по финансированию фундаментальных и поисковых научных исследований в целях безопасности и обороны нашей страны. Такие исследования не финансировались более 10 лет. В октябре 2023 г. вышло постановление Правительства РФ о запуске этой подпрограммы, и выделение средств на неё уже началось.

В августе 2023 г. вышло постановление Правительства РФ, в соответствии с которым принят отбор крупных научных проектов по приоритетным направлениям на 2024–2026 гг. Это так называемые “стоимиллионники”. Оценка таких проектов будет осуществляться экспертным советом РАН по представлению экспертных групп отделений РАН. Уже объявлен конкурс, итоги которого будут подведены в феврале 2024 г.

Что касается социальных вопросов и медицинского обслуживания, то удалось прикрепить членов Академии наук и их семьи к клиникам ФМБА в центральной части России, Сибири, на Дальнем Востоке, на Урале. Сейчас решается вопрос по новым субъектам в Южном федеральном округе, где достраивается новый центр ФМБА. Хотел бы выразить признательность руководителю ФМБА В.И. Скворцовой за плодотворную работу.

На днях был обнародован проект постановления Правительства РФ об увеличении ежемесячных выплат членам РАН с 1 января 2024 г. Хочу поблагодарить министра науки и высшего образования РФ В.Н. Фалькова и коллектив Минобрнауки России, с которым мы тесно сотрудничаем по многим вопросам.

Особое внимание уделяется международной деятельности. Регулярно проводятся двусторонние встречи представителей РАН с коллегами из зару-

бежных научных организаций, Академия наук участвует в крупных мероприятиях с международным присутствием. Так, в ноябре 2023 г. проведён международный форум молодых учёных стран Большой Евразии “Континент науки”, который собрал молодых исследователей из России и 14 зарубежных государств. Это было масштабное мероприятие. Кроме нашей площадки на Ленинском, 32 были задействованы площадки ИНИОН РАН и “Сколтеха”.

Академия наук играла важную роль в организации и проведении второго саммита и экономического форума “Россия–Африка”, который состоялся в конце июля 2023 г. в Санкт-Петербурге. В нём приняли участие делегации из 48 стран, причём 27 стран были представлены на уровне первых и вторых лиц государства.

Продолжается активное сотрудничество с НАН Беларуси. Регулярно проводятся совместные заседания в рамках постоянно действующей комиссии. На сентябрь 2024 г. запланировано проведение очередного заседания Международной ассоциации академий наук в Москве.

Отмечу, что Общее собрание РАН посетит заместитель генерального директора ЮНЕСКО по естественным наукам Лидия Брито. Завтра госпожа Брито примет участие в торжественной церемонии награждения лауреатов международной премии имени Д.И. Менделеева за достижения в области фундаментальных наук. Премия будет вручена двум выдающимся учёным — академику РАН Р.П. Белецкой и профессору К.А. Мюллеру (Германия). Подчеркну, что в настоящий момент это единственная награда в области фундаментальных наук в интересах устойчивого развития, присуждаемая под эгидой Всемирной гуманитарной организации ЮНЕСКО. Это лишний раз подтверждает роль Российской академии наук в гуманитарном сотрудничестве на международной арене.

Большая работа ведётся по взаимодействию с издательством “Наука”. Сейчас проходит согласование проекта постановления Правительства РФ об определении этого издательства в качестве единственного поставщика услуг по изданию научных журналов РАН. Сотрудничество Академии наук с издательством “Наука” имеет глубокую историю, учитывая, что издательство было создано всего на три года позже академии, в 2027 г. оно будет отмечать свой 300-летний юбилей.

Глубокоуважаемые коллеги, меньше двух месяцев остаётся до торжественной даты — 300-летия Российской академии наук. Это важное событие не только для нашей страны. Недавно юбилей Российской академии наук был включён в список памятных дат ЮНЕСКО, что выводит предстоящие мероприятия на мировой уровень. Безусловно, это событие привлечёт внимание мирового сообщества к русской науке, нашей богатой и славной истории. Основное мероприятие — торжественный вечер, по-

священный 300-летию Академии наук, состоится 8 февраля 2024 г. в Государственном Кремлёвском дворце и станет первым из числа многих юбилейных мероприятий, приуроченных к юбилею академии. В мае будет проведено торжественное Общее собрание членов РАН с приветственными выступлениями высоких гостей и иностранных делегаций. На конец июня запланировано расширенное выездное заседание Президиума РАН в Санкт-Петербурге в историческом здании на Университетской набережной, где Академия наук работала до 1934 г. В сентябре пройдёт посвященный 300-летию Академии наук форум “Наука — обществу и миру”. В ноябре со-

стоится Конгресс молодых учёных в “Сириусе”. Запланировано широкое участие научной молодёжи в праздновании юбилея Академии наук.

Я упомянул лишь крупные мероприятия, посвященные 300-летию академии. Помимо них, мы работаем по утверждённому правительством плану, который предусматривает выпуск монографий, проведение научных конференций, культурных и просветительских мероприятий и многое другое. Работает специальная комиссия, которая рассматривает все предложения по включению в действующий план новых мероприятий под знаком 300-летия Российской академии наук.

ABOUT THE ACTIVITIES OF THE RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES IN 2023

REPORT OF THE PRESIDENT OF THE RAS ACADEMICIAN OF THE RAS

G.Ya. KRASNIKOV^{a,*}

^a*Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

^{*}*E-mail: g_krasnikov@pran.ru*

Keywords: Russian Academy of Sciences, strategic government decisions, most important scientific achievements, St. Petersburg branch of the Russian Academy of Sciences, 300th anniversary of the Russian Academy of Sciences.

РОССИЙСКИЕ УНИВЕРСИТЕТЫ КАК КЛЮЧЕВОЙ ЭЛЕМЕНТ ПОДГОТОВКИ КАДРОВ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО СУВЕРЕНИТЕТА СТРАНЫ

© 2024 г. В.А. Садовничий^{a,*}

^aМосковский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

*E-mail: info@rector.msu.ru

Поступила в редакцию 20.12.2023 г.

После доработки 22.12.2023 г.

Принята к публикации 10.01.2024 г.

Статья подготовлена на основе доклада, с которым автор выступил на Научной сессии РАН 12 декабря 2023 г. Основное внимание уделено вопросам подготовки высококвалифицированных кадров, которые должны обеспечить ускоренное технологическое развитие страны. Подчеркивается роль ведущих университетов и Российского Союза ректоров в подготовке кадров, отмечается несоответствие структуры выпуска специалистов потребностям национальной экономики. Особое внимание уделено взаимодействию МГУ, других крупных университетов с Российской академией наук — взаимодействию, которое позволяет обеспечить подготовку кадров на высоком уровне и способствует закреплению выпускников в регионах.

Ключевые слова: подготовка кадров, высшая школа, МГУ имени М.В. Ломоносова, Российская академия наук, Российский Союз ректоров, естественно-научное образование.

DOI: 10.31857/S0869587324030022, EDN: GHIDGW

На наших глазах кардинально меняется геополитическая обстановка в мире, и государство принимает соответствующие меры. Правительством РФ утверждена Концепция технологического развития страны до 2030 года, в которой зафиксированы такие риски, как недостаточная способность адаптироваться к глобальным технологическим трендам (в частности, связанным с развитием искусственного интеллекта), низкая инновационная активность, отток высококвалифицированных кадров за рубеж и нарушение производственных цепочек вследствие санкций. Сейчас готовится обновлённая Стратегия научно-технологического развития России.



САДОВНИЧИЙ Виктор Антонович — академик РАН, ректор МГУ имени М.В. Ломоносова.

В августе 2023 г. около 60% российских предприятий заявляли о кадровом дефиците, в основном высококвалифицированных специалистов в высокотехнологичных сферах производства. 80% российских предприятий испытывали трудности с наймом новых сотрудников. Постепенно сокращается и число исследователей, занятых в НИОКР, в то время как у ряда лидирующих держав этот показатель растёт ускоренными темпами. Затраты на НИОКР в нашей стране увеличиваются, но их объёма по-прежнему недостаточно для ускоренного развития перспективных технологий. Острота проблемы обусловлена тем, что сложилась потребность в более высоком качестве рабочей силы, возрастают требования к компетенциям и творческим способностям работников, особенно инженерно-технического и естественно-научного профиля.

В этих условиях на высшую школу ложится особая ответственность. Какую бы проблему государственного значения мы ни взяли, необходимым условием её решения является подготовка кадров. Университеты в России всегда были и продолжают оставаться опорой государства. Стабильно развивающаяся система образования, её высокое качество и конкурентоспособность, готовность ответить на большие вызовы — важный фактор обеспечения

национальной безопасности страны. Мы осознаём эту ответственность. Я в данном случае говорю от имени Российского Союза ректоров, который без малого 30 лет имею честь возглавлять. Союз ректоров объединяет руководителей более 600 высших учебных заведений страны. Это авторитетная общественная организация, центр экспертизы важнейших решений в области государственной научно-образовательной политики.

Несколько слов о структуре современной российской высшей школы. В настоящее время подготовку по программам высшего образования осуществляют 722 вуза, подготовку кадров высшей квалификации — 556 вузов. В их числе 2 университета с особым статусом (Московский и Санкт-Петербургский), 10 федеральных университетов, 29 национальных исследовательских университетов, 33 опорных университета. Что касается структуры подготовки кадров, то в 2022 г. российские вузы выпустили 36 тыс. специалистов с математическим и естественно-научным образованием, столько же в области информатики и вычислительной техники, 160 тыс. экономистов и управленцев, 89 тыс. юристов. Такое соотношение, имея в виду главный вопрос, вынесенный на обсуждение Общего собрания РАН, вряд ли может быть признано оптимальным. При этом если в 2000 г. около 90% выпускников российских вузов оканчивали программы специалитета и 10% — бакалавриата, то через 20 лет у нас было уже 67% выпускников бакалавриата, 20% — магистратуры и только 13% — специалитета. Это следствие присоединения России к так называемому Болонскому процессу.

Моя позиция по Болонскому вопросу хорошо известна. Принципиальные дискуссии с его сторонниками велись и до подписания Болонской декларации и после, когда в российских вузах начались серьёзные изменения. Я выступал за сохранение фундаментальной направленности образования как нашего главного конкурентного преимущества. И моя точка зрения остаётся неизменной.

В 2007 г. в России была законодательно введена двухуровневая система высшего образования с возможностью поступления в магистратуру после бакалавриата любого направления. Понятно, что двухлетняя магистратура без соответствующего базового образования не способствует повышению качества образования. В итоге сегодня среди выпускников вузов (за исключением магистров) около 80% бакалавров и только около 20% специалистов. Напомню, что раньше это соотношение было обратным — специалистов наша система образования готовила более 90%. Естественно, эта тенденция привела к снижению уровня фундаментального образования.

В 2023 г. в Послании Президента Федеральному Собранию была поставлена задача совершенствования системы высшего образования. Начался пилотный проект, в котором участвуют пять российских вузов. Когда будут подведены итоги этого проекта, мы сможем их обсудить. А пока мы исходим из того, что новые экономические и технологические условия требуют от российской системы высшего образования эффективных подходов к подготовке кадров, в основе которых должны лежать следующие принципы:

- фундаментальность образования, особенно математического, в сочетании с гибким подходом к образовательному процессу;
- междисциплинарность;
- подготовка профильных специалистов в области информационных технологий и искусственного интеллекта;
- расширение цифровых компетенций для непрофильных специальностей;
- развитие фундаментального инженерного образования.

Обеспечение научно-технологического суверенитета связано с приоритетом определённых дисциплин. Это прежде всего математика и естественные науки. Вопрос повышения качества физико-математического и химико-биологического образования

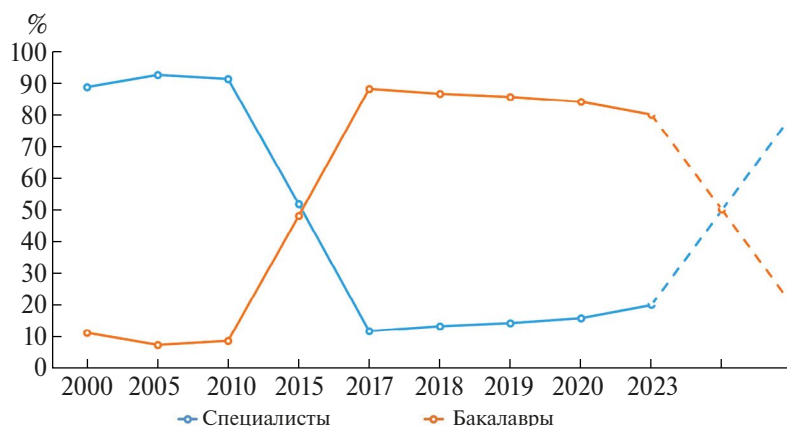


Рис. 1. Динамика подготовки выпускников по программам специалитета и бакалавриата

ставится на правительственном уровне. В ноябре 2023 г. в Московском университете прошло совещание на эту тему с участием министра науки и высшего образования В.Н. Фалькова и министра просвещения С.С. Кравцова. На совещании, в частности, шла речь о необходимости разработки четырёх концепций — математического, физического, химического и биологического образования. Московскому университету поручена подготовка концепции математического и биологического образования, концепции физического образования — Московскому физико-техническому институту, химического — Российскому химико-технологическому университету им. Д.И. Менделеева совместно с МГУ.

Одна из приоритетных задач — подготовка профильных высококвалифицированных специалистов в области информационных технологий и искусственного интеллекта. Сейчас на государственном уровне реализуется федеральный проект “Кадры для цифровой экономики”, увеличивается количество бюджетных мест в вузах по IT-специальностям. Однако перечень образовательных программ, связанных с разработкой и развитием информационных технологий и технологий искусственного интеллекта, должен быть расширен, необходимо усилить практическую подготовку по этим специальностям, в том числе с привлечением организаций, занимающихся разработкой и внедрением интеллектуальных систем. При условии повышения ответственности работодателей целевое обучение может стать хорошим инструментом подготовки кадров для приоритетных отраслей экономики.

Конечно, когда идёт процесс изменений в большой системе, возникают трудности, и главная из них — запаздывание. Мы знаем, как работает резерв управленческих кадров для органов власти, но сейчас не менее важен кадровый резерв, способный обеспечить технологический суверенитет. Должна быть предусмотрена материальная поддержка лучших специалистов начиная со старших курсов университетов стипендиями и грантами, репутационная поддержка, механизмы содействия трудоустройству. На создание такого резерва направлен, в частности, федеральный проект “Передовые инженерные школы”. Этот проект разработан Министерством науки и высшего образования РФ в развитие одной из стратегических инициатив, утверждённых Правительством РФ, и является частью государственной программы “Научно-технологическое развитие Российской Федерации”.

За 2022 г. в нашей стране было открыто 30 передовых инженерных школ на базе ведущих вузов в 15 регионах. Их задача — подготовить квалифицированные кадры, способные создавать инновационные разработки и продукты для высокотехнологичных и наукоёмких секторов экономики. Это касается самых востребованных направлений: цифровых технологий, микроэлектроники, фотоники и приборостроения, биотехнологии и геномной

инженерии, искусственного интеллекта, ядерной энергетики и др. Обучение в передовых инженерных школах выходит за рамки привычного образовательного процесса. Там создаются лаборатории, испытательные площадки и даже целые технопарки, оснащённые новейшим оборудованием. Для повышения эффективности и развития передовых инженерных школ в каждом регионе будут действовать экспертные группы по сопровождению проекта.

Московским университетом разработан образовательный стандарт по специальности “фундаментальная инженерия” в области математических и естественных наук. Это фундаментальная междисциплинарная университетская подготовка специалистов в смежных областях (физика, химия, биология, генетика) со знаниями физико-химических основ современных производственных технологий, компьютерного инжиниринга и проектирования. Иными словами, речь идёт о новом поколении инженеров, способных превращать научные открытия в технологические разработки высокого уровня.

Привлечение наиболее способных абитуриентов в инженерно-технические и естественно-математические специальности — то, что сейчас обозначается аббревиатурой STEM (Science, Technology, Engineering, Mathematics) — и дальнейшее сохранение их в профессии требуют развития механизмов отбора при одновременном сопровождении их кадровых траекторий. Желательно, чтобы для инженерно-технических, естественно-научных, математических специальностей были введены минимальные пороговые значения оценки ЕГЭ. Не следует ограничиваться ЕГЭ как единственным механизмом отбора. Дополнительные вступительные испытания в ведущих вузах, олимпиады также способствуют повышению уровня знаний абитуриентов. Важно, чтобы уже начиная со старших классов школы ученики и родители имели представление о перспективных карьерных траекториях в рамках вышеуказанных специальностей. Инструментами таких траекторий являются механизмы ранней профориентации школьников, включение их во взаимодействие с университетами (как через профильные школы, гимназии и лицеи, так и через школы юных математиков, физиков и т.д.; здесь можно тиражировать успешный опыт Московского университета, в частности Специализированного учебно-научного центра им. А.Н. Колмогорова и малого мехмата).

Необходимо развивать взаимодействие работодателей и университетов не только в рамках ведущих корпораций и вузов. Все предприятия заинтересованы в преодолении дефицита кадров и отчасти решают эту проблему за счёт программ дополнительного профессионального образования и более тесного взаимодействия с вузами, но эту работу надо усилить. Затраты российских компаний на образование работников в среднем оцениваются лишь в 1% фонда оплаты труда. Высококачественные программы повышения квалификации могут

позволить себе лишь крупные компании. В то же время университеты способны стать центрами вовлечения малого и среднего бизнеса в дополнительное профессиональное образование.

Ещё одна проблема — концентрация университетов в крупных центрах. Высокая концентрация университетского образования усугубилась вследствие оптимизации вузовской системы в период с 2012 г. Так, за 2013–2019 гг. общее число вузов в России сократилось на 42%, в том числе головных учреждений — на 23%, филиалов — на 56%. Особенно сильно пострадали города с численностью населения до 250 тыс. человек: там было закрыто более половины вузов. В результате более 50% студентов обучаются в двух из восьми федеральных округов — Центральном и Приволжском; на Москву и Санкт-Петербург приходится около 24% студентов, а ещё на 9 регионов — 30%. В этой ситуации образовательная миграция носит и будет носить отчётливый центростремительный характер: студенты переезжают в несколько крупных центров и по окончании учёбы не возвращаются домой.

На укрепление региональной базы подготовки кадров нацелена программа научно-образователь-

ных консорциумов “Вернадский”, идею которой я предложил в 2018 г. на XI Съезде Российского Союза ректоров. Программа предполагает интеграцию ведущих университетов, региональных вузов и академических институтов, социально ориентированного бизнеса с целью развития прорывных технологий и новых разработок в интересах социально-экономического развития регионов. К настоящему времени создано 37 консорциумов “Вернадский” в субъектах Российской Федерации на основе договора, который подписывает глава региона. Ещё 15 регионов хотят подключиться к этой программе. Об её эффективности свидетельствуют более 300 успешно реализованных проектов. Это сетевые образовательные программы, центры коллективного пользования, совместные кафедры и лаборатории — все они направлены на научно-технологическое развитие территорий нашей страны.

Одним из условий технологического суверенитета является сохранение и укрепление позиций российских вузов в глобальной научно-образовательной системе. По оценке Проджект Атлас (Project Atlas) по состоянию на 2022 г., 6% международной студенческой мобильности приходится на Россию,

Научно-образовательные консорциумы “Вернадский”

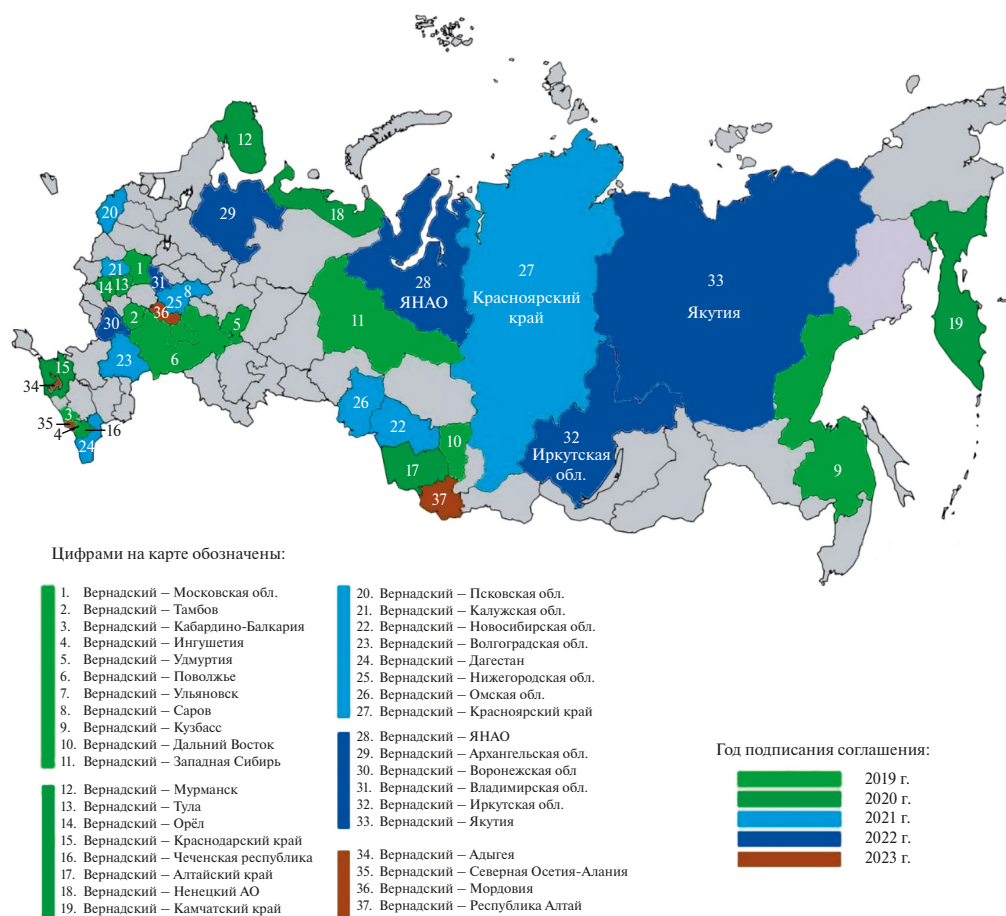


Рис. 2. Распределение научно-образовательных консорциумов “Вернадский” по территории РФ

которая занимает 6-е место в мире по абсолютному количеству привлечённых иностранных студентов (351 тыс. человек). Это 9% от общего числа студентов в стране, что ставит Россию на 8-ю позицию в мире по этому показателю. Иностранные студенты в основном обучаются по ключевым для технологического суверенитета специальностям. Однако позиции России в данной области неустойчивы в силу неопределённости с признанием российских дипломов и степеней за рубежом. Имеющиеся межправительственные соглашения позволяют рассчитывать на сохранение существующего положения, невзирая на риторику об отказе от Болонской системы. Более того, признание российских дипломов могло бы быть расширено в многостороннем порядке, чтобы сформировать единое образовательное пространство с нынешними основными партнёрами России из развивающегося мира, в частности со странами БРИКС+.

Важный элемент подготовки высококвалифицированных кадров — аспирантура. Но эффективность деятельности аспирантуры оставляет желать лучшего. На протяжении последних лет численность аспирантов устойчиво снижалась, с 2010 г. она сократилась на 30%. В 2022 г. выпуск из аспирантуры составил менее 50% от числа принятых. Недостаточное число выпускников аспирантуры не позволяет решить задачу воспроизводства научных кадров для приоритетных научных сфер. Что касается защиты кандидатских диссертаций, то здесь ситуация ещё более тревожная. С 2010 по 2022 г. число защит уменьшилось с 33763 в год до 11441, в среднем на 9% в год. В самые последние годы наметилась некоторая стабилизация, но на очень низком уровне, который не обеспечивает даже простое воспроизводство научно-педагогических кадров.

Известно, что такая ситуация стала следствием подхода к аспирантуре как третьей ступени образования при сокращении доли в ней научной деятельности. Эта проблема неоднократно обсуждалась

на многих площадках, в том числе на съездах Российского Союза ректоров. В 2020 г. озабоченность научного сообщества была услышана, и Президент страны подписал новый закон об аспирантуре. Теперь успешное окончание аспирантуры предполагает защиту диссертации, причём большую часть своего времени аспирант обязан посвящать науке.

Нельзя не сказать и об аспирантской стипендии, которая, безусловно, требует повышения. В конце ноября подписан Указ Президента об учреждении стипендии в размере 75 тыс. рублей для 2000 аспирантов и адъюнктов, проводящих исследования в научно-технической сфере. В целях подготовки кадров Российской Союз ректоров предлагает создать нечто вроде сетевой аспирантуры, в которой у аспиранта будет возможность выполнять диссертационное исследование одновременно на базе вуза и научной организации и иметь, соответственно, двух научных руководителей. При этом образовательные и научные организации могли бы обеспечить приём аспиранта в штат на должность научного или научно-вспомогательного сотрудника.

Московский университет обладает самой большой аспирантурой в России. В настоящий момент в аспирантуре МГУ обучаются 4.5 тыс. человек. Ежегодно университет выпускает порядка 800 аспирантов, более половины из них защищаются. Для включения аспирантов в научную работу используются разнообразные внутренние инструменты, осуществляется сотрудничество с внешними организациями, прежде всего с институтами Академии наук. Взаимодействие осуществляется по нескольким направлениям: это и совместное научное руководство аспирантами, договоры о сотрудничестве, совместные научные исследования, прикрепление сотрудников РАН для сдачи кандидатских экзаменов. Импульс развитию сотрудничества между российскими университетами и учреждениями РАН придало заключённое 25 ноября 2022 г. соглашение между РАН и Российским Союзом ректоров.



Рис. 3. Динамика численности аспирантов с 2010 по 2022 г.

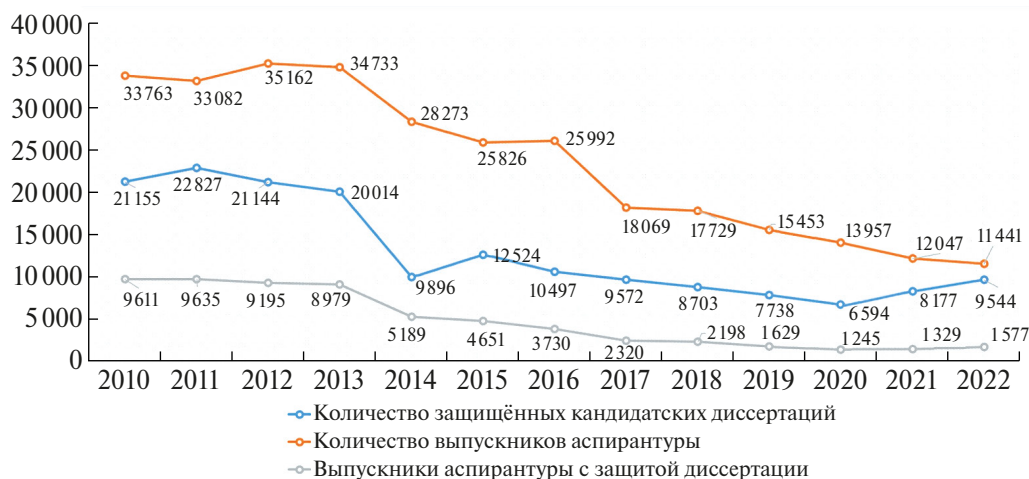


Рис. 4. Соотношение численности выпускников аспирантуры и количества защищённых кандидатских диссертаций

В настоящее время реализуются сотни совместных научно-образовательных проектов российских университетов и учреждений РАН, функционируют базовые кафедры, технопарки, бизнес-инкубаторы, действуют совместные диссертационные советы и сетевые образовательные программы.

Совершенствованию системы подготовки кадров будут способствовать:

- эффективное функционирование базовых кафедр вузов в научных организациях и лабораторий, создаваемых учреждениями РАН на базе вузов; чрезвычайно важным представляется открытие в региональных вузах обособленных подразделений ведущих институтов РАН;
- развитие академической мобильности между образовательными и научными организациями, в том числе в формате стажировок, производственной и исследовательской практики;
- разработка совместных образовательных программ вузов и РАН по приоритетным направлениям;
- инициирование организационно-законодательных решений, направленных на финансирование совместных научных проектов вузов и учреждений РАН (в том числе в рамках целевых конкурсов РНФ, конкурсов мегагрантов Минобрнауки России);
- создание информационной базы по имеющемуся научному оборудованию в целях организации коллективного пользования им; Московский университет приглашает научные коллективы РАН к использованию нового суперкомпьютерного комплекса “МГУ-270”.

Говоря о молодых исследователях, необходимо сказать несколько слов и о государственной системе присуждения учёных степеней. Исторически за присуждение степени и экспертизу качества научных работ отвечает Высшая аттестационная комиссия, которая за последние 10 лет проделала большую работу, стала эффективнее. В 2016 г.

Московскому и Санкт-Петербургскому университетам было предоставлено право самостоятельно присуждать учёные степени. Впоследствии перечень организаций, имеющих такое право, был расширен, и сегодня им обладают 8 научных организаций и 28 образовательных. Основываясь на опыте функционирования этой системы в МГУ, мы призываем аккуратно относиться к реформированию существующей системы и обсудить вопрос о работе диссертационных советов на базе вузов. Включение в их состав профильных специалистов высокого уровня — сотрудников научных организаций — могло бы положительно повлиять на качество экспертизы научных работ.

В целом система российского высшего образования должна основываться на стратегическом партнёрстве вузов и академических институтов. Я убеждён, что только такой подход позволит обеспечить высокое качество высшего образования.

Один из позитивных примеров — открытый в 2021 г. филиал Московского университета в Сарове, который становится основой подготовки кадров для Национального центра физики и математики, а поддержку, помимо федерального бюджета, оказывает Госкорпорация “Росатом”. В Филиале МГУ-Саров реализуются пять магистерских программ обучения, и в каждую активно вовлечены члены Российской академии наук. Сейчас в Сарове обучаются более 200 магистрантов и аспирантов. Каждому предоставляется комфортабельное общежитие, выплачивается стипендия (магистрантам — 55 тыс. рублей, аспирантам — 75 тыс. рублей). Гарантировано трудоустройство в системе “Росатома”, куда распределяются почти все выпускники.

Не могу не сказать о тесном взаимодействии, точнее, неразрывной связи Московского университета с Российской академией наук. В МГУ работают около 300 членов Академии, в том числе три вице-президента РАН и 12 членов Президиума РАН;



Рис. 5. Здание филиала МГУ в г. Сарове

13 деканов факультетов и около 100 заведующих кафедрами и лабораториями — члены Российской академии наук. Филиалы и факультеты Московского университета действуют в наукоградах: Черногловке, Пущине, Дубне, Сарове. Студенты проходят профильную производственную практику в научных организациях на высокотехнологичном оборудовании. Так Академия наук сотрудничает со многими университетами страны.

Важный элемент подготовки научных кадров — система научных центров мирового уровня. В настоящее время созданы 17 таких центров по перспективным направлениям науки и технологий, в том числе 4 математических и 3 геномных. Почти все центры мирового уровня работают как консорциумы вузов и институтов РАН. За три года работы там подготовлены сотни молодых специалистов. Опыт Московского университета, участвующего в работе двух центров мирового уровня — математического и Центра «Сверхзвук» — показывает, что эта инициатива оказалась полезной и её следует поддерживать.

Взаимодействие с институтами Российской академии наук всегда занимало важное место в организации научных исследований в лабораториях МГУ. В последнее десятилетие Московский университет выполнял совместные работы по меньшей мере с 50 институтами РАН. Тематика взаимосвязанных исследований охватывает практически весь спектр естественных и гуманитарных наук. Отмечу и совместные инициативные научные проекты, проекты при поддержке РФФИ и РНФ, совместные экспедиционные исследования. Опубликовано

более 600 совместных работ в зарубежных изданиях, индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science.

О масштабах сотрудничества свидетельствуют, например, работы центра по Квантовым технологиям, в которых в качестве основных исполнителей, помимо МГУ, выступают пять институтов РАН (Институт физики твёрдого тела, Физико-технологический институт, Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения РАН, Казанский научный центр РАН). Стратегическое партнёрство вузов и академических институтов позволяет обеспечить качественную подготовку высококвалифицированных кадров.

На мой взгляд, здесь важно учитывать и опыт других стран. Приведу один пример. После наших выдающихся успехов в освоении космоса президент США Дж. Кеннеди заявил, что страна проиграла русским на школьной скамье. Вскоре в США была создана специальная комиссия, которую возглавил первый американский астронавт Дж. Гленн. Вот заключение этой комиссии: «Комиссия убеждена, что на заре нового столетия и тысячелетия будущее благосостояние нашего государства и народа зависит не только от того, насколько хорошо мы обучаем наших детей в целом, но именно от того, насколько хорошо мы обучаем их математике и естественным наукам».

В заключение позвольте сформулировать актуальные направления работы и задачи по совершенствованию системы подготовки кадров для обеспечения технологического суверенитета нашей страны.

1. Университетам России совместно с Российской академией наук нужно взять на себя ответственность за усиление фундаментальной составляющей системы образования, уделив особое внимание её математической основе.

2. Министерству науки и высшего образования РФ, Российскому Союзу ректоров, Российской академии наук следует разработать и утвердить новую концепцию естественно-научного образования, а Правительству России рассмотреть и утвердить эту концепцию.

3. Необходимо сформировать систему взаимодействия работодателей, бизнеса с университетами, что обеспечит эффективность подготовки кадров, их распределение, позволит сократить миграционные потоки.

4. Министерство науки и высшего образования РФ, Российский Союз ректоров, Российская академия наук должны обсудить вопрос о создании в университетах междисциплинарных школ и принять необходимые меры по реализации этой инициативы.

5. Следует уделять особое внимание системе повышения квалификации в российских университетах, учитывая непрерывное изменение требований к компетенциям работников и новые вызовы для развития экономики.

6. Необходимо поднять на новый уровень работу с учителями средних школ, проводить совместные съезды учителей и вузовских преподавателей, отказаться от ЕГЭ как единственного критерия при поступлении в вуз.

7. Нужно оказывать особую поддержку специализированным школам типа школы им. А.Н. Колмогорова МГУ, рассмотреть возможность создания подобных учебных заведений в регионах при поддержке ведущих университетов страны.

8. Правительству России следует предусмотреть необходимые меры по увеличению финансирования системы образования с целью решения актуальных задач подготовки кадров.

RUSSIAN UNIVERSITIES AS A KEY ELEMENT OF PERSONNEL TRAINING TO PROVIDE TECHNOLOGICAL SOVEREIGNTY OF THE COUNTRY

V.A. Sadovnichy^{a,*}

^a*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

^{*}*E-mail: info@rector.msu.ru*

The article was prepared on the basis of a report that the author delivered at the Scientific Session of the Russian Academy of Sciences on December 12, 2023. The main attention is paid to the issues of training highly qualified personnel who should ensure the accelerated technological development of the country. The role of leading universities and the Russian Union of Rectors in personnel training is emphasized, and the discrepancy between the structure of graduating specialists and the needs of the national economy is noted. Particular attention is paid to the interaction of Moscow State University and other large universities with the Russian Academy of Sciences — interaction that allows for high-level training and helps to retain graduates in the regions.

Keywords: personnel training, higher school, Lomonosov Moscow State University, Russian Academy of Sciences, Russian Union of Rectors, natural science education.

НАУЧНАЯ СЕССИЯ ОБЩЕГО СОБРАНИЯ ЧЛЕНОВ РАН

ДОВЕРЕННЫЙ ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ

© 2024 г. А.И. Аветисян^{а,*}

^аИнститут системного программирования им. В.П. Иванникова РАН, Москва, Россия

*E-mail: arut@ispras.ru

Поступила в редакцию 31.01.2024 г.

После доработки 02.02.2024 г.

Принята к публикации 06.03.2024 г.

В статье рассматривается проблема создания доверенных технологий искусственного интеллекта. Современный искусственный интеллект основан на машинном обучении и нейронных сетях и уязвим для ошибок. Попытки установить стандарты разработки доверенных технологий искусственного интеллекта пока не увенчались успехом. Для обеспечения его безопасности требуются соответствующая научно-технологическая база, новые инструменты и методики противодействия атакам. Автор приводит результаты, полученные Исследовательским центром доверенного искусственного интеллекта Института системного программирования им. В.П. Иванникова РАН, а также предлагает модель работы, которая может способствовать достижению технологической независимости и обеспечить долгосрочное устойчивое развитие в этой области. Статья подготовлена на основе доклада, заслушанного на научной сессии Общего собрания членов РАН 12 декабря 2023 г.

Ключевые слова: доверенный искусственный интеллект, кибербезопасность, уязвимости, регулирование, репозиторий доверенного ПО, слабый искусственный интеллект, нейросети, федеративное обучение, машинное обучение.

DOI: 10.31857/S0869587324030039, **EDN:** GHFCAB

Термин “доверенный искусственный интеллект” вошёл в оборот относительно недавно и в последние несколько лет применяется в отношении защищённых и безопасных технологий искусственного интеллекта (ИИ). Чтобы понять, как сделать их именно такими, обратимся вначале к истории информационно-коммуникационных технологий (ИКТ) в целом, поскольку методики и инструменты обеспечения их безопасности появились задолго до систем искусственного интеллекта.

Активное развитие таких технологий началось в 1940-е годы. В СССР точкой отсчёта стал 1948 год:



АВETИСЯН Арутюн Ишханович — академик РАН, заместитель президента РАН, директор ИСП РАН.

29 июня был основан Институт точной механики и вычислительной техники (ИТМиВТ) Академии наук СССР; 4 декабря член-корреспондент АН СССР И.С. Брук и инженер-конструктор Б.И. Рамеев подали заявку на изобретение автоматической цифровой вычислительной машины; 19 декабря учреждено Специальное конструкторское бюро № 245 (впоследствии Научно-исследовательский центр электронной вычислительной техники). В 1949 г. основана кафедра вычислительной математики механико-математического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова. Началось производство первых электронно-вычислительных машин: МЭСМ (1951), “Стрела” (1953), М-100 (1958), “Днепр” (1961). В 1967 г. была создана БЭСМ-6 — первый суперкомпьютер в СССР. Главным конструктором выступил академик С.А. Лебедев (ИТМиВТ); в том же институте была предложена и операционная система для БЭСМ-6 — Д-68 (разработчики — Л.Н. Королёв, А.Н. Томилин, В.П. Иванников и другие).

Научно-технологическая основа информационно-коммуникационных технологий, заложенная в те годы как в нашей стране, так и за рубежом, позволила обеспечить их бурное развитие в последующие десятилетия. К настоящему времени раз-

меры программных систем значительно выросли, многократно усложнились их разработка и сборка. Например, размер дистрибутива операционной системы Debian на базе Linux в 2019 г. превысил отметку в миллиард строк кода, а сейчас составляет почти 2 млрд. Размер популярных фреймворков машинного обучения PyTorch и TensorFlow превышает 7 млн и 10 млн строк соответственно. В мире постоянно растёт объём больших данных: в 2022 г. он составлял 97 зеттабайт (1 зеттабайт = 1 миллиард терабайт), а в 2025 г., по некоторым прогнозам [1], достигнет 180 зеттабайт. Число проектов на веб-сервере GitHub в 2023 г. составило 420 млн, а число разработчиков превысило 100 млн человек. В этом сложном мире становится всё труднее обеспечивать необходимые качества современного программного обеспечения (ПО): эффективность, продуктивность и доверенность, последняя включает в себя и безопасность.

Основной источник функциональных, архитектурных и других уязвимостей в ПО и аппаратуре — ошибки, которые очень трудно отличить от закладок и недокументированных возможностей. Информацией об уязвимостях могут воспользоваться хакеры (просто из интереса), преступники и представители спецслужб, причём эксплуатация некоторых уязвимостей не составляет труда для более или менее опытного человека. Известный пример — уязвимость Heartbleed: за счёт переполнения буфера атакующий может получить доступ к участку оперативной памяти с незашифрованными логинами и паролями. Версия библиотеки OpenSSL с этой уязвимостью вышла в марте 2012 г., а саму уязвимость удалось обнаружить только спустя два года. На момент обнаружения уязвимыми были полмиллиона веб-сайтов.

Повсеместное внедрение информационно-коммуникационных технологий и наличие серьёзных проблем с их безопасностью привели к необходимости законодательного регулирования процессов разработки. Стало ясно, что недостаточно использовать классические методы защиты (защита по периметру, проверка доступа, антивирусы и др.), так как уязвимости всё равно остаются внутри программного обеспечения. Необходим поиск новых моделей, методов и технологий в области анализа и трансформации программ, направленных на устране-

ние максимального количества уязвимостей в исполняемом коде на этапе разработки ПО, а также поддержание устойчивости готового программного обеспечения, затруднение негативных воздействий существующих уязвимостей или смягчение последствий их воздействий.

Первые стандарты разработки безопасного ПО были предложены в США. В 1999 г. в Национальном институте стандартов и технологий (NIST) началась работа над стандартами Common Criteria. В 2004 г. компания Microsoft сделала достоянием гласности примерный регламент цикла разработки безопасного программного обеспечения (рис. 1). В России в 2016 г. был принят соответствующий ГОСТ Р 56939-2016 [2]; завершается подготовка ГОСТов по отдельным процессам и инструментам (например, по статическому анализу и по безопасному компилятору, оба вводятся в действие в апреле 2024 г.). В Евросоюзе в 2019 г. был принят Закон о кибербезопасности [3] — система сертификации ПО, сервисов и процессов. В Китае в 2023 г. утверждены 19 стандартов кибербезопасности, предложенных Техническим комитетом 260, отвечающим за национальную безопасность в этой сфере.

В связи с появлением в последние два десятилетия нормативной базы создаётся и соответствующий инструментарий. В Институте системного программирования РАН поиск в этом направлении ведётся с 2002 г. и к настоящему моменту создан полный стек (от англ. stack — стопка) технологий — от безопасного компилятора до анализа бинарного кода, обеспечивающий технологическую независимость в этой области.

Создание инструментов РБПО возможно только на основе результатов фундаментальных исследований, поэтому в конце 2018 г. президиумом РАН было принято решение о необходимости развития нового научного направления — кибербезопасности [4]. В 2021 г. в номенклатуру специальностей, по которым присуждается учёная степень кандидата или доктора физико-математических наук, приказом Минобрнауки России включена “кибербезопасность” [5]. Она объединяет такие направления исследований, как анализ и систематизация уязвимостей, моделирование политики информационной безопасности, угроз и атак, методы, алгоритмы и средства пострелизно-

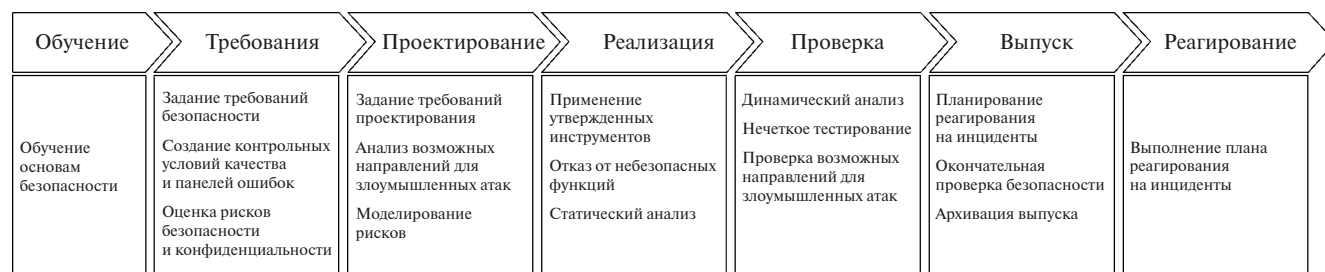


Рис. 1. Жизненный цикл разработки безопасного программного обеспечения (Microsoft)

го глубокого анализа защищённости программного обеспечения и многое другое.

Отметим, что так развивалась кибербезопасность программных систем, не использующих искусственный интеллект. С появлением и повсеместным внедрением ИИ многое изменилось.

История искусственного интеллекта восходит к 1950-м годам. Сам термин появился в 1956 г.; он был предложен американским математиком Дж. Маккарти на семинаре в Дартмутском университете (США) [6]. Цель исследований в этой области — позволить компьютеру выполнять интеллектуальные действия, ранее доступные только человеку (например, вести простой диалог или играть в шахматы). Изначально задачу видели в построении модели объекта автоматизации, а алгоритм решения основывался на правилах работы с моделью. В конце XX в. поиски в этом направлении активизировались, и основным стал метод решения задачи по аналогии: на этапе обучения алгоритм получал примеры вопросов и правильных ответов, а на этапе применения — получал вопросы и выдавал ответы. Машинное обучение довольно быстро совершенствовалось. В 1997 г. компьютер Deep Blue американской компании IBM выиграл шахматный матч из шести партий с Г. Каспаровым (тогда действующим чемпионом мира по версии Профессиональной шахматной ассоциации). В 2002 г. разработчики представили первый робот-пылесос. В 2010 г. была сформирована база данных ImageNet, объединившая 14 млн изображений 20 тыс. категорий. В 2011 г. суперкомпьютер Watson компании IBM одержал победу в интеллектуальном телешоу Jeopardy! В том же году в составе программного обеспечения смартфонов компании Apple появился первый виртуальный голосовой помощник Siri. В 2016 г. интернет-сервис Google Translate начал использовать нейронный машинный перевод для восьми языков, а с 2022 г. стали появляться и совершенствоваться “большие

языковые модели” — Open AI ChatGPT, в их числе YandexGPT2, RuGPT3 (Сбер) и другие. Таким образом, можно утверждать, что системы современного искусственного интеллекта базируются на различных видах машинного обучения и нейросетях.

Столь впечатляющие успехи ИИ за последние 10–15 лет связаны с ускоренным развитием суперкомпьютерных мощностей и появлением огромных массивов данных (рис. 2). Основу этих успехов заложили представители классической математики, в том числе отечественные, что признано на мировом уровне. Так, исследования академика АН СССР А.Н. Колмогорова [7] помогли обосновать решения задач, возникающих в процессе машинного обучения, а труды академика АН СССР и РАН А.Н. Тихонова [8] заложили основу методов вычислительной математики, позволив существенно ограничить суперкомпьютерные ресурсы, необходимые для решения задач искусственного интеллекта.

Научные подходы к ИИ, методы и алгоритмы активно развиваются, однако не следует забывать, что мы живём в мире так называемого “слабого искусственного интеллекта” (*англ.* Weak AI, или Narrow AI). Он основан на машинном обучении и нейронных сетях, способен извлекать информацию из ограниченного набора данных, а в случае их искажения может выдать необъективный (неэтичный, дискриминационный) результат. “Слабый ИИ” уязвим для предвзятости, необъективности и ошибок. “Сильный искусственный интеллект” (*англ.* Strong AI, General AI), способный решать задачи на уровне интеллектуальных возможностей человека, строить стратегии и функционировать в условиях неопределённости, пока существует только в теории, так как отсутствуют методы и алгоритмы, на основе которых он мог бы функционировать. Существующие направления исследований развиваются в рамках “слабого ИИ”. Устройства с “сильным ИИ”, можно предположить, удастся реализовать лишь в очень отдалённой перспективе.

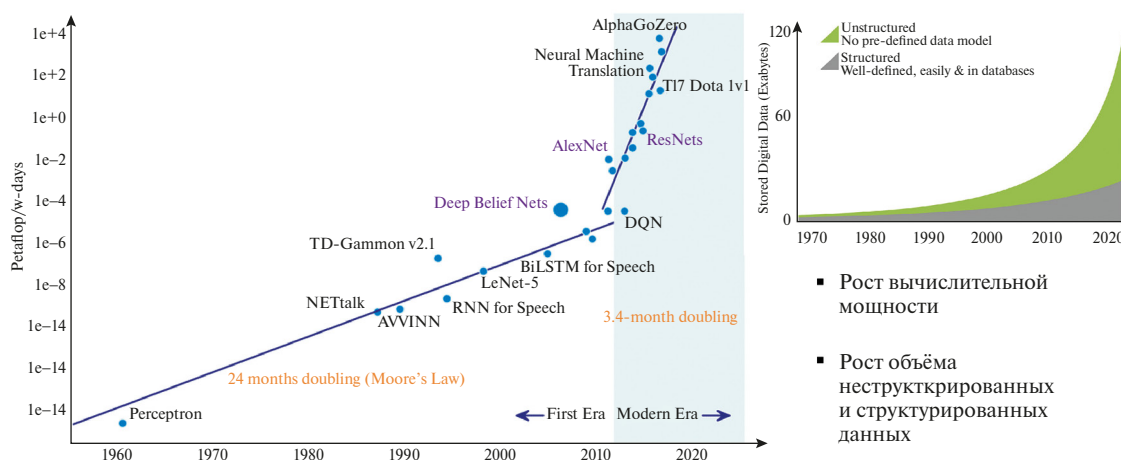


Рис. 2. Вычислительные ресурсы и большие данные — двигатели развития систем искусственного интеллекта

Наличие уязвимостей в системах искусственного интеллекта делает их работу небезопасной или неэтичной на бытовом уровне. Например, использование дискриминирующих алгоритмов привело к тому, что модель для выбора кандидатов на должности разработчиков в компании Amazon отдавала предпочтение мужчинам (модель была обучена на данных за десятилетний период, на протяжении которого основная часть резюме претендентов на эти вакансии поступала от мужчин) [9]. Ряд серьёзных проблем связан с практикой эксплуатации беспилотных автомобилей. В частности, они подвержены так называемым состязательным атакам: если нанести на дорожный знак невидимый для глаза рисунок, то компьютерное зрение может не распознать этот знак, что чревато аварией. Возможна и неадекватная реакция беспилотного автомобиля на дорожно-транспортное происшествие. В 2023 г. в США автомобиль Cruise наехал на пешехода, проталил его 6 м и остановился, не съезжая с пострадавшего, который в результате получил серьёзные травмы. После этого инцидента 950 беспилотных машин Cruise компании-изготовителю пришлось отозвать для обновления программного обеспечения [10]. Отсутствие обязательных цифровых меток на сгенерированном искусственным интеллектом контенте также может привести к печальным последствиям. Например, в 2023 г. в продажу поступили сгенерированные ИИ книги о грибах, но использовать их как практическое пособие не рекомендуется, так как в них обнаружены серьёзные содержательные ошибки [11].

В целом можно констатировать, что в настоящее время искусственный интеллект представляет собой сложный технологический комплекс с отсутствующей субъектностью. Исходя из этого представления в мире формируется юридическая основа его регулирования (как ранее формировались нормы регулирования других технологий). Так, в 2022 г. в США был опубликован проект “Билля о правах” ИИ [12], предлагаемого компаниями, общественными организациями и экспертными группами. В нём формулируются пять принципов создания и использования искусственного интеллекта, в числе которых разработка безопасных и эффективных систем; отсутствие алгоритмической дискриминации; обеспечение конфиденциальности данных и др. В 2023 г. в США на государственном уровне был одобрен ещё один важный документ — Executive Order on Safe, Secure, and Trustworthy AI (Указ о безопасном, защищённом и доверенном искусственном интеллекте) [13], который устанавливает новые стандарты в сфере безопасного развития ИИ и содержит поручения для ведомств и разработчиков. Например, разработчики ряда значимых систем обязаны делиться с правительством результатами тестов на безопасность продуктов; кроме того, сгенерированный ИИ контент должен маркироваться специальными цифровыми метками. Последнюю

инициативу разделяют и ведущие компании в области ИИ (OpenAI, Meta Platforms, Alphabet и др.), которые уже обязались реализовать систему цифровых водяных знаков для всех форм синтезированного контента. В том же году Агентство национальной безопасности США объявило о создании Центра безопасности искусственного интеллекта, а Национальный научный фонд — о создании семи исследовательских институтов ИИ (один из них — Institute for Trustworthy AI in Law & Society, Институт доверенного искусственного интеллекта в юридических и общественных науках).

В Евросоюзе в 2020 г. появился документ “Whitepaper on AI: a European approach to excellence and trust” (“Положение по ИИ: европейский подход к качеству и доверию”) [14], который объясняет важность ИИ и призывает к его оптимизации и развитию экосистемы, в частности, инициирует работу над нормативной базой и определяет ключевые требования к ней. В их числе — безопасные обучающие данные без дискриминации; надёжность и воспроизводимость; контроль человека над ИИ; защита биометрических данных. В 2023 г. был предварительно одобрен EU AI Act (Закон Евросоюза об искусственном интеллекте) [15], который предлагает разделить все системы с ИИ на три категории: с неприемлемыми рисками, высокими и низкими. Первые подлежат запрету, вторые должны быть приведены в соответствие с “определёнными юридическими требованиями”, третьи регулированию не подлежат. В число запрещённых систем попадёт сбор биометрии в общественных местах, а также социальный скрининг.¹

Если же говорить об общемировых подходах, то 19 мая 2023 г. на саммите глав государств “Большой семёрки” в Хиросиме был принят специальный документ для содействия развитию передовых систем искусственного интеллекта на глобальном уровне. 30 октября 2023 г. те же лидеры поддержали “Международный кодекс поведения” и “Руководящие принципы для организаций, разрабатывающих передовые системы ИИ”. Например, в кодексе заявлено, что таким организациям следует “присоединиться к процессам разработки, продвижения и принятия, где это необходимо, общих стандартов, инструментов, механизмов и лучших практик для обеспечения безопасности, надёжности и достоверности передовых систем ИИ”. А разработчикам следует “добиваться полной прозрачности — документировать используемые наборы данных, процессы и решения, принятые в ходе разработки системы” [16].

Регуляторика активно развивается и в нашей стране. Россия здесь — в числе лидеров. В 2019 г.

¹ Социальный скрининг — вид оценки платёжеспособности заёмщика банка по его социальным характеристикам и прогнозирования поведения клиента с помощью анализа его присутствия в социальных сетях.

Указом Президента РФ № 490 была принята Национальная стратегия развития искусственного интеллекта на период до 2030 года [17]. В 2021 г. десятки компаний подписали Кодекс этики в сфере искусственного интеллекта [18], разработанный при участии Минэкономразвития России, Аналитического центра при Правительстве РФ, а также около 500 экспертов академического и бизнес-сообщества. Кодекс подчёркивает приоритет прав человека, ответственность человека за действия ИИ, потребность в безопасности и защищённости данных, а также необходимость разработки безопасных технологий. Появляются первые ГОСТы, например, ГОСТ 59921 “Системы ИИ в клинической медицине” (принят в 2022 г.; устанавливает требования к клиническому тестированию ИИ-систем на основе глубоких нейронных сетей) [19].

Таким образом, в мире предпринимаются попытки ограничить внедрение небезопасных технологий и установить стандарты разработки безопасных, как это было ранее сделано для обычного программного обеспечения. Однако на практике общепринятых подходов и инструментов разработки безопасных технологий искусственного интеллекта пока не существует. Те наработки, которые появились за последние десятилетия в области обычного ПО, только частично применимы к ИИ. Это связано с датацентричностью искусственного интеллекта — основной источник его уязвимостей связан с данными (рис. 3).

Исходный код инфраструктур машинного обучения можно анализировать с помощью традиционных средств, но с данными и моделями машинного обучения всё гораздо сложнее. Например, данные могут быть отравленными, а предобученные модели — содержать закладки или вредоносное про-

граммное обеспечение. Полностью проверить модель на уязвимости традиционными способами, на уровне обычного ПО, невозможно, потому что основная информация содержится в параметрах модели, то есть в данных, а не в исполняемом коде. Нужны новые технологии.

Именно поэтому в 2021 г. при поддержке Минэкономразвития России в Институте системного программирования им. В.П. Иванникова РАН учреждён Исследовательский центр доверенного искусственного интеллекта, цель которого — создать платформу, которая объединяла бы программные инструменты и методики для противодействия принципиально новым угрозам, возникающим на всех этапах жизненного цикла технологий ИИ. Здесь уже получены результаты по ряду актуальных направлений. Это касается, например, противодействия отравлению данных. С помощью добавления на изображения незаметных триггеров можно добиться того, что компьютерное зрение будет распознавать эти изображения с недопустимыми искажениями (рис. 4) [20, 21]. Существуют разные подходы к решению этой проблемы. Предлагается, в частности, чистка зловредных нейронов (по отравленным тренировочным данным можно найти редко активируемые нейроны; скорее всего, именно они кодируют триггер) [22] или же обнаружение и удаление триггера с помощью объяснимого ИИ, а затем применение генеративной модели для восстановления изображения [23]. В Исследовательском центре доверенного ИИ ИСП РАН разрабатываются защитные алгоритмы от незаметного отравления изображений. Кроме того, ведутся исследования по противодействию “состязательным атакам”, в ходе их разработана защищённая система компьютерного зрения с дообученной моделью, которая позволя-



Рис. 3. Появление уязвимостей в системах с ИИ



Рис. 4. Отравленные данные: вставка закладок

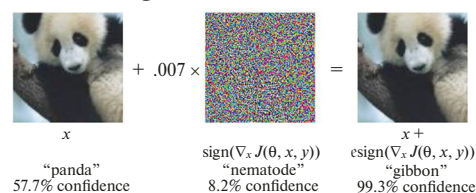
ет системе распознавать человека даже в футболке со зловредным стикером (рис. 5).

Здесь важно отметить, что атакам подвержены и закрытые системы (так называемые атаки “чёрного ящика”). Это связано с тем, что не исключена возможность перенесения состязательных примеров на другие модели и наборы данных, поэтому идею безусловной защищённости закрытых систем нельзя признать верной. Для обеспечения полноценной

безопасности необходимо располагать соответствующей научно-технологической базой и созданными на её основе программными инструментами и методиками противодействия атакам.

Важность этой задачи осознаётся повсеместно. С 2017 г. реализуется множество проектов по развитию доверенного ИИ. Например, такие проекты консорциума “The Linux Foundation”, как Adversarial Robustness Toolbox, AI Explainability 360 AI Fairness

Незаметная градиентная атака на классификаторы изображений: максимизация ошибки через изменение входа

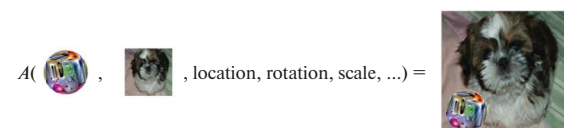


$$x' = \text{Proj}_{[0, 1]^d} (x + \text{esign}(\nabla_x J(\theta, x, y))) \text{ без целевого класса}$$

$$x' = \text{Proj}_{[0, 1]^d} (x - \text{esign}(\nabla_x J(\theta, x, y))) \text{ направленная (на класс } y')$$

$$x' = \text{Proj}_{B_c \cap [0, 1]^d} (x_k + \alpha \text{sign}(\nabla_x J(\theta, x_k, y))) \text{ итерационная (сильная)}$$

Состязательные патчи: выучить универсальный зловредный стикер



$$\hat{p} = \arg \min_p E_{x \sim X, t \sim T, l \sim L} [(\log \text{Pr}(\hat{y}|A(p, x, l, t)))]$$

Состязательные футболки (справа реализована защита)



Рис. 5. Противодействие состязательным атакам

360 и другие. Консорциум поддерживает также проекты других компаний и организаций, нацеленные на поиск уязвимостей моделей и повышение безопасности их использования (NextAttack, University of Virginia; Foolbox, University of Tuebingen; CleverHans, CleverHans Project), определение смещения модели (Aequitas, Chicago University; Fairlearn, Microsoft) и др. Однако несмотря на масштабные исследования, до сих пор не существует типового сценария разработки, обеспечивающего и возможность непрерывного выпуска оттестированных новых версий продукта (CI/CD – непрерывная интеграция и непрерывная поставка), и применение инструментов противодействия атакам. Такие сценарии уже много лет применяются при разработке обычных программ без ИИ.

Существуют и другие проблемы, связанные с датацентричностью. Например, не во всех областях возможен обмен данными согласно существующему законодательству (это особенно актуально для медицины). В таких случаях возможно применение метода так называемого федеративного (распределённого машинного) обучения, позволяющего обучать модели на нескольких устройствах без обмена образцами данных. Федеративное обучение делится на горизонтальное (например, необходимость анализа ЭКГ большой группы людей) и вертикальное, с учётом разных сфер социальной активности одного и того же человека (медицина, финансы и др.). Ещё одна задача – упрощение коммуникаций, поскольку они могут занимать до 95% времени обучения ИИ. Её можно решить несколькими способами, в том числе сжатием посылок, пропуском раундов общения, временным упрощением модели и разделением её на составляющие, что позволяет кратно уменьшить коммуникационные затраты и время обучения.

В федеративном обучении существуют две основные проблемы: жёсткие требования к стоимости коммуникаций (то есть к объёму передаваемых данных) и конфиденциальности информации. В их решении, а также для оптимальной квантизации сигналов широко используются результаты из многомерной геометрии, полученные в 1970-х годах академиком РАН Б.С. Кашиным. Продемонстрировали свою эффективность и так называемые жадные алгоритмы [24]. В Исследовательском центре доверенного ИИ ИСП РАН актуальные задачи федеративного обучения решает коллектив под руководством доктора физико-математических наук А.В. Гасникова [25–27]. Полученные результаты позволяют снизить коммуникационные затраты максимум в 15 раз, а процесс обучения сократить в 5 раз [28, 29].

Важна также задача, касающаяся совершенствования технологий маркирования контента цифровыми водяными знаками. Она актуальна как для контента, созданного человеком (в целях защиты авторских прав и отслеживания распространения интеллектуального продукта) [30], так и для синтезированного (обнаружение сгенерированного текста

[31], дипфейков в аудио- и видеопотоках и изображениях [32]), а также для глубоких нейронных сетей, защиты от анонимной кражи обучающих наборов данных и обученных моделей [33–35]). В США уже готовится законодательная база, обязывающая маркировать ИИ-контент водяными знаками. Вероятнее всего по этому пути пойдут и другие страны, в том числе Россия, поэтому столь актуально развитие соответствующих отечественных технологий.

Необходимо отметить, что разработка даже очень качественных технологий доверенного ИИ далеко не гарантирует обеспечение технологической независимости и долгосрочного устойчивого развития в этой области. Нужны модели совместной работы, которые в условиях коллаборативной экономики способствуют кратному увеличению производительности труда. Целесообразно сформировать экосистему, которая позволит отдельным компаниям перейти от конкуренции к кооперации, совместно создавать и контролировать репозиторий доверенного программного обеспечения. Такая модель работы, представленная на рисунке 6, уже используется ИСП РАН и партнёрами в Центре доверенного системного ПО. Вокруг него сформирован консорциум; более 50 компаний (Лаборатория Касперского, Postgres Professional и др.) и вузов (МГТУ им. Н.Э. Баумана, ЧГУ и др.) совместно ведут исследования по повышению безопасности ОС Linux и системных компонентов (например, OpenSSL, QEMU, libvirt). Около 300 исправлений уже признаны международным сообществом и внесены в основные ветки проектов.

Реализация данной модели работы показала, что Академия наук является ключевой структурой, которая может формировать такие сообщества, объединяя государство, бизнес и научные институты. Создание репозитория доверенных решений было поддержано на стратегической сессии “Развитие искусственного интеллекта” под председательством главы правительства РФ М.В. Мишустина в сентябре 2023 г.

В настоящее время существующую экосистему необходимо масштабировать в целях создания технологий доверенного ИИ. Для этого целесообразно:

- развернуть комплексную научно-техническую программу в целях поиска перспективных подходов к обеспечению кибербезопасности, создания интеллектуальных технологий и инструментальных средств, обеспечивающих минимизацию угроз безопасности, связанных с ошибками, включая новые виды уязвимостей и рисков, которые характерны для технологий ИИ;
- определить, что важным механизмом реализации указанной программы служит создание репозитория доверенных средств ИИ и инструментов обеспечения доверия;
- развивать нормативное регулирование ИИ в Российской Федерации, которое в зависимости

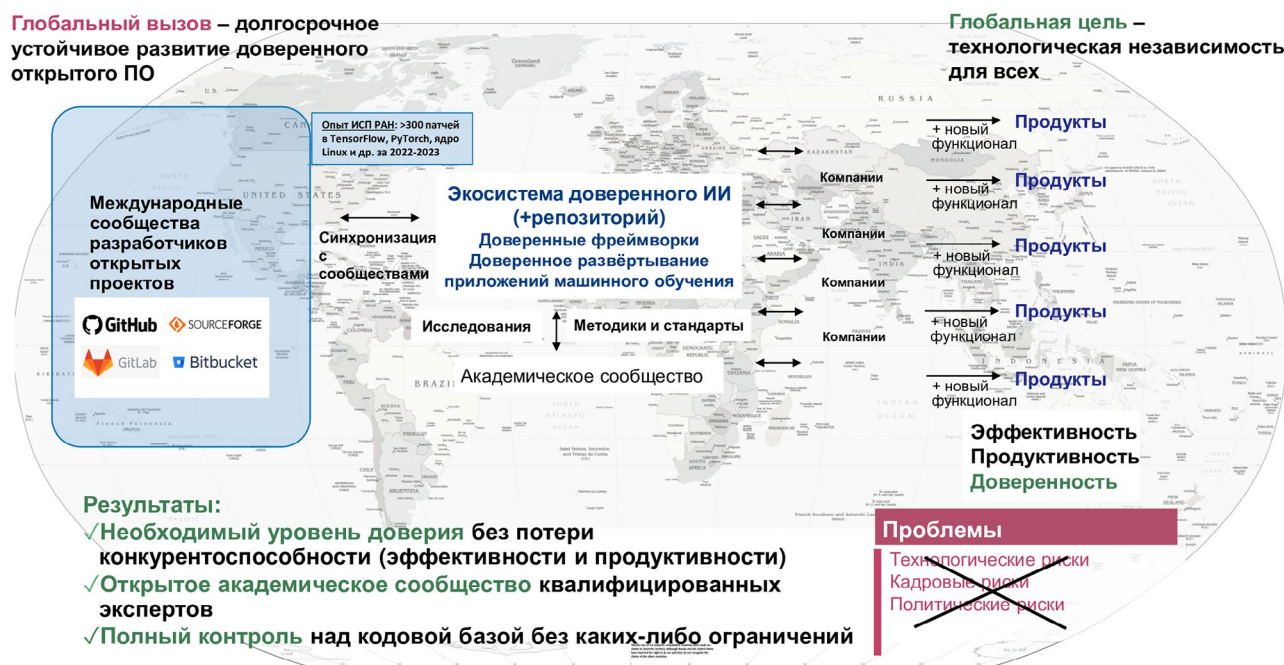


Рис. 6. Пример глобальной модели долгосрочного развития

от применения предусматривает как возможности саморегулирования, так и обязательную государственную сертификацию на основе высокотехнологичных программных средств;

- расширить подготовку специалистов высшей квалификации по специальности “Кибербезопасность”.

Подготовка высококвалифицированных профильных специалистов, создание нормативной базы и репозитория доверенного ПО, а также разработка новых подходов и инструментов обеспечения доверия к ИИ будут способствовать достижению технологической независимости нашей страны, обеспечению её безопасного будущего.

ЛИТЕРАТУРА

1. Volume of data/information created, captured, copied, and consumed worldwide from 2010 to 2020, with forecasts from 2021 to 2025. <https://www.statista.com/statistics/871513/worldwide-data-created/>
2. ГОСТ Р 56939-2016 “Защита информации. Разработка безопасного программного обеспечения. Общие требования”.
GOST R 56939-2016 “Information protection. Secure software development. General requirements”. <https://docs.cntd.ru/document/1200135525>
3. Regulation (EU) 2019/881 of the European Parliament and of the Council on ENISA (the European Union Agency for Cybersecurity) and on information and communications technology cybersecurity certification and repealing Regulation (EU) No 526/2013 (Cybersecurity Act). <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2019/881/oj>
4. Постановление президиума Российской академии наук “О мерах по развитию системного программирования как ключевого направления противодействия киберугрозам”.
5. Act of The Presidium of RAS. On supporting development of system programming as a key direction for countering cyberthreats. <https://www.ras.ru/presidium/documents/directions.aspx?ID=1f5522e9-f25-4af0-a49a-6a5675525597>
6. Приказ Минобрнауки России № 118 от 24 февраля 2021 года.
7. Order of the Ministry of Science and Education of Russia no. 118 dated February 24, 2021. <https://vak.minobrnauki.gov.ru/uploader/loader?type=1&name=91506173002&f=7892>
8. Zhang Y., Nauman U. Deep Learning Trends Driven by Temes: A Philosophical Perspective // IEEE Access. January 2020. V. 8. P. 96587–196599. <http://dx.doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3032143>
9. Колмогоров А.Н. О представлении непрерывных функций нескольких переменных в виде суперпозиций непрерывных функций одного переменного и сложения // Докл. АН СССР. 1957. Т. 114. № 5. С. 953–956. Kolmogorov A.N. On the representation of continuous functions of many variables by superposition of continuous functions of one variable and addition // Dokl. Akad. Nauk SSSR. 1957. V. 114. № 5. P. 953–956. (In Russ.)
10. Tychonoff A. Ein Fixpunktsatz // Mathematische Annalen. 1935. V. 111. P. 767–776. <https://link.springer.com/article/10.1007/BF01472256>

9. Insight – Amazon scraps secret AI recruiting toll that showed bias against women. <https://www.reuters.com/article/idUSKCN1MK0AG/>
10. Cruise robotaxi service hid severity of accident, California officials claim. <https://www.theguardian.com/business/2023/dec/04/california-cruise-robotaxi-san-francisco-accident-severity>
11. Mushroom pickers urged to avoid foraging books on Amazon that appear to be written by AI. <https://www.theguardian.com/technology/2023/sep/01/mushroom-pickers-urged-to-avoid-foraging-books-on-amazon-that-appear-to-be-written-by-ai>
12. Blueprint for an AI Bill of Rights. <https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2022/10/Blueprint-for-an-AI-Bill-of-Rights.pdf>
13. Executive Order on the Safe, Secure, and Trustworthy Development and Use of Artificial Intelligence. <https://www.whitehouse.gov/briefing-room/presidential-actions/2023/10/30/executive-order-on-the-safe-secure-and-trustworthy-development-and-use-of-artificial-intelligence/>
14. White Paper on Artificial Intelligence: a European approach to excellence and trust. https://commission.europa.eu/publications/white-paper-artificial-intelligence-european-approach-excellence-and-trust_en
15. EU AI Act. [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2021/698792/EPRS_BRI\(2021\)698792_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2021/698792/EPRS_BRI(2021)698792_EN.pdf)
16. Hiroshima Process International Code of Conduct for Advanced AI Systems. <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/library/hiroshima-process-international-code-conduct-advanced-ai-systems>
17. Указ Президента Российской Федерации “О развитии искусственного интеллекта в Российской Федерации”. Национальная стратегия развития искусственного интеллекта на период до 2030 года. Decree of the President of Russia “On developing artificial intelligence in Russia”, National strategy of developing artificial intelligence for the period until 2030. <http://static.kremlin.ru/media/events/files/ru/AN4x6HgKWANwVtMOFpDhcbRpvd1HCCsv.pdf>
18. Кодекс этики в сфере искусственного интеллекта. Ethics Codex on Artificial Intelligence. https://ethics.a-ai.ru/assets/ethics_files/2023/05/12/Кодекс_этики_20_10_1.pdf
19. ГОСТ Р 59921.2-2021 “Системы искусственного интеллекта в клинической медицине. Часть 2. Программа и методика технических испытаний”. GOST R 59921.2-2021 “Artificial Intelligence Systems in Clinical Medicine. Part 2. Program and methodology of technical validation”. <https://docs.cntd.ru/document/1200181991>
20. Gu T., Dolan-Gavitt B., Garg S. BadNets: Identifying Vulnerabilities in the Machine Learning Model Supply Chain. <https://arxiv.org/abs/1708.06733>
21. Shafahi A., Huang W., Najibi M. et al. Poison Frogs! Targeted Clean-Label Poisoning Attacks on Neural Networks. <https://arxiv.org/abs/1804.00792v2>
22. Liu K., Dolan-Gavitt B., Garg S. Fine-Pruning: Defending Against Backdooring Attacks on Deep Neural Networks. <https://arxiv.org/abs/1805.12185>
23. Bao Gia Doan, Abbasnejad E., Ranasinghe D.C. Februus: Input Purification Defense Against Trojan Attacks on Deep Neural Network Systems. <https://arxiv.org/abs/1908.03369>
24. Temlyakov V. Greedy Approximation. Cambridge University Press, 2011.
25. Beznosikov A., Horváth S., Richtárik P., Safaryan M. On biased compression for distributed learning // Journal of Machine Learning Research. 2023. V. 24(276). P. 1–50.
26. Gorbunov E., Rogozin A., Beznosikov A. et al. Recent theoretical advances in decentralized distributed convex optimization // High-Dimensional Optimization and Probability: With a View Towards Data Science. Cham: Springer International Publishing, 2022. P. 253–325.
27. Metev D., Rogozin A., Kovalev D., Gasnikov A. Is consensus acceleration possible in decentralized optimization over slowly time-varying networks? // International Conference on Machine Learning, 2023. PMLR. P. 24532–24554.
28. Beznosikov A. et al. Distributed methods with compressed communication for solving variational inequalities, with theoretical guarantees // Advances in Neural Information Processing Systems. 2022. V. 35. P. 14013–14029.
29. Beznosikov A., Gasnikov A. Similarity, Compression and Local Steps: Three Pillars of Efficient Communications for Distributed Variational Inequalities. <https://arxiv.org/abs/2302.07615v1>
30. Yakushev A., Markin Yu., Obydenkov D. et al. Docmarking: Real-Time Screen-Cam Robust Document Image Watermarking // 2022 Ivannikov Ispras Open Conference (ISPRAS), IEEE. P. 142–150.
31. Sankar Sadasivan V., Kumar A., Balasubramanian S. et al. Can AI-Generated Text be Reliably Detected? <https://arxiv.org/pdf/2303.11156.pdf>
32. Yu N., Skripniuk V., Abdelnabi S., Fritz M. Artificial Fingerprinting for Generative Models: Rooting Deepfake Attribution in Training Data. https://openaccess.thecvf.com/content/ICCV2021/papers/Yu_Artificial_Fingerprinting_for_Generative_Models_Rooting_Deepfake_Attribution_in_Training_ICCV_2021_paper.pdf
33. Adi Y., Baum C., Cisse M. et al. Turning Your Weakness Into a Strength: Watermarking Deep Neural Networks by Backdooring. Proceedings of the 27th USENIX Security Symposium. August 15–17, 2018. Baltimore, MD, USA. P. 1615–1631.

34. *Lia Y., Wangb H., Barni M.* A survey of deep neural network watermarking techniques. <https://arxiv.org/pdf/2103.09274.pdf>
35. *Li Y., Zhang Z., Bai J. et al.* Open-sourced Dataset Protection via Backdoor Watermarking. <https://arxiv.org/abs/2010.05821>

TRUSTED ARTIFICIAL INTELLIGENCE

A.I. Avetisyan^{a,*}

^a*Ivannikov Institute for System Programming of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

^{*}*E-mail: arut@ispras.ru*

In this paper we discuss the problem of creating trusted artificial intelligence (AI) technologies. Modern AI is based on machine learning and neural networks and is vulnerable to biases and errors. Efforts are made to establish standards for the development of trusted AI technologies, but they have not yet succeeded. AI technologies trust can only be achieved with the appropriate scientific and technological base and corresponding tools and techniques for countering attacks. We present the ISP RAS Trusted AI Research Center results and propose a work model that can ensure technological independence and long-term sustainable development in this area.

The paper expands the lecture given at the scientific session of the General Assembly of the RAS on December 12, 2023.

Keywords: trusted artificial intelligence, cybersecurity, vulnerabilities, regulation, trusted software repository, weak artificial intelligence, neural networks, federative learning, machine learning.

РОССИЙСКАЯ НАВИГАЦИОННАЯ СПУТНИКОВАЯ СИСТЕМА И ЕЁ ПЕРСПЕКТИВЫ

© 2024 г. Н.А. Тестоедов^{а,*}

^аИнститут космических технологий Красноярского научного центра СО РАН, Красноярск, Россия

*E-mail: priem@ist.krasn.ru

Поступила в редакцию 09.02.2024 г.

После доработки 12.02.2024 г.

Принята к публикации 15.03.2024 г.

Глобальные навигационные спутниковые системы, включая российскую ГЛОНАСС, стали неотъемлемой частью жизни общества. В статье рассматриваются основные принципы навигации, состав космического комплекса, погрешности определения положения потребителя и методы повышения важнейших характеристик системы, в первую очередь точности. Особое внимание уделено состоянию и развитию орбитальной группировки системы ГЛОНАСС как ключевого её звена и повышению помехоустойчивости, критичной для любой спутниковой системы двойного назначения, приведены принципы создания интегрированных инерциальных навигационных систем. Сформулированы предложения по парированию угроз, касающихся координатно-временного и навигационного обеспечения, путём создания консорциума стран БРИКС.

Статья подготовлена на основе доклада, представленного на научной сессии Общего собрания членов РАН 12 декабря 2023 г.

Ключевые слова: космические аппараты, координатно-временное и навигационное обеспечение, глобальная навигационная спутниковая система, псевдодалность, дифференциальные системы.

DOI: 10.31857/S0869587324030043, EDN: GGZWDS

Глобальная навигационная спутниковая система (ГЛОНАСС) создавалась и развивается усилиями большого коллектива учёных Российской академии наук и специалистов предприятий промышленности, научно-исследовательских институтов госкорпорации “Роскосмос”, Министерства обороны РФ. В ней реализованы самые передовые технологии мирового уровня. С учётом масштабов и эффективности результатов функционирования, позитивного влияния на разные сферы её без преувеличения можно отнести к национальному достоянию Российской Федерации.



ТЕСТОЕДОВ Николай Алексеевич — академик РАН, заместитель председателя СО РАН, директор ИКТ КНЦ СО РАН.

Основное назначение системы, полностью развёрнутой в 1995 г., — решение задач обеспечения обороны и безопасности страны. С 1999 г. указом Президента Российской Федерации ГЛОНАСС получила статус двойного назначения. С 2007 г. гражданские услуги системы предоставляются потребителям всего мира на безвозмездной основе [1].

Гражданские услуги ГЛОНАСС, совместно с другими глобальными навигационными спутниковыми системами, массово внедрены в навигационные устройства всех российских и практически всех зарубежных производителей навигационного оборудования и используются на транспорте, в системах передачи данных, в электросетях, при разведке и разработке месторождений полезных ископаемых. Особое значение приобретает применение ГЛОНАСС в совершенствовании навигации по Северному морскому пути, разработке месторождений на шельфе в открытом морском пространстве. Спутниковые навигационные технологии значительно повышают эффективность фундаментальных научных исследований в геодинاميке, гравиметрии, сейсмике, изучении поведения ионосферы и тропосферы Земли (ГЛОНАСС начала применяться для

решения этих научных задач с начала 1990-х годов, ещё до своего полного развёртывания).

В свою очередь, создание и развитие космической навигационной системы невозможно без участия академических организаций. Без точного определения параметров вращения и ориентации Земли, уточнения моделей её гравитационного поля, учёта поправок, базирующихся на общей и частной теории относительности, невозможно обеспечить корректный расчёт орбиты спутников.

Существующая орбитальная группировка космического комплекса ГЛОНАСС состоит из 24 спутников на средней круговой орбите высотой 19 100 км и включает в себя три модификации навигационных спутников “Глонасс” (запуски первых из них были осуществлены в 2003, 2011 и 2023 гг.) Эти многофункциональные космические аппараты обеспечивают, помимо излучения навигационного сигнала, реализацию ряда других задач (рис. 1).

Принцип космической навигации — решение триангуляционной¹ задачи относительно известного положения навигационных космических аппаратов в количестве не менее четырёх [2]. Навигационная аппаратура потребителей рассчитывает расстояния до спутников путём умножения скорости света на разницу времени излучения навигационного сигнала со спутника и времени его приёма.

При кажущейся простоте решаемой задачи следует учесть, что спутники “Глонасс” летят на высоте 19 100 км со скоростью почти 4 км/сек и точность знаний о положении спутника должна быть одного уровня с требованиями к точности навигации потребителя. Поэтому ГЛОНАСС — это сложная система технических и программных средств, включающая в себя подсистемы научного фундаментального обеспечения, космический комплекс, потребительские сегменты как гражданские, так и спецпотребителей, функциональные дополнения, повышающие потребительские характеристики (рис. 2). Географически система разнесена по всему миру, включая четыре измерительные станции в Антарктиде.

Космическая радионавигация имеет достаточно много параметров, но если рассматривать их с позиций потребителя, то ключевые из них — точность местоопределения, доступность в любой точке Земли, целостность, заключающаяся в подтверждении достоверности сигналов, и помехозащищённость [3].

Почему радионавигация вне зависимости от системы (российская ГЛОНАСС, североамериканская GPS, европейская Galileo, китайская BeiDou) не абсолютно точна? В соответствии с законами Кеплера [3] траектория движения небесных тел в центральном поле тяготения в отсутствие внешних воздействий рассчитывается точно. Но в реальных услови-

ях на космический аппарат, вращающийся вокруг Земли, действуют разнообразные внешние силы, вносящие погрешности в определение псевдодальности². Такая погрешность определяется как сумма частных погрешностей, которые объясняются влиянием ионосферы, тропосферы, многолучёвости распространения сигнала, релятивистских и гравитационных эффектов. В этом же перечне и погрешности, вносимые бортовой аппаратурой спутника и наземной аппаратурой потребителя (рис. 3) [2].

Отдельно выделена погрешность, объясняемая разницей шкал времени спутника и аппаратуры потребителя, так как шкала времени спутника корректируется при каждой закладке обновляемого навигационного сообщения (для спутников “Глонасс” — один раз за виток, то есть каждые 12 часов). Описанные виды погрешностей вносят разные значения в суммарную погрешность, указанную на рисунке 3. Здесь же видно, что в результате мероприятий по повышению характеристик спутников, средств наземного комплекса управления, методик и программного обеспечения расчётов эфемерно-временной информации погрешность местоопределения потребителя за 10 лет снижена в 2 раза.

Точность навигационных систем неразрывно связана с характеристикой доступности, то есть возможностью непрерывного наблюдения такого количества спутников, которое достаточно для решения навигационной задачи. При наличии полного состава орбитальной группировки ГЛОНАСС количество спутников в зоне видимости потребителя составляет в среднем 6–10 аппаратов в зависимости от расположения потребителя на поверхности земного шара. При этом доступность достигает 99.99% (по сути это время, когда потребитель с вероятностью 95% без дополнительных корректирующих систем определяет своё положение).

Точность системы ГЛОНАСС в первую очередь определяется точностью космического комплекса, то есть точностью навигационного сигнала, излучаемого космическим аппаратом. Восстановление в период с 2003 по 2011 г. полной орбитальной группировки (24 спутника) повысило точность космического комплекса более чем в 10 раз, уменьшив погрешность определения псевдодальности с 15 м до 1.4 м. Дальнейшее уменьшение погрешности (в настоящее время она составляет 1.2 м) достигается значительно медленнее, его удаётся добиться благодаря улучшению характеристик бортовой аппаратуры и созданию новых технологий управления.

Основной вклад в повышение степени точности создаваемого радионавигационного поля может внести обеспечение более высокой стабильности бортового синхронизирующего устройства, проще

¹ Триангуляция — геодезическое построение на местности системы пунктов, образующих треугольники, у которых измеряются все углы и длины некоторых базовых сторон.

² Псевдодальность — это расстояние между спутником и навигационной аппаратурой потребителя, включающее в себя помимо собственно дальности погрешность из-за разности времени в часах спутника и аппаратуры потребителя.

говоря, бортовых часов спутника. Переход от атомных стандартов частоты на основе цезия к водородным снижает нестабильность на суточном интервале в 20 раз — с 1×10^{-13} до 5×10^{-15} . Соответственно, в этой же степени уменьшается погрешность навигации от расхождения шкал бортовых часов спутника и на-

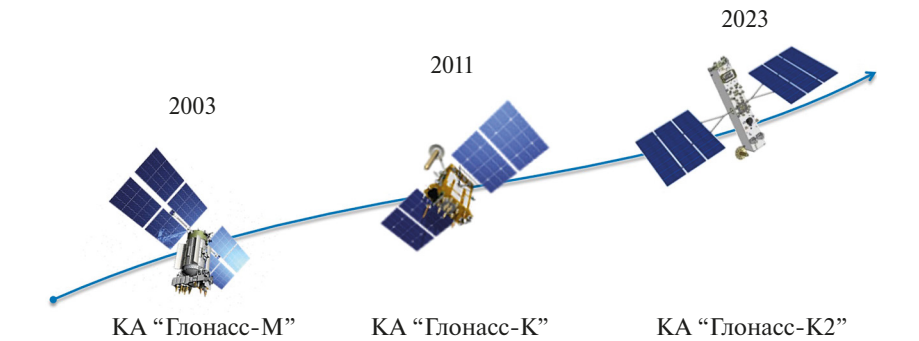


Рис. 1. Действующая орбитальная группировка космического комплекса ГЛОНАСС

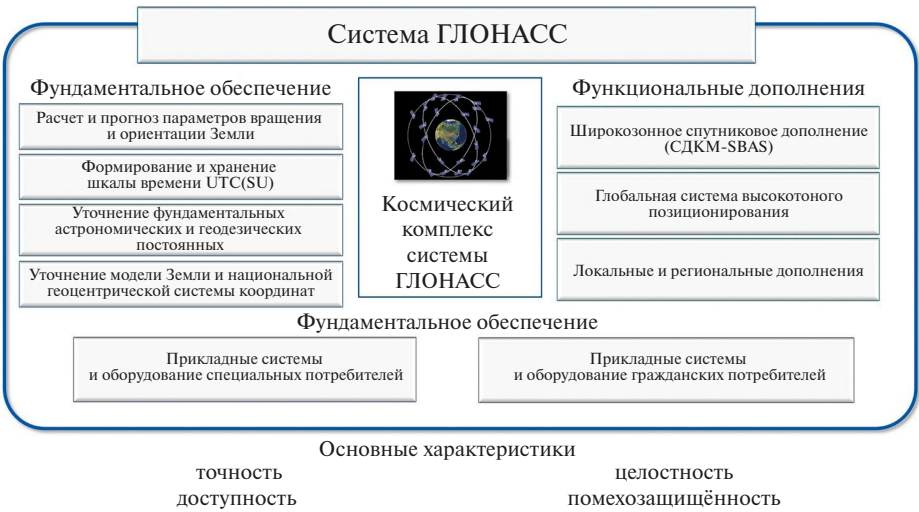


Рис. 2. Построение системы ГЛОНАСС

$$\delta\check{D} = \delta t_{\text{ион}}c + \delta t_{\text{троп}}c + \delta t_{\text{млр}}c + \delta t_{\text{ргэ}}c + \delta t_{\text{пр}}c + \delta t_{\text{ап}}c + \varepsilon_{\check{d}} + \delta t_{\text{бшв}}c$$

- $\delta t_{\text{ион}}c$ — ионосферная погрешность;
- $\delta t_{\text{троп}}c$ — тропосферная погрешность;
- $\delta t_{\text{млр}}c$ — погрешность многолучевого распространения;
- $\delta t_{\text{ргэ}}c$ — погрешность от релятивистских и гравитационных эффектов;
- $\delta t_{\text{пр}}c$ — погрешность, вносимая навигационным приёмником;
- $\delta t_{\text{ап}}c$ — погрешность, создаваемая бортовой аппаратурой;
- $\varepsilon_{\check{d}}$ — прочие погрешности;
- $\delta t_{\text{бшв}}c$ — погрешность бортовой шкалы времени.

Источник погрешности	Изменение бюджета погрешности определения псевдодалности $\sigma_{\text{д.м.}}$	
	2009 г.	2019 г.
Часы спутника	2.0	0.7
Ионосфера	4.0	2.0
Тропосфера	0.5	0.2
Многолучёвость	2.5	0.5
Приёмник	1.5	0.5
Прочие	2.0	1.0
Суммарная погрешность	5.7	2.8

Рис. 3. Погрешность определения псевдодалности

земного эталона в общем бюджете погрешностей. Наземный эталон имеет суточную нестабильность 1×10^{-16} , однако результаты работ под руководством научного руководителя Института лазерной физики СО РАН академика РАН С.Н. Багаева показывают, что нестабильность эталона можно снизить до 1×10^{-18} .

Размещение измерительных станций радиоуправления орбит спутников России на территории Никарагуа, Бразилии, ЮАР и в Антарктиде повышает точность расчёта эфемерид, передаваемых далее с наземных станций на спутники. Повышение частоты обновления информации на спутнике уменьшает продолжительность расхождения бортовой шкалы времени спутника и наземного эталона. В условиях отсутствия наземных станций закладки информации на спутники вне территории России эффективной альтернативой становится передача эфемеридно-временной информации через разрабатываемые в настоящее время межспутниковые линии связи. При этом периоды между обновлением эфемеридно-временной информации на спутнике можно уменьшить с 12 часов в настоящее время до 1 часа, пропорционально уменьшится погрешность от расхождения шкал времени спутника и наземного эталона.

Использование системы ГЛОНАСС в стандартном режиме удовлетворяет требования широкого круга потребителей. В то же время для ряда приложений (например, заход на посадку воздушных судов по категориям Международной организации гражданской авиации (ИКАО), маневрирование морских судов в «узкостях», решение топогеодезических и других задач) необходима более высокая точность навигационно-временного обеспечения. Она достижима при использовании специальных режимов работы ГЛОНАСС, одним из которых служит так называемый дифференциальный режим (рис. 4). Принцип его организации состоит в использовании двух приёмников сигнала, один из которых (опорная

измерительная станция), как правило, неподвижен и расположен в точке с известными координатами, а другой (навигационная аппаратура потребителя) может находиться в движении.

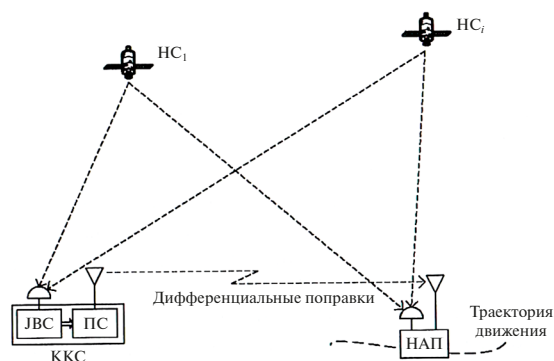
Если приёмники располагаются близко друг к другу, то измеренные от одних и тех же навигационных спутников псевдодальности будут содержать одни и те же значения медленно меняющихся погрешностей измерений (ионосферной, тропосферной, релятивистской и других). Поскольку координаты опорной измерительной станции известны точно, то, сравнивая их с координатами, вычисленными измерительной станцией при приёме навигационного сигнала со спутника, можно определить величины систематических ошибок, называемых дифференциальными поправками. Передавая эти поправки по любой линии связи, реально проводить коррекцию координат потребителя.

На практике использование сигналов с одних и тех же навигационных спутников крайне затруднительно (при работе в совмещённых орбитальных группировках в зоне видимости потребителя до 30 космических аппаратов), поэтому корректирующие поправки рассчитываются по всей совокупности видимых спутников, а аппаратура потребителя выбирает любое созвездие из четырёх космических аппаратов для навигации.

При одной контрольно-корректирующей станции дифференциальных поправок дифференциальная подсистема называется локальной (дальность зоны обслуживания до 300 км). С увеличением количества контрольно-корректирующих станций зона обслуживания увеличивается, в пределе становясь широкозонной с дальностью обслуживания до 5000 км [3, 4]. В этом случае дифференциальные поправки обычно передаются спутниками связи.

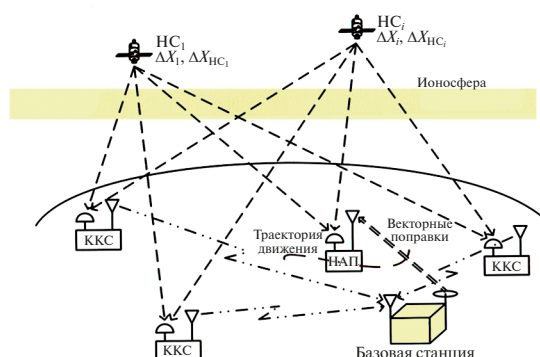
Существующая российская дифференциальная подсистема повышает точность навигации по сравнению с навигационной базовой услугой примерно в 2 раза. В перспективе планируется создать

Локальная дифференциальная подсистема



Дальность зоны обслуживания до 300 км

Широкозонная дифференциальная подсистема



Дальность зоны обслуживания до 5000 км

Рис. 4. Принцип организации дифференциального режима

отечественную дифференциальную коррекцию и мониторинг с параметрами, удовлетворяющими требованиям ИКАО для навигации самолётов гражданской авиации при посадке на необорудованные аэродромы: информация с задержкой не более 6 с; точность на уровне 0.5 м с гарантией целостности навигационного поля. С учётом территории Российской Федерации в состав такой системы должны входить около 50 станций измерений и мониторинга.

Следующий этап в повышении точности навигации — создание системы высокоточного позиционирования, по аналогии с создаваемыми в мире. Принцип её работы: за счёт увеличения разрядности навигационного сигнала и специальных алгоритмов обработки система производит расчёт и передачу потребителю в реальном времени корректирующей информации, использование которой одновременно с приёмом базовых сигналов ГЛОНАСС обеспечивает высокоточные навигационные определения [3]. Проведённые испытания показали, что высокоточная навигация, базирующаяся на системах GPS (США) и ГЛОНАСС, имеет практически одну и ту же точность.

Состояние космических аппаратов в действующей орбитальной группировке характеризуется фактическим сроком их активного существования относительно гарантийных сроков, составляющих 7 и 10 лет в зависимости от модификации спутников. Спутники работают надёжно, некоторые превысили гарантийный срок более чем в 2 раза. Тем не менее прогноз остаточного срока их активной работы убеждает в необходимости плановой замены 6 космических аппаратов в течение 1–2 лет.

Соответствующая программа замены спутников до 2033 г. госкорпорацией “Роскосмос” подготовлена и реализуется.

Общая проблема производства любой сложной техники, в том числе спутников “Глонасс”, — ограничения поставок электронно-компонентной базы из-за рубежа. До 2014 г., когда были введены первые санкционные ограничения, доля импортной электронно-компонентной базы в производстве навигационных спутников доходила до 42% (три модификации аппаратов с таким оснащением входят в состав действующей орбитальной группировки). Меры импортозамещения, предпринятые госкорпорацией “Роскосмос” за последние 10 лет, обеспечат к 2030 г. переход в два этапа на стопроцентную электронно-компонентную базу отечественного производства.

Развитие орбитальной группировки системы ГЛОНАСС предполагает разработку и реализацию нескольких научно-технических направлений (рис. 5).

1. Запуск с 2025 г. модернизированных спутников “Глонасс-К2” в импортозамещающем варианте с набором всех разработанных ранее дополнительных к навигации задач.
2. Многофункциональные аппараты будут производиться и далее, модифицируясь, например, по составу навигационных сигналов и обеспечению региональных зон с повышенной (до 20 дБ) мощностью навигационного сигнала.
3. Для оперативного поддержания навигационного поля разрабатываются моновигационные космические аппараты — малые (около 0.5 т) спутни-

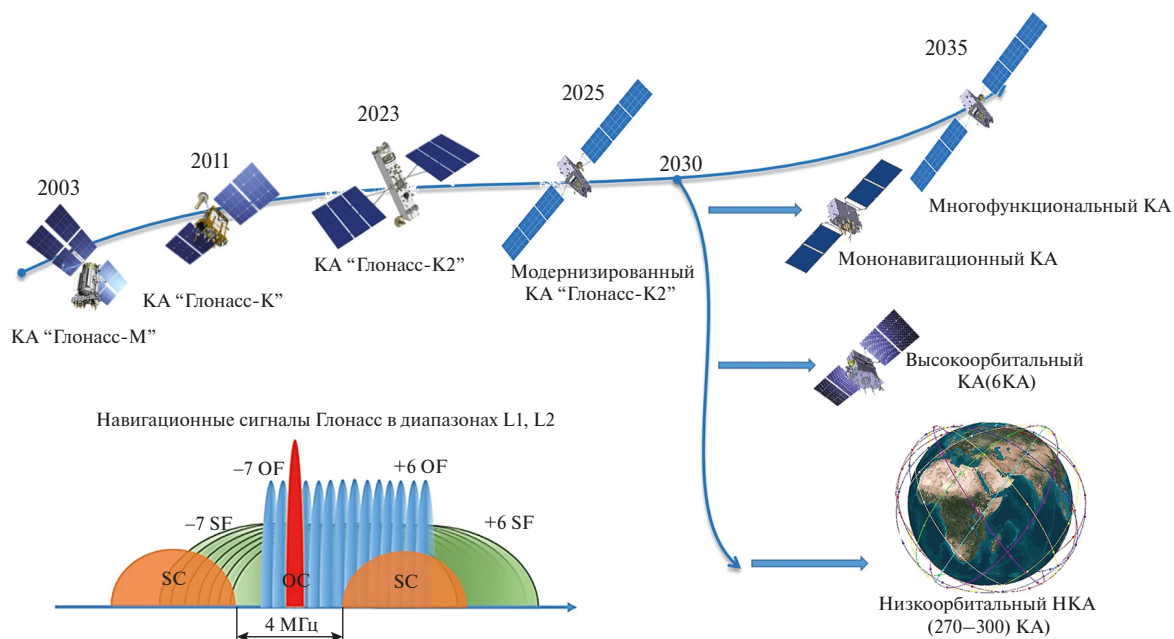


Рис. 5. Развитие орбитальной группировки космического комплекса системы ГЛОНАСС

ки с возможностью группового запуска, обеспечивающие излучение только навигационного сигнала.

4. Система высокоорбитальных космических аппаратов (6 спутников на трёх геосинхронных орбитах) повысит доступность навигационного сигнала в условиях городов и сложных рельефов на территории России, обеспечит излучение корректирующей информации для высокоточной навигации [5].

5. Прорабатывается вопрос создания многоспутниковой (до 300 аппаратов) низкоорбитальной (от 500 до 1500 км) навигационно-связной системы, которая в дополнение к существующей орбитальной группировке обеспечит ряд дополнительных свойств для улучшения навигации, в том числе увеличение мощности сигнала от 200 до более чем в 1000 раз, в зависимости от высоты орбиты системы; возможность передачи навигационного сигнала в связных диапазонах; более быстрое обновление информации на спутниках, так как период обращения низкоорбитальных аппаратов в несколько раз меньше.

Продолжается разработка новых навигационных сигналов для всех создаваемых аппаратов — как гражданских, так и специального назначения.

Самим своим появлением космические радионавигационные системы совершили революцию в методах навигации. Кардинальные изменения стали возможны благодаря уникальному сочетанию характеристик этих систем: метровой (в дальнейшем дециметровой) точности определения координат, глобальной доступности информации в любой точке земной поверхности в любое время и в любых метеоусловиях, компактности и низкой стоимости аппаратуры потребителей. Однако все современные спутниковые системы навигации обладают ограниченной помехоустойчивостью, в то время как для критически важных применений необходимы помехозащищённые навигационные средства, дополняющие или замещающие космические радионавигационные [6].

В перечень дополняющих средств входят: кодирование сигналов в защищённых каналах спутниковой навигации (например, гражданский код C/A системы GPS обеспечивает уверенный приём информации при превышении уровня помехи над навигационным сигналом в 250 раз, а использование кода P(Y) — до 2500 раз); создание наземных радиосистем для локальной навигации; создание низкоорбитальной системы спутниковой навигации, обеспечивающей повышение мощности навигационного сигнала на три порядка.

Замещающие средства, представленные на рисунке 6, объединяют инерциальные навигационные системы (на базе гироскопов и акселерометров) — для замещения длительностью до одного часа спутниковой навигации вследствие дрейфа характеристик гироскопов; корреляционно-экстремальные системы для измерений параметров гравитационного или магнитного полей Земли (это системы глобального действия, но их точность измеряется сотнями метров при весе аппаратуры, на два порядка превышающем вес радионавигационных систем). С учётом этих особенностей в настоящее время для критически важных применений используются интегрированные инерциально-спутниковые системы, в которых совмещены приёмник спутникового навигационного сигнала и инерциальная навигационная система. При наличии спутникового сигнала его приёмником производится оценивание погрешности инерциальной навигационной системой и их компенсация в выходных данных. При пропадании спутникового сигнала происходит экстраполяция погрешностей инерциальной навигационной системы, что обеспечивает приемлемую точность продолжительностью до часа. Современные автономные инерциальные и интегрированные инерциально-спутниковые системы разработаны и внедрены в практику под руководством научного руководителя концерна «ЦНИИ «Электроприбор»» академика РАН В.Г. Пешехонова.



Рис. 6. Системы автономной навигации

Здесь следует напомнить, что космическая деятельность отдельных стран регулируется международным законодательством и соответствующими структурами. В состав основных международных организаций, связанных с координатно-временным и навигационным обеспечением, входят: Международное бюро мер и весов, Международные службы глобальных навигационных систем, Международная ассоциация геодезии, Международная служба лазерной дальнометрии, Международная служба радиointерферометрии для геодезии и астрономии, Международная служба вращения Земли. Необходимо учитывать, что все эти службы проводят (или могут начать проводить) дискриминационную политику в отношении Российской Федерации с соответствующими рисками для отечественных организаций, осуществляющих деятельность в области координатно-временного и навигационного обеспечения (КВНО).

По всем перечисленным направлениям КВНО страны БРИКС способны создать системы, производящие аналогичную номенклатуру продуктов, характеристики которых могут быть сопоставимы с данными международных служб (с учётом возможности решения текущих и перспективных задач). Таким образом, в целях гарантированного координатно-временного и навигационного обеспечения можно рекомендовать выдвинуть инициативу создания консорциума стран БРИКС для выполнения функций соответствующих международных организаций в рамках правового поля стран БРИКС и на международной арене.

В завершение следует отметить, что система ГЛОНАСС в качестве основы отечественного координатно-временного и навигационного обеспечения предполагается к использованию и в ближайшие десятилетия. Её поддержание и развитие — одна из важнейших научно-технических задач Российской академии наук и промышленности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Указ Президента Российской Федерации от 17 мая 2007 года № 638 (ред. от 12.04.2019) “Об использовании глобальной навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС в интересах социально-экономического развития Российской Федерации”. <https://rulaws.ru/president/Ukaz-Prezidenta-RF-ot-17.05.2007-N-638/> (дата обращения 06.02.2024).
2. Decree of the President of the Russian Federation No. 638 of May 17, 2007 (as amended on April 12, 2019) “On Using the Global Navigation Satellite System (GLONASS) to Promote Social and Economic Development in the Russian Federation”. <https://rulaws.ru/president/Ukaz-Prezidenta-RF-ot-17.05.2007-N-638/> (access date February 6, 2024).
3. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования. Изд. 4-е / Под ред. А.И. Перова, В.Н. Харисова. М.: Радиотехника, 2010. GLONASS. Principles of Construction and Operation. Perov A.I. and Kharisov V.N., Eds. Ed. 4th M.: Radiotekhnika, 2010. (in Russ.)
4. ГЛОНАСС. Модернизация и перспективы развития. Монография / Под ред. А.И. Перова. М.: Радиотехника, 2020. GLONASS. Modernization and Prospects of Development, Perov, A. I., Ed., M.: Radiotekhnika, 2020. (in Russ.)
5. Карутин С.Н., Власов Н.Б., Дворкин В.В. Дифференциальная коррекция и мониторинг глобальных навигационных спутниковых систем. М.: Изд-во МГУ, 2014. Karutin S.N., Vlasov N.B., Dvorkin V.V. Differential Correction and Monitoring of Global Navigation Satellite Systems. M.: Izd. MGU, 2014 (in Russ.)
6. Владимиров В.М., Ланухин Е.Г., Борисов В.А. Влияние дополнительных группировок спутников на доступность навигационной системы ГЛОНАСС // Вестник воздушно-космической обороны. 2023. № 1(37). С. 32–46. Vladimirov V.M., Lapukhin E.G., Borisov V.A. Effect of additional satellite constellations on the availability of the GLONASS navigation system // Vestnik VKO (Aerospace Defense Herald). 2023. V. 1. № 37. P. 32–46. (in Russ.)
7. Пешехонов В.Г. Высокоточная навигация без использования информации глобальных навигационных спутниковых систем // Гироскопия и навигация. 2022. Т. 30. № 1(116). С. 3–11. Peshekhonov V.G. High-precision navigation independently of global navigation satellite systems data // Gyroscopy and Navigation. 2022. V. 13. P. 1–6.

RUSSIAN NAVIGATION SATELLITE SYSTEM: RESULTS AND PROSPECTS

N.A. Testodov^{a,*}

^a*Institute of Space Technologies of the Krasnoyarsk Scientific Center SB RAS, Krasnoyarsk, Russia*

^{*}*E-mail: priem@ist.krasn.ru*

Global navigation satellite systems, including the Russian GLONASS, have become an integral part of society's life. The article discusses the basic principles of navigation, the composition of the space complex, the errors in determining the position of the consumer and methods for improving the most important characteristics of the system, primarily accuracy. Special attention is paid to the state and development of the orbital grouping of the GLONASS system as its key link and to improving noise immunity, critical for any dual-use satellite system, the principles of creating integrated inertial navigation systems are given. Proposals are made to counter threats related to coordinate-time and navigation support by creating a consortium of BRICS countries.

The article was prepared on the basis of a report presented at the scientific session of the General Meeting of Members of the Russian Academy of Sciences on December 12, 2023.

Keywords: spacecraft, coordinate-time and navigation support, global navigation satellite system, pseudodality, differential systems.

НАУЧНАЯ СЕССИЯ ОБЩЕГО СОБРАНИЯ ЧЛЕНОВ РАН

**КРИТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ ОСВОЕНИЯ
МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОЙ БАЗЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ –
ОТ ПРОГНОЗА И ДОБЫЧИ РУД К ИЗВЛЕЧЕНИЮ МЕТАЛЛОВ
И СОЗДАНИЮ ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНОЙ ПРОДУКЦИИ**

© 2024 г. С.М. Алдошин^{а,*}

^аРоссийская академия наук

*E-mail: sma@icp.ac.ru

Поступила в редакцию 16.01.2024 г.
Поступила после доработки 26.01.2024 г.
Принята к публикации 02.03.2024 г.

В статье рассмотрено современное состояние минерально-сырьевой базы России, вопросы достижения импортонезависимости в обеспечении промышленности России стратегическими металлами. Обсуждаются проблемы поисков и разведки руд таких металлов, их обогащения и извлечения. Приведены предлагаемые Российской академией наук решения некоторых из выявленных проблем. Значительное внимание уделено добыче и извлечению лития и редкоземельных элементов. Статья подготовлена на основе доклада на научной сессии Общего собрания членов РАН 12 декабря 2023 г. с использованием материалов совместного заседания Научного совета РАН по материалам и наноматериалам, Межведомственного научного совета РАН по развитию минерально-сырьевой базы и её рациональному использованию, бюро Отделения химии и наук о материалах РАН, бюро Отделения наук о Земле РАН и при участии представителей Госкорпорации “Росатом”, Минпромторга России и Минобрнауки России.

Ключевые слова: минерально-сырьевая база, стратегические металлы, импортонезависимость, литий, редкоземельные элементы.

DOI: 10.31857/S0869587324030055, EDN: GGVQBD

Состояние и использование минерально-сырьевых ресурсов России. Наиболее актуальная на сегодня государственная задача — достижение технологического суверенитета России и локализация всех связанных технологических цепочек, не может быть решена без прочной опоры на отечественное минеральное сырьё. А значит, необходимо восстанавливать и развивать добывающие отрасли. В настоящее время промышленность России в значи-

тельной степени зависит от импортных поставок стратегических металлов, по отдельным позициям эта зависимость достигает 100%. Несмотря на это, многие отечественные месторождения стратегического минерального сырья, критически зависимого от импорта, не разрабатываются в связи с их низкой рентабельностью и отсутствием спроса на металлы.

Согласно государственному докладу “О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2021 году” и Стратегии развития минерально-сырьевой базы Российской Федерации до 2035 года (распоряжение Правительства Российской Федерации от 22 декабря 2018 г. № 2914-р), балансовые геологические запасы, то есть те, которые экономически выгодно разрабатывать, обеспечивают до 2035 г. потребности высокотехнологичной промышленности стратегическими металлами лишь семнадцати наименований (медь, никель, олово, вольфрам, молибден, тантал, ниобий, кобальт, скандий, германий, платиноиды, железо и др.). Достигнутые уровни добычи свинца,



АЛДОШИН Сергей Михайлович — академик РАН, вице-президент РАН.

сурьмы, золота, серебра, цинка обеспечены запасами разрабатываемых месторождений на период менее 15 лет. К дефицитным даже при нынешних уровнях их потребления относятся большая часть стратегических металлов, необходимых для высокотехнологичных наукоёмких производств, включая атомную промышленность, микроэлектронику, оборонную промышленность, авиационную, космическую отрасль, металлургию, машиностроение, автомобилестроение, “зелёную” энергетику, медицинское оборудование. Это уран, марганец, хром, титан, алюминий, цирконий, гафний, бериллий, литий, рений, редкие металлы и редкоземельные элементы (скандий, иттрий, лантан и лантаноиды, висмут, кадмий, галлий) [1–4].

В соответствии с пунктом 3а перечня поручений Президента Российской Федерации от 28 июня 2022 г. № Пр-1130, направленных на развитие перспективной минерально-сырьевой базы, Научным советом РАН по материалам и наноматериалам и Межведомственным научным советом РАН по развитию минерально-сырьевой базы и её рациональному использованию выполнен комплексный анализ минерально-сырьевой базы (МСБ) России, который показал, что наша страна может полностью заместить импорт стратегического минерального сырья за счёт собственных ресурсов. Для этого необходима работа по всем этапам, включая поиск и разведку новых месторождений, в том числе на слабо изученных арктических территориях Сибири и Дальнего Востока, разработку новых прорывных технологий добычи, обогащения, извлечения и переработки минерального сырья, создание конкурентоспособного производства особо чистых редких металлов.

Эксперты РАН отмечают, что минерально-сырьевая база металлов России используется крайне неэффективно. Она сосредоточена главным образом в открытых более 30–50 лет назад уникальных и крупных месторождениях, для которых определены запасы и резервы, разработаны технологии добычи, обогащения и извлечения главных промышленных металлов. При этом достоверные сведения о запасах, закономерностях размещения и минералах-концентраторах таких редких рассеянных стратегических металлов и редкоземельных металлов (РЗМ), как индий, теллур, рений, гафний, скандий, селен, кадмий, галлий, германий, висмут, извлекаемых в качестве попутных или побочных компонентов, отсутствуют. Это приводит к тому, что редкие и рассеянные металлы не извлекаются при переработке, складируются в хвостохранилищах или экспортируются в продуктах обогащения – концентратах.

Особо следует отметить проблему использования комплексных руд редкоземельных металлов. Основные ресурсы РЗМ сосредоточены в апатит-нефелиновых рудах в Мурманской области [1, 2]. Добыча их составляет около 120 тыс. тонн в год, но извлечение не осуществляется [2]. Отсутствует как экономиче-

ски рентабельная промышленная технология разделения РЗМ и получения продуктов, востребованных производством, так и спрос на металлы отечественного происхождения. Большая часть коллективного концентрата карбонатов редкоземельных металлов, получаемого на Ловозёрском месторождении из лопарита $((\text{Na}, \text{Ce}, \text{Sr})(\text{Ce}, \text{Th})_2(\text{Ti}, \text{Nb})_2\text{O}_6)$ – главного минерала-концентратора РЗМ, экспортируется из-за отсутствия промышленных мощностей по их разделению. Не производится извлечение марганца, хрома, титана, необходимых для производства высококачественных сталей, как и рения, вольфрама и других металлов, используемых в производстве высококачественных жаропрочных сплавов. Из-за низкого качества сырья, несмотря на значительные ресурсы литья, бериллия и других редких металлов, добыча их не ведётся. Немало и других примеров столь нерационального использования минерально-сырьевой базы [3, 4].

В России рынок попутных металлов в сравнении с главными металлами незначителен. Это приводит к потерям стратегических металлов при переработке комплексных руд, и если не изменить требования к эксплуатации месторождений, то такое положение сохранится и в будущем. Как уже сказано, развитие минерально-сырьевой базы стратегических металлов сдерживается отсутствием спроса внутри страны и преобладающим экспортом продуктов низкого передела [5].

Институты, находящиеся под научно-методическим руководством Российской академии наук, при выполнении программы фундаментальных исследований получили принципиально новые результаты, касающиеся закономерностей размещения крупных и уникальных месторождений стратегических металлов, присутствия редких и рассеянных элементов в минералах-концентраторах. На базе современных знаний разработаны геолого-генетические модели провинций и месторождений, развиваются геофизические методы поисков и разведки рудных месторождений, инновационная приборная база, новые системы добычи и обогащения руд, селективного извлечения металлов из комплексных руд и техногенных отходов. Однако эти результаты практически не используются прежде всего потому, что ведущие горнодобывающие компании обеспечены на ближайшие годы резервами и ресурсами, производят сырьё главным образом на экспорт и не заинтересованы в организации глубокой переработки руд. Это приводит к потерям рассеянных металлов, таких как рений, индий, галлий, германий и других, столь необходимых для развития высокотехнологичной промышленности. Несмотря на значительные ресурсы литья, используемого для производства аккумуляторов, в России этот металл до сих пор не добывается. Отсутствует и добыча бериллия.

Деятельность РАН по развитию минерально-сырьевой базы. В своём поручении от 28 июня 2022 г.

№ Пр-1130 Президент Российской Федерации поручил Правительству Российской Федерации с участием Российской академии наук и госкорпорации «Росатом» определить приоритеты развития минерально-сырьевой базы твёрдых полезных ископаемых и подготовить предложения по разработке и реализации федеральной научно-технической программы, направленной на обеспечение комплексного сопровождения геологоразведочных работ, добычу и промышленную переработку твёрдых полезных ископаемых, а также ускоренное замещение импортных технологий и оборудования российскими аналогами. Реализация программы предполагает не только создание технологий от стадии прогноза и поисков месторождений до глубокой переработки высокотехнологичных видов сырья, но также разработку и запуск производства отечественного оборудования, подготовку кадров и, что не менее важно, формирование и развитие устойчивого поступательно растущего внутреннего спроса на получаемую продукцию высоких переделов.

Российская академия наук совместно с организациями Минобрнауки и Минприроды России разработала концепцию программы, в которую включены основные мероприятия по развитию минерально-сырьевой базы страны, и представила её на рассмотрение в Правительство Российской Федерации. Достижение целевых ориентиров программы требует изменения принципов взаимодействия всех вовлечённых в процесс её реализации сторон — недропользователей, государства и общества в лице муниципалитетов и жителей территорий, на которых будут реализовываться проекты.

Президиум РАН 11 апреля 2023 г. провёл специальное заседание и принял постановление «О состоянии и перспективах развития минерально-сырьевой базы Российской Федерации». Создан Межведомственный совет по минерально-сырьевой базе и её рациональному использованию, в Минобрнауки и Минприроды России направлены рекомендации, касающиеся создания консорциумов и центров для разработки отечественных и замещения импортных технологий и оборудования на всех этапах, от поиска до извлечения высокотехнологичных металлов. Основные направления работ были определены 19 ноября 2023 г. на стратегической совместной сессии Научного совета РАН по материалам и наноматериалам, Межведомственного научного совета РАН по развитию минерально-сырьевой базы и её рациональному использованию, бюро Отделения химии и наук о материалах и бюро Отделения наук о Земле РАН с участием представителей Росатома, Минпромторга, Минприроды, Минобрнауки России.

Основой для практической реализации поставленных задач служит «Перечень основных видов стратегического минерального сырья», утверждённый распоряжением Правительства Российской Федерации от 30.08.2022 № 2473-р. К стратегическому

относится минеральное сырьё, которое отражает геополитические интересы страны, имеет особое значение для обеспечения её экономического развития, обороны и безопасности. Перечень такого сырья и материалов устанавливается Правительством Российской Федерации и может меняться в зависимости от военно-политических и экономических приоритетов государства, структуры материального производства и прогнозируемой обстановки, конъюнктуры мирового рынка, состояния внешнеэкономических связей и других обстоятельств.

В настоящее время перечень включает 61 позицию, в том числе: нефть, природный газ, калийные соли, бокситы, алмазы, графит, подземные воды, фосфаты (апатитовые руды), особо чистое кварцевое сырьё, плавленый шпат, а также 51 химический элемент (все элементы — металлы). Российская академия наук рекомендует включить в перечень ещё шесть элементов: бор, мышьяк, селен, кадмий, теллур, висмут. Это необходимо для обеспечения стратегическими металлами всех высокотехнологичных производств.

Подавляющая часть дефицитных видов стратегического минерального сырья относится к группе редких и редкоземельных металлов. Минпромторг России и Минприроды России составили список из 17 стратегических дефицитных видов минерального сырья. В него входят 12 видов сырья, которые либо имеются в России, либо их получение обеспечено надёжными каналами импорта (на рисунке 1 показаны синим цветом), и пять критически зависимых от импорта видов минерального сырья, которые в стране не добываются и импорт которых ненадежен (на рисунке 1 показаны красным цветом). Пять критически зависимых от импорта металлов: марганец, титан, литий, ниобий и редкоземельные элементы (РЗЭ) — европий, диспрозий, неодим, лютеций, празеодим, тербий, лантан, церий — играют наиболее важную роль в создании и функционировании производств перспективной высокотехнологичной продукции.

Проблемы поисков и разведки стратегических металлов. По резервам и ресурсам практически всех металлов Россия входит в первую десятку стран. Тем не менее основная часть необходимых металлов импортируется, и наоборот, основная часть добываемого вывозится в виде концентратов главных металлов, но также содержащих и другие высокотехнологичные металлы, необходимые для промышленности. Россия богата минеральными ресурсами, но большинство открытых месторождений расположено в труднодоступных районах с неразвитой инфраструктурой (рис. 2).

Одно из основных направлений фундаментальных исследований в области минерагении — поиск ответов на вопросы генезиса месторождений. Их цель — понять, какие из наблюдаемых геологических, петрологических, минералогических и гео-

ИМПОРТОЗАВИСИМЫЕ СТРАТЕГИЧЕСКИЕ ВИДЫ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ

17 стратегических дефицитных видов минерального сырья

12

U уран	W вольфрам	Cr хром
Mo молибден	Бокситы	Be бериллий
Ta тантал	Zr цирконий	V ванадий
Re рений	Графит	Плавиковый шпат

5 Критически зависимых от импорта видов минерального сырья

Mn марганец	Ti титан	Li литий	Nb ниобий	REE Редкоземельные металлы	
Y иттрий	La лантан	Ce церий	Pr празеодим	Nd неодим	Tm тулий
Sm самарий	Eu европий	Gd гадолиний	Tb тербий	Dy диспрозий	Ho гольмий
Er эрбий	Yb иттербий	Lu лютеций			

Рис. 1. Дефицитные виды стратегического минерального сырья, определённые Минпромторгом и Минприроды России

химических характеристик отражают процессы, которые привели к образованию того или иного месторождения или металлогенических провинций. Выбор перспективной провинции — критический, наиболее ответственный шаг в стратегическом планировании мероприятий, направленных на открытие новых месторождений. Здесь возможны большие риски и финансовые потери, если на прогнозных территориях не удастся выявить крупные месторождения полезных ископаемых.

В Институте геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН впервые после 1978 г. дана оценка состояния минерально-сырьевой базы высокотехнологичных металлов страны. Выделены генетические типы их месторождений, включая нетрадиционные для России рудные провинции и узлы (рис. 3а). Открыта новая Восточно-Саянская редкометалльная металлогеническая зона (Zr, Nb, Li, Be, REE), положение которой показано на рисунке 3 б.

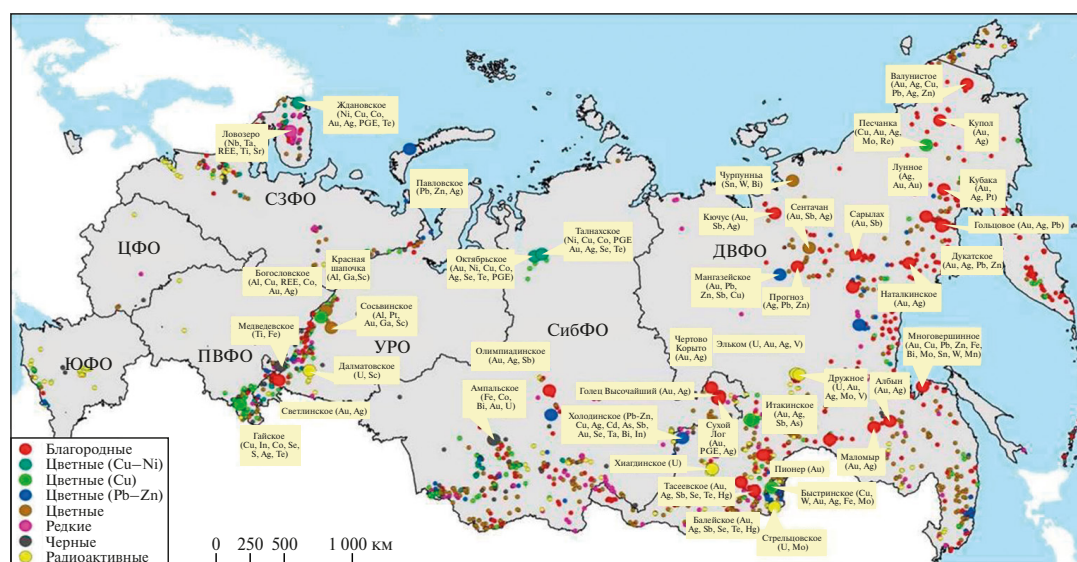


Рис. 2. Месторождения стратегических металлов Российской Федерации

Среди основных проблем, которые тормозят поиск, разведку и освоение месторождений, отметим следующие:

- сокращение и практическое исчерпание поискового задела по большинству стратегических видов полезных ископаемых;
- резкое сокращение государственного фонда рентабельных участков недр для их предоставления в пользование;
- новые открытия делаются в неосвоенных районах с неразвитой инфраструктурой;

- отсутствие научно обоснованных рекомендаций по концентрации имеющихся ресурсов на отдельных направлениях и территориях, здесь необходимо программно-целевое планирование;
- отсутствие необходимых организационно-финансовых условий для эффективной поисковой деятельности юниорных компаний.

РАН считает, что для преодоления перечисленных проблем необходимо существенно расширить геологоразведочные работы на Урале, в Сибири и на Дальнем Востоке, в том числе силами институтов,

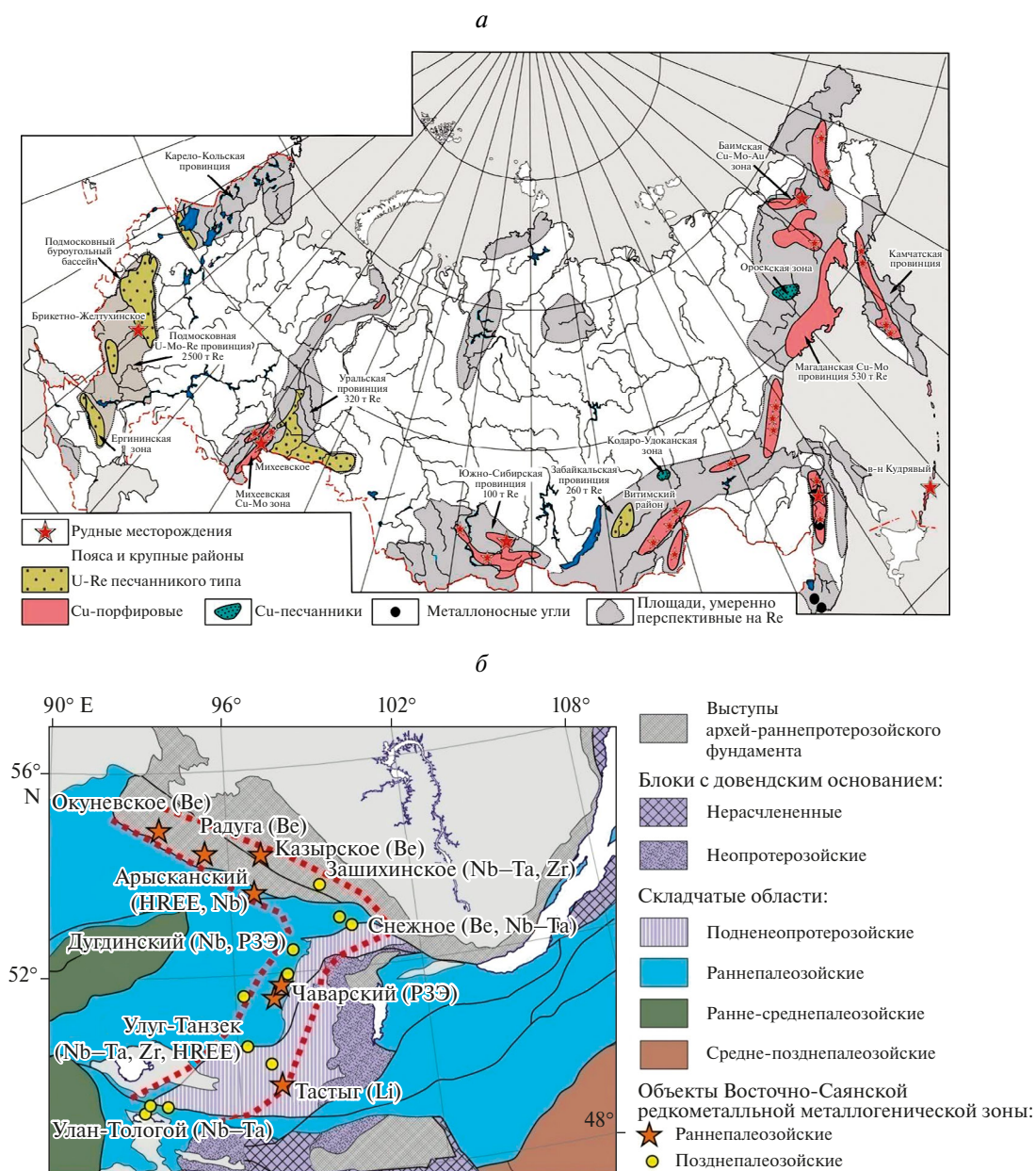


Рис. 3. Рудные провинции и зоны Российской Федерации:

а – карта генетических типов месторождений высокотехнологичных металлов, включая нетрадиционные для России рудные провинции и узлы; *б* – Восточно-Саянская редкометаллическая металлогеническая зона

находящихся под научно-методическим руководством Академии наук. Необходимо уделить особое внимание развитию отечественной аппаратурной базы для полевых и лабораторных исследований, созданию отечественного программного обеспечения по обработке и интерпретации геологических, геофизических и геохимических данных. Эта работа в настоящее время ведётся институтами РАН, отраслевыми институтами и частными компаниями, но всё перечисленное невозможно без целенаправленной государственной поддержки.

Проблемы добычи и обогащения. В настоящее время в России добыча рудоминерального сырья ведётся в более чем пятистах крупных карьерах и подземных рудниках, при этом на долю подземных горных работ приходится более 35%. Все крупные карьеры России и все без исключения подземные рудники относятся к объектам чрезвычайно высокого или высокого класса опасности.

Минерально-сырьевая база России претерпевает непрерывные изменения, при этом отмечаются следующие негативные тенденции.

- Вовлекаемые в эксплуатацию крупные рудные месторождения характеризуются низкосортными труднообогатимыми рудами, требующими изыскания новых способов их переработки.

- Возрастает число вовлекаемых в разработку маломасштабных месторождений, некоторые перспективные месторождения расположены в труднодоступных районах с неразвитой инфраструктурой и неблагоприятными природно-климатическими условиями.

- Проектная глубина горных работ увеличилась за последние 20 лет в среднем в 2 раза и достигла 1100 м на открытых горных работах. Глубина ведения подземных работ на железорудных месторождениях достигает 1000 м, на медноколчедановых и золоторудных – 1200 м, на медно-никелевых – более 2500 м.

- Непрерывно происходит накопление больших объёмов техногенных образований (более 100 млрд т), сопоставимых по качеству с запасами перспективных месторождений. Эти ресурсы должны быть оценены и рассматриваться в качестве составляющей минерально-сырьевой базы.

- В недрах остаётся значительная часть запасов, не извлекаемых по различным причинам [6, 7].

В Институте проблем комплексного освоения недр РАН, Горном институте Кольского научно-го центра РАН, Институте горного дела УрО РАН и Институте горного дела ДВО РАН ведутся комплексные научные исследования, направленные на разработку технологий селективной добычи и обогащения рудопотоков, создание отечественных аналогов технологий идентификации и сепарации руд; технологий переработки и утилизации хвостов обогащения; замкнутых схем обращения минерального вещества в недрах с выдачей на поверхность

товарной продукции; дистанционно управляемых (роботизированных) экологически приемлемых технологий добычи [6].

Базовым объектом для удовлетворения существующих потребностей отечественной промышленности в тантале, ниобии и РЗМ сегодня выступает Ловозёрское месторождение. Промышленное освоение лопаритовых руд ведётся здесь с 1939 г. Согласно распоряжению Правительства Российской Федерации № 809-р в мае 2023 г. Ловозёрский ГОК передан Госкорпорации “Росатом” (предприятие расположено за полярным кругом в центральной части Кольского полуострова).

Проблема добычи редкоземельных металлов может быть решена путём организации их извлечения из апатитовых концентратов или отходов их переработки. Напомним, что 82% запасов TR_2O_3 России заключено в восьми месторождениях апатитовых руд Хибин (58%) и Селигдарского месторождения (24%). В ближайшей перспективе к ним добавится Катугинское месторождение, находящееся на стадии проектирования; вторым по очерёдности после завершения разведочной стадии может стать Зашихинское месторождение. По уровню разведанных запасов, прогнозных ресурсов и качеству руд перспективным для освоения представляется Томторское месторождение [8–10].

Значительные резервы таятся на рудных площадях, ранее выведенных из эксплуатации. Напомним, что уникальный рудник Умбозеро был затоплен после аварии в перестроечный период. Его расконсервация, что, конечно, представляет собой непростую задачу в плане безопасности горных работ, позволит существенно увеличить объём добычи редкоземельного сырья в достаточно короткие сроки по сравнению со строительством новых предприятий.

Как уже отмечалось, перспективы развития горнопромышленного комплекса России для обеспечения критическими металлами, в том числе редкоземельными, связаны с разработкой техногенных образований, которые слабо изучены с точки зрения добычи и глубокой переработки. Во многих случаях не ясна структура отвалов и распределение в них ценных компонентов, что затрудняет обеспечение перерабатывающих обогатительных и гидрометаллургических производств сырьём стабильного качества.

В настоящее время особое внимание следует уделить техногенным образованиям со складированным эвдиалитовым сырьём. Это потребует научно обоснованной оценки таких массивов и изыскания подходов к их безопасной отработке. В отличие от лопарита, который содержит РЗЭ лёгкой группы, эвдиалит, который до настоящего времени не перерабатывается, содержит тяжёлые РЗЭ – самарий, тербий, гадолиний, диспрозий, эрбий. Поэтому эвдиалитовый концентрат, в отличие от лопаритового, нельзя перерабатывать на единственном в стране Соликамском магниевом заводе. Если будут приня-

ты соответствующие решения, нужно строить отдельное гидрометаллургическое предприятие, которое должно предъявлять необходимые требования к качеству добываемого природного и техногенного сырья; в соответствии с ними должны разрабатываться горные технологии добычи такого сырья.

Перспективы повышения производительности действующих рудников во многом связаны с созданием в нашей стране собственного уникального оборудования, не уступающего лучшим мировым образцам. Вопрос технического обеспечения технологий горных работ для нашей страны наиболее сложен с точки зрения достижения технологического суверенитета. В России практически не производится техника для добычи полезных ископаемых подземным способом, аппаратно-программные комплексы управления горнотехническими системами. Более того, в вузах прекращён выпуск специалистов, способных разрабатывать горные машины в соответствии с вышеотмеченными особенностями развития минерально-сырьевой базы. Отсутствуют конструкторские бюро и заводы, способные в короткие сроки восполнить пробелы в отечественном горном машиностроении. Необходимо в кратчайшие сроки совместно с соответствующими отделениями РАН и заинтересованными сторонами начать процесс возрождения российского горного машиностроения, автоматизированных систем контроля и управления технологическими процессами горного производства. Это требование относится и к оборудованию для работы в стеснённых условиях: в нашей стране не производятся погрузочно-доставочные машины с небольшой ёмкостью ковша, оборудование для крепления кровли, системы непрерывного конвейерного транспорта [11].

Для добычи урановых руд перспективен подход, предполагающий создание в недрах специальных горнотехнических конструкций на основе кислотоустойчивых материалов, так называемых камер-реакторов. В эти камеры загружается сырьё требуемой крупности, проводится выщелачивание с возможностью подачи кислорода, осуществляется циркуляция растворов и получение кондиционных для гидрометаллургического передела продуктивных растворов. В результате на поверхность выдаётся меньший объём горной массы, значительная часть отходов остаётся в недрах с возможностью консервации камер. В нашей стране не производятся оборудование и химические компоненты для технологии пастовой закладки для утилизации радиоактивных отходов при освоении урановых месторождений. Для эффективного освоения данного стратегического сырья исследования в этой области должны стать первоочередными.

Проектирование рудников для обеспечения потребности в критических металлах предполагает внедрение перспективных научно обоснованных решений на базе глубокого изучения структуры и свойств горных массивов и добываемого сырья.

Такие решения должны включать селективную отработку, внутрирудничные системы управления качеством, утилизацию пустых пород без выдачи на поверхность, утилизацию хвостов обогащения после глубокой переработки сырья в виде пастовой или иной закладки, комбинированные технологии — сочетание различных физико-технических и физико-химических способов добычи в пределах одного месторождения [6, 11].

Проблемы обогащения и переработки руд. Основные тенденции развития современного горно-металлургического комплекса России определяются необходимостью широкого вовлечения в переработку труднообогатимых руд и техногенного редкометалльного сырья, которые характеризуются низким содержанием ценных компонентов, тонкой вкраплённостью руд и близкими технологическими свойствами слагающих их минералов [12]. При этом эффективность процессов обогащения полезных ископаемых во многом предопределяет экономику всего горно-металлургического производства.

Проблема разделения минералов с близкими технологическими свойствами традиционно решается повышением селективности обогатительных процессов. Научные исследования в настоящее время ведутся по нескольким направлениям, включая разработку флотационных реагентов направленного действия и использование энергетических методов обработки минералов, пульп и промышленных вод. В последние годы для направленного изменения поверхностных свойств минералов активно изучается возможность использования энергетических воздействий, таких как радиационные, ультразвуковые, электрохимические, механохимические, плазменные. Если раньше эти направления рассматривались как экзотические, то в связи с началом выпуска промышленных плазмотронов, линейных ускорителей, ультразвуковых генераторов можно говорить о реальном внедрении новых экологически безопасных технологий в процессы первичной переработки труднообогатимых комплексных руд сложного вещественного состава [13–16].

Рассмотрим комплекс проблем, связанных с добычей, переработкой и обогащением руд на примере лития — одного из основных стратегических металлов. Литий находит применение в различных отраслях промышленности: чёрная и цветная металлургия (повышение пластичности, прочности металлов, сплавы с магнием, алюминием, скандием для гражданских и военных самолётов, ракетной техники), производство лёгких и высокоэффективных химических источников тока, радиоэлектроника, термоэлектрические преобразователи, монокристаллы для лазеров, медицинские препараты. Изотопы лития используются в ядерных реакторах в качестве теплоносителя, карбид лития — в термоядерной энергетике. И это далеко не все применения.

Потребление лития в мире постоянно растёт – с 70 тыс. т в 2020 г. до 93 тыс. т в 2021 г., по прогнозам оно достигнет 450 тыс. т в 2030 г. (более 2 млн т по Li_2CO_3). В России потребление составило 1.5 тыс. т в 2021 г., прогнозы на 2030 г. – 7.5 тыс. т (35 тыс. т по Li_2CO_3).

Разведанные общемировые ресурсы лития составляют 98 млн т. Часть их располагается в рудных месторождениях, которые содержат 30–35% разведанных запасов. Они эксплуатируются в Австралии, Канаде, Зимбабве и Финляндии, недавно открыты новые месторождения в Португалии. Другая часть – гидроминеральное сырьё, составляющее 65–70% запасов, сконцентрировано в соляных озёрах, главным образом высохших содово-щелочных озёрах – сalaraх. Основные запасы разведаны в Чили, Боливии, Аргентине, Китае.

Главные провинции рудных и гидроминеральных месторождений лития в России представлены на рисунке 4. Основные запасы сосредоточены на Кольском полуострове, в Республике Тыва (руды) и в Забайкалье (гидроминеральные смеси). Весьма значительные прогнозные ресурсы лития (около 4.5 млн т категорий Р1 и Р2) содержатся в межпластовых рассолах кембрийских отложений Сибирской платформы [17].

В целом спрос на литий в России, по экспертным оценкам, в настоящее время минимален, этот металл востребован атомной отраслью и ВПК.

Учитывая, что производство лития – процесс энергоёмкий, а электроэнергия в нашей стране значительно дешевле, чем в Европе и США, себестоимость отечественного металла будет экономически привлекательна. Карбонат лития собственного производства планируется получить в России через 2–3 года.

В Институте химии твёрдого тела и механохимии СО РАН ещё в 1950-х годах была разработана комплексная технология переработки spodumene концентрата – источника лития (руководитель работ доктор технических наук И.С. Лилеев). Созданная технология использовалась для получения отечественного лития – был построен Красноярский химико-металлургический завод, который поставлял продукт на Новосибирский завод химических концентратов, где и производили металлический литий батарейного качества и его соединения. В настоящее время завод работает исключительно на импортном сырьё.

Для переработки литиевых руд и концентратов традиционно используют четыре способа: сульфатный, известковый, сернокислотный и хлорирующий обжиг. Сульфатный способ, основанный на спекании литиевых руд и концентратов с сульфатом калия, сопряжён со значительным расходом дорогостоящего сульфата калия. Этот способ применялся в промышленном масштабе при переработке литиевых слюд: лепидолита и цинвальдита. Известковый



Рис. 4. Главные провинции рудных и гидроминеральных месторождений лития в России. Основные рудные запасы сосредоточены на Кольском полуострове и в Республике Тыва, гидроминеральные смеси – в Забайкалье

способ предполагает спекание с известью с последующим разложением спека водой; образующийся при выщелачивании спека гидроксид лития кристаллизуется из раствора после многостадийного упаривания. К преимуществам этого способа относится возможность прямого получения гидроксида лития, но нельзя не учитывать и серьёзные недостатки. Известковый способ применим в большей степени к богатым литиевым концентратам, однако и в этом случае извлечение в готовый продукт не превышает 70%, что обусловлено ограниченной растворимостью гидроксида лития и способностью шламов после выщелачивания к схватыванию. Другой недостаток — необходимость выпаривания больших объёмов растворов.

Разложение серной кислотой (сернокислотный способ) используют для литиевых концентратов всех типов: сподуменовых, лепидолитовых и амблигонитовых. Сернокислотный способ обеспечивает извлечение 80% лития и превосходит все другие технологические процессы. Однако сернокислотная технология сопряжена с рядом нежелательных последствий, в том числе экологических. Ресурсосберегающий аналог этого процесса предложен членом-корреспондентом РАН Р.Х. Хамизовым (Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН). Преимущество процесса в том, что при выщелачивании вместо серной кислоты используется бисульфат аммония, к тому же при разложении сподумена осуществляется регенерация реагента.

В лабораторных условиях продемонстрированы возможности извлечения лития из рудного и гидроминерального сырья с помощью разработанных в Институте геохимии и аналитической химии РАН замкнутых ресурсосберегающих процессов, позволяющих многократно снизить расход реагента и удерживать сорбционные материалы в технологических циклах. Для продвижения технологии необходимы дальнейшие исследования на опытно-промышленных установках, но их создание не профинансировано. Между тем новая технология могла бы найти применение при переработке руд Колмозёрского пегматитового месторождения на Кольском полуострове, объём добычи на котором должен достигнуть 45 тыс. т продукции в год.

Для селективного выделения лития из гидроминеральных смесей применяются методы экстракционные, сорбционные и селективного осаждения. По всем направлениям имеются инновационные разработки институтов РАН. Так, коллективом Института физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН под руководством академика РАН А.Ю. Цивадзе разработан экстракционный способ извлечения лития на основе новых литий-селективных экстрагентов [18]. По структуре они подобны известным 1,3-дикетонам, однако имеют большую эффективность и меньшую стоимость. Разработанный способ обладает крайне высокой Li/Na , Li/K

селективностью и демонстрирует очень высокие коэффициенты распределения лития даже в разбавленных растворах. Способ применим для извлечения лития из руд, рассолов и техногенных отходов. Его апробация также требует создания опытно-промышленной установки.

В 2012 г. в Китае запущено предприятие по выпуску около 10 тыс. т карбоната лития в год с использованием технологии, основанной на разработках Института химии твёрдого тела и механохимии СО РАН [19, 20] и реализованной ООО “Экостар-Наутех” (доктор химических наук Н.П. Козупало и доктор технических наук А.Д. Рябцев, г. Новосибирск). Ранее, в 2004 г., прошли успешные испытания высокоселективного сорбента ДГАЛ-С1 на китайских рассолах компанией из КНР. Освоен промышленный процесс получения карбоната лития из рассолов озера Дабсан-Нур (провинция Цинхай, КНР). Для реализации этой технологии на российских предприятиях Институт химии твёрдого тела и механохимии СО РАН предложил улучшить технологическую схему путём организации сорбционных процессов на порошковом сорбенте с использованием пульсационных колонн — вместо грануляции сорбента ДГАЛ-С1. Применение пульсационных противоточных колонн обеспечивает высокотурбулентное движение раствора и порошкового ДГАЛ-С1, чем снимаются внешние диффузионные ограничения и достигается полнота извлечения лития из рассолов.

Проблемы добычи редкоземельных элементов. На территории Российской Федерации разведано более 90 месторождений РЗЭ (рис. 5). Рудопрооявления зафиксированы в более чем 70 районах. РЗЭ включают 17 химических элементов, из которых сейчас наиболее востребованы диспрозий, неодим, празеодим (в производстве магнитов для транспорта). По ресурсам и резервам редкоземельных элементов Россия делит 2–3 место с Бразилией, уступая только Китаю.

Хотя известно более 200 минералов, содержащих РЗЭ, но добываются для их извлечения только четыре: бастнезит, лопарит, монацит и ксенотим. Для большинства редкоземельных элементов в России нет технологий извлечения, недостаточно изучены физические свойства минералов. В нашей стране разрабатываются два месторождения РЗЭ: Ловозеро, из его лопаритовых руд извлекаются металлы; в хибинских месторождениях РЗЭ содержатся в апатите, из него получают удобрения, а редкоземельные элементы уходят в хвосты. В 2021 г. Китай добыл 168 тыс. т, а Россия — 117,7 тыс. т руд РЗМ. Но из добытого в нашей стране только 2,5 тыс. т лопаритовых руд идёт в переработку.

Институты РАН активно разрабатывают технологии переработки руд Кольского региона (в числе его преимуществ — достаточно развитая инфраструктура и транспортная доступность) [13]. В Ин-

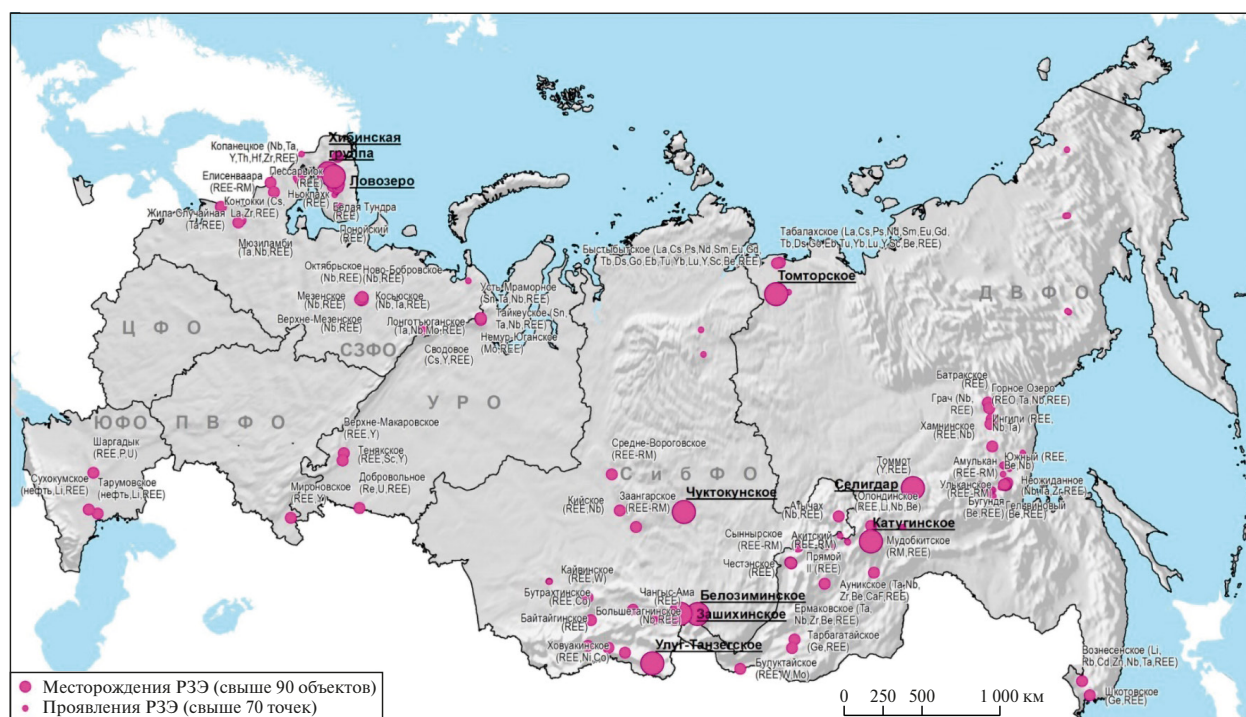


Рис. 5. Основные месторождения редкоземельных элементов в Российской Федерации

ституте проблем комплексного освоения недр РАН предложена технология переработки эвдиалитовых руд [13]. Производство TiO_2 для титан-содержащих продуктов из техногенных отходов обогащения апатито-нефелиновой руды разработано в Институте химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И.В. Тананаева Кольского научно-го центра РАН. Этим институтом, а также Государственным научно-исследовательским и проектным институтом редкометаллической промышленности и Ведущим научно-исследовательским институтом химической технологии (оба в составе ГК «Росатом») предложен совместный проект переработки колмозерского сподумена, с получением карбоната лития на пилотной площадке в г. Апатиты.

Следует также отметить, что наиболее быстрыми темпами самообеспечение по ряду импортозависимых видов минерального сырья (Ti, Nb, REE, Ta, Zr) может быть достигнуто за счёт освоения россыпных месторождений, преимущества которых по сравнению с коренными месторождениями заключаются, во-первых, в относительно неглубоком залегании промышленного пласта (десятки метров), что позволяет проводить отработку в открытом карьере; во-вторых, для глубокозалегающих россыпей возможно применение метода скважинной гидродобычи, по эффективности сопоставимого с открытой отработкой; в-третьих, процессы обогащения, преимущественно гравитационного, технологически просты; в-четвёртых, процессы обогащения энергетически эффективны, исклю-

чают дробление материала, на которое уходит 50% энергетических затрат при разработке коренных месторождений; в-пятых, средства, вложенные в добычу россыпей, быстро начинают отдачу, часто в течение одного сезона.

В Томторском и Чукотском месторождениях сосредоточено около 80% запасов богатых руд России по редкоземельным металлам и ниобию [17], однако предварительное их обогащение современными методами не представляется возможным. Это обусловлено ультрадисперсностью минеральных составляющих и их тонким взаимным прорастанием [13]. Общие ресурсы Томторского месторождения колоссальны. По современным оценкам запасы составляют 73.6 млн т Nb_2O_5 , 153.7 млн т TR_2O_3 , около 2 млрд т P_2O_5 . По ресурсам редких и редкоземельных металлов и их концентрациям Томторское месторождение — безусловный лидер нашей планеты. Чукотское рудное месторождение, расположенное в Красноярском крае, в 120 км от г. Козьмодемьянск, — уникальный редкометалльный объект России, содержащий наряду с редкоземельными металлами ниобий и ряд других ценных металлов.

Однако освоение этих месторождений затруднено в связи с их удалённостью, сложными географическими условиями, вечной мерзлотой, отсутствием инфраструктуры, в том числе дорог и энергоснабжения. В настоящее время выполняется большой цикл исследований по комплексной переработке руд этих месторождений [21, 22]. Исследования по усовершенствованию процесса глубокого обога-

щения руды Томторского месторождения (участок Южный и Северный) ведутся во Всероссийском научно-исследовательском институте минерального сырья им. Н.М. Федоровского. В Институте химии и химической технологии СО РАН разработана уникальная технология переработки томторских руд. В полезную переработку вовлекается 75% компонентов руды, в результате чего отсутствует необходимость в её предварительном обогащении.

Выводы и рекомендации. Резюмируя, необходимо ещё раз подчеркнуть: достижение технологического суверенитета России — наиболее актуальной на сегодня государственной задачи — неосуществимо без прочной опоры на отечественное минеральное сырьё.

В целях исполнения поручения Президента Российской Федерации от 28 июня 2022 г. № Пр-1130 Российская академия наук считает необходимым ускорить разработку и реализацию федеральной научно-технической программы “Развитие минерально-сырьевой базы на основе технологий прогноза, поисков, геологоразведки, добычи и обогащения руд стратегических металлов и их извлечения для обеспечения высокотехнологичной промышленности Российской Федерации”. Программа предусматривает не только создание технологий от стадии прогноза и поисков месторождений до глубокой переработки высокотехнологичных видов сырья, но и разработку и запуск производства отечественного оборудования, подготовку кадров и, что не менее важно, формирование и развитие устойчивого поступательно растущего внутреннего спроса на получаемую продукцию высоких переделов. В ходе реализации программы должен осуществляться постоянный мониторинг актуальности включённых в неё работ и мероприятий, уточнение приоритетов развития минерально-сырьевой базы полезных ископаемых в увязке с прогнозом научно-технологического развития России, комплексное научно-техническое сопровождение геологоразведочных работ, добычи и промышленной переработки твёрдых полезных ископаемых, а также ускоренное замещение импортных технологий и оборудования российскими аналогами.

Российская академия наук призвана объединить исследования ведущих научных и производственных организаций по следующим направлениям:

- разработка отечественной аппаратуры для полевых и лабораторных геологических, геохимических и геофизических исследований, в том числе для поиска и разведки скрытых, глубокозалегающих, нетрадиционных и техногенных месторождений металлов и иных видов стратегического минерального сырья;
- расширение работ по поискам и разведке новых месторождений на Урале, в Сибири и на Дальнем Востоке с особым вниманием к слабо изученным арктическим регионам;

- разработка и обеспечение промышленного производства отечественного оборудования для проведения подземных работ, в том числе в стеснённых условиях и с применением безлюдных технологий;

- разработка новых технологий добычи, аппаратно-программных комплексов управления горнотехническими системами, в том числе замкнутых схем обращения минерального вещества в недрах с выдачей на поверхность только товарной продукции;

- создание экологически безопасных технологий извлечения стратегических металлов из комплексных руд сложного вещественного состава, выделения ценного сырья из гидроминеральных и техногенных источников;

- создание и промышленное производство высокоэффективных отечественных флотореагентов, экстрагентов и сорбентов для их применения в технологиях обогащения и селективного извлечения стратегических металлов, а также нового отечественного оборудования для предконцентрации и обогащения (дробилки ударного действия, тяжелосредные сепараторы, флотационные машины и др.);

- создание опытно-промышленных обогатительных установок для апробации инновационных технологий обогащения, разделения и извлечения стратегических металлов, разработанных в процессе проведения опытно-конструкторских работ.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает благодарность академикам РАН Н.С. Бортникову, В.Н. Захарову, Л.И. Леонтьеву, Н.П. Похиленко, А.Ю. Цивадзе, В.А. Чантурия, членам-корреспондентам РАН Т.Н. Александровой, А.В. Волкову, А.П. Немудрому, И.Г. Тананаеву, Р.Х. Хамизову, доктору геолого-минералогических наук А.В. Лаломову, доктору химических наук О.П. Таран за предоставленные материалы.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Бортников Н.С., Лобанов К.В., Волков А.В. и др.* Месторождения стратегических металлов арктической зоны // Геология рудных месторождений. 2015. Т. 57. № 6. С. 479–500.
Bortnikov N.S., Lobanov K.V., Volkov A.V. et al. Strategic metal deposits of the Arctic Zone // Geology of ore deposits. 2015. V. 57. № 6. P. 433–453.
2. *Бортников Н.С., Волков А.В., Галямов А.Л. и др.* Минеральные ресурсы высокотехнологичных металлов в России: состояние и перспективы // Геология рудных месторождений. 2016. Т. 58. № 2. С. 97–119.
Bortnikov N.S., Volkov A.V., Galyamov A.L. et al. Mineral resources of high-tech metals in Russia: State of the art and outlook // Geology of ore deposits. 2016. V. 58. № 2. P. 83–103.

3. Бортников Н.С., Волков А.В., Галямов А.Л. и др. Фундаментальные проблемы развития минерально-сырьевой базы высокотехнологичной промышленности и энергетики России // Геология рудных месторождений. 2022. Т. 64. № 6. С. 617–633.
- Bortnikov N.S., Volkov A.V., Galyamov A.L. et al. Fundamental Problems of Development of the Mineral-Resource Base of High-Tech Industry and Energy of Russia // Geology of ore deposits. 2022. V. 64. № 6. P. 313–328.*
4. Бортников Н.С., Волков А.В., Галямов А.Л. и др. Проблемы развития минерально-сырьевой базы высокотехнологичной промышленности России // Геология рудных месторождений. 2023. Т. 65. № 5. С. 371–386.
- Bortnikov N.S., Volkov A.V., Galyamov A.L. et al. Problems of development of the mineral resource base of the high-tech industry of Russia // Geology of ore deposits. 2023. V. 65. № 5. P. 397–411.*
5. Бортников Н.С., Лаломов А.В., Волков А.В., Боцнева А.А. Роль россыпных месторождений в обеспечении воспроизводства минерально-сырьевой базы дефицитных видов стратегического минерального сырья России на современном этапе. 2024 // Russian Journal of Earth Science. 2024. № 1 DOI: 10.2205/2024es000897
- Bortnikov N.S., Lalomov A.V., Volkov A.V., Bochnova A.A. The role of alluvial deposits in ensuring the reproduction of the mineral resource base of scarce types of strategic mineral raw materials in Russia at the present stage // Russian Journal of Earth Science. 2024. № 1. DOI: 10.2205/2024es000897*
6. Каплунов Д.Р., Радченко Д.Н. Принципы проектирования и выбор технологии освоения недр, обеспечивающих устойчивое развитие подземных рудников // Горный журнал. 2017. № 11. С. 52–59. DOI: 10.17580/gzh.2017.11.10
- Kaplunov D.R., Radchenko D.N. Design philosophy and choice of technologies for sustainable development of underground mines // Gornyi Zhurnal. 2017. № 11. P. 52–59. DOI: 10.17580/gzh.2017.11.10*
7. Каплунов Д.Р., Федотенко В.С. Устойчивое развитие горнотехнических систем как переход от добычи полезных ископаемых к освоению георесурсов и сохранению недр // Горный журнал. 2021. № 8. С. 4–7. DOI:10.17580/gzh.2021.08.01
- Kaplunov D.R., Fedotenko V.S. Sustainable advancement in geotechnical engineering as transition from mineral mining to development and preservation of natural resources // Gornyi Zhurnal. 2021. № 8. P. 4–7. DOI:10.17580/gzh.2021.08.01*
8. Похиленко Н.П., Толстов А.В. Перспективы освоения Томторского месторождения комплексных ниобий-редкоземельных руд // ЭКО – Всероссийский экономический журнал. 2012. № 11. С. 17–27.
- Pokhilenko N., Tolstov A. Prospects for the development of the Tomtorskoye deposit of complex niobium-rare earth ores // ECO – All-Russian Economic Journal. 2012. № 11. P. 17–27.*
9. Похиленко Н.П., Крюков В.А., Толстов А.В., Самсонов Н.Ю. Томтор как приоритетный инвестиционный проект обеспечения России собственным источником редкоземельных элементов // ЭКО – Всероссийский экономический журнал. 2014. № 2. С. 22–35.
- Pokhilenko N., Kryukov V., Tolstov A., Samsonov N. Tomtor as Priority Investment Project to Provide Russia with its own Source of Rare Earth Elements // ECO – All-Russian Economic Journal. 2014. № 2. P. 22–35.*
10. Толстов А.В., Похиленко Н.П., Лапин А.В. и др. Инвестиционная привлекательность Томторского месторождения и перспективы её повышения // Разведка и охрана недр. 2014. № 9. С. 25–30.
- Tolstov A.V., Pokhilenko N.P., Lapin A.V. et al. Investment appeal of Tomtor deposit and prospect of its increase // Prospect and protection of mineral resources. 2014. № 9. P. 25–30.*
11. Захаров В.Н., Гвишиани А.Д., Вайсберг Л.А., Дзеранов Б.В. Большие данные и устойчивое функционирование горнотехнических систем // Горный журнал. 2021. № 11. С. 45–52. DOI: 10.17580/gzh.2021.11.06
- Zakharov V.N., Gvishiani A.D., Vaisberg L.A., Dzeranov B.V. Big Data and sustainable functioning of geotechnical systems // Gornyi Zhurnal. 2021. № 11. P. 45–52. DOI: 10.17580/gzh.2021.11.06*
12. Леонтьев Л.И., Заякин О.В., Волков А.И. Проблемы развития металлургической отрасли для обеспечения технологического суверенитета России с учётом состояния минерально-сырьевой базы // Вестник РАН. 2023. Т. 93. № 7. С. 631–645.
- Leontiev L.I., Zayakin O.V., Volkov A.I. Problems of development of the metallurgical industry to ensure the technological sovereignty of Russia, accounting the state of the mineral resource base // Herald of the Russian Academy of Sciences. 2023. V. 93. № 7. P. 631–645.*
13. Чантурия В.А. Научное обоснование и разработка инновационных процессов комплексной переработки минерального сырья // Горный журнал. 2017. № 11. С. 7–13. DOI:10.17580/gzh.2017.11.01
- Chanturia V.A. Scientific substantiation and development of innovative approaches to integrated mineral processing // Gornyi Zhurnal. 2017. № 11. P. 7–13. DOI:10.17580/gzh.2017.11.01*
14. Чантурия В.А., Николаев А.И., Александрова Т.Н. Инновационные экологически безопасные процессы извлечения редких и редкоземельных элементов из комплексных руд сложного вещественного состава // Геология рудных месторождений. 2023. Т. 65. № 5. С. 402–415. DOI:10.31857/S0016777023050040

- Chanturia V.A., Nikolaev A.I., Aleksandrova T.N.* Innovative Environmentally Safe Processes for the Extraction of Rare and Rare-Earth Elements from Complex Ores of Perplexed Material Composition // *Geology of ore deposits*. 2023. V. 65. № 5. P. 425–437
15. *Aleksandrova T., Nikolaeva N., Afanasova A. et al.* Extraction of Low-Dimensional Structures of Noble and Rare Metals from Carbonaceous Ores Using Low-Temperature and Energy Impacts at Succeeding Stages of Raw Material Transformation // *Minerals*. 2023. V. 13. № 1. P. 84. <https://doi.org/10.3390/min13010084>
Александрова Т.Н., Прохорова Е.О. Модификация свойств порообразующих минералов при флотации // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2023. № 12. С. 123–138. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_12_0_123.
 16. *Aleksandrova T.N., Prokhorova E.O.* Modification of properties of rock-forming minerals during flotation // *Mining informational and analytical bulletin*. 2023. № 12. P. 123–138. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_12_0_123
 17. *Похиленко Н.П., Афанасьев В.П., Толстов А.В. и др.* Перспективы развития и проблемы освоения сырьевой базы дефицитных стратегических видов твёрдых полезных ископаемых Сибири // *Геология рудных месторождений*. 2023. Т. 63. № 5. С. 476–492.
Pokhilenko N.P., Afanasiev V.P., Tolstov A.V. et al. Perspectives of the Development and Problems of Exploration of a Resource Base of Deficient Strategic Mineral Deposits of Siberia // *Geology of Ore Deposits*. 2023. V. 63. № 5. P. 476–492.
 18. *Цивадзе А.Ю., Баулин В.Е., Костикова Г.В. и др.* Селективное извлечение лития из минерального, гидроминерального и вторичного сырья // *Вестник РАН*. 2023. № 7. С. 623–630.
Tsivadze A.Yu., Baulin V.E., Kostikova G.V. et al. Selective extraction of lithium from mineral, hydromineral and secondary raw materials // *Herald of the Russian Academy of Sciences*. 2023. № 7. P. 623–630.
 19. *Немудрый А.П., Исупов В.П., Коцупало Н.П., Болдырев В.В.* Взаимодействие кристаллического гидроксида алюминия с водными растворами солей лития. 2. К вопросу о механизме взаимодействия гидраргиллита с водными растворами хлорида лития // *Изв. СО АН СССР. Сер. хим. наук*. 1984. Вып. 5. С. 47–51.
Nemudry A.P., Isupov V.P., Kotsupalo N.P., Boldyrev V.V. Interaction of crystalline aluminum hydroxide with aqueous solutions of lithium salts. 2. On the question of the mechanism of interaction of hydrargillite with aqueous solutions of lithium chloride // *Izv. Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences. Ser. chem. Sci.* 1984. V. 5. P. 47–51.
 20. *Isupov V.P., Kotsupalo N.P., Nemudry A.P., Menzheres L.T.* Aluminium hydroxide as selective sorbent of lithium salts from brines and technical solutions // *Stud. Surf. Sci. Catal.* 1999. V. 120(A). P. 621–652. [https://doi.org/10.1016/s0167-2991\(99\)80567-9](https://doi.org/10.1016/s0167-2991(99)80567-9)
 21. *Serdyuk S.S., Lomayev V.G., Kuzmin V.I. et al.* The Chuktukon niobium-rare earth metals deposit: Geology and investigation into the processing options of the ores // *Minerals Engineering*. 2017. V. 113. November. P. 8–14.
 22. *Kuzmin V.I., Flett D.S., Kuzmina V.N. et al.* The composition, chemical properties, and processing of the unique niobium-rare earth ores of the Tomtor deposit // *Chemical Papers*. 2019. V. 73. Is. 6. P. 1437–1446. DOI: 10.1007/s11696-019-00695-z

CRITICAL TECHNOLOGIES FOR THE DEVELOPMENT OF BASE OF THE MINERAL RESOURCES OF THE RUSSIAN FEDERATION: FROM FORECASTING AND ORE MINING TO METAL EXTRACTION AND THE CREATION OF HIGH-TECH PRODUCTS

S.M. Aldoshin^{a,*}

^a*Russian academy of sciences*

^{*}*E-mail: sma@icp.ac.ru*

The current state of the mineral resource base of Russia, the issues of achieving import independence in providing Russian industry with strategic metals are considered. The problems of prospecting and exploration of ores of such metals, their enrichment and extraction are discussed. Solutions to some of the identified problems proposed by the Russian Academy of Sciences are presented. Considerable attention is paid to the mining and extraction of lithium and rare earth elements.

The article is based on a report at the scientific session of the General Meeting of Members of the Russian Academy of Sciences on December 12, 2023, using materials from a joint meeting of the Scientific Council of the Russian Academy of Sciences on Materials and Nanomaterials, the Interdepartmental Scientific Council of the Russian Academy of Sciences on the development of the mineral resource base and its rational use, the bureau of the Department of Chemistry and Material Sciences of the Russian Academy of Sciences, the Bureau of the Department of Geosciences of the Russian Academy of Sciences and with the participation of representatives of the State Corporation "Rosatom", the Ministry of Industry and Trade of Russia and the Ministry of Education and Science of Russia.

Keywords: mineral resource base, strategic metals, import independence, lithium, rare earth elements.

НАУЧНАЯ СЕССИЯ ОБЩЕГО СОБРАНИЯ ЧЛЕНОВ РАН

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО СУВЕРЕНИТЕТА РОССИИ
В МЕТАЛЛУРГИИ И МАШИНОСТРОЕНИИ

© 2024 г. А.В. Макаров^{a,*}, А.А. Иноземцев^{b,**}, В.Г. Дегтярь^{c,***},
Е.В. Харанжевский^{d,****}, А.Б. Котельников^{e,*****},
А.А. Вопнерук^{e,*****}

^aИнститут физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, Россия

^bАО “ОДК-Авиадвигатель”, Пермь, Россия

^cАО “Государственный ракетный центр имени академика В.П. Макеева”, Миасс, Россия

^dУдмуртский государственный университет, Ижевск, Россия

^eАО «Научно-производственное предприятие “Машпром”», Екатеринбург, Россия

*E-mail: avm@imp.uran.ru

**E-mail: office@avid.ru

***E-mail: src@makeyev.ru

****E-mail: eh@udsu.ru

*****E-mail: kab@mprom.biz

*****E-mail: rp.mmp@mprom.biz

Поступила в редакцию 01.02.2024 г.

После доработки 06.02.2024 г.

Принята к публикации 16.03.2024 г.

В статье приведены результаты реализации трёх стратегически важных программ создания газотурбинных авиационных двигателей нового поколения ПД-14, ПД-8 и ПД-35 с целью обеспечения технологического суверенитета России в области гражданского авиадвигателестроения. Рассмотрены приоритетные для гражданского ракетостроения разработки ракеты-носителя с многоразовой возвращаемой первой ступенью и полностью многоразовой одноступенчатой ракеты-носителя вертикального взлёта и посадки, в конструкции которых применяются многослойные композиционные материалы. Представлены новые технологии получения короткоимпульсным лазерным оплавлением керамических покрытий на основе карбида бора с микротвёрдостью до 43 ГПа и легированных висмутом поверхностных слоёв стали с уникальными триботехническими характеристиками: превосходной износостойкостью и сверхнизким коэффициентом трения (до 0.03) без смазки. Представлены также российские инновационные технологии ремонта и производства новых стенок кристаллизаторов машин непрерывного литья заготовок с износостойкими композиционными покрытиями, восстановления толщины медных стенок способом многопроходной плоскостной сварки трением с перемешиванием.

Ключевые слова: газотурбинные авиационные двигатели, лопадки вентилятора, мотогондола, горение топлива, многоразовая ракета-носитель, полимерные композиционные материалы, углепластик, керамические покрытия, карбид бора, оксиды металлов, сверхнизкий коэффициент трения, стенки кристаллизаторов, композиционные покрытия, сварка трением с перемешиванием.

DOI: 10.31857/S0869587324030068, EDN: GGSFLK

МАКАРОВ Алексей Викторович — член-корреспондент РАН, заведующий отделом материаловедения ИФМ УрО РАН. ИНОЗЕМЦЕВ Александр Александрович — академик РАН, заместитель генерального директора АО “ОДК” по управлению НПК “Пермские моторы”, управляющий директор — генеральный конструктор АО “ОДК-Авиадвигатель”. ДЕГТЯРЬ Владимир Григорьевич — академик РАН, генеральный директор, генеральный конструктор АО “ГРЦ Макеева”. ХАРАНЖЕВСКИЙ Евгений Викторович — доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией УдГУ. КОТЕЛЬНИКОВ Александр Борисович — генеральный директор АО «НПП “Машпром”». ВОПНЕРУК Александр Александрович — кандидат технических наук, руководитель проекта АО «НПП “Машпром”».

Металлургия и машиностроение — системообразующие отрасли промышленности Российской Федерации, без которых невозможно решение ни одной из стратегических задач государственной политики — от авиакосмического сектора и национальной обороны до микроэлектроники и медицины. Для обеспечения технологического суверенитета в этих отраслях необходимо опираться на новейшие научные разработки и создавать научный задел на будущее на основе фундаментальных исследований. Сложность возникающих научно-технических проблем требует привлечения усилий широкого круга научных организаций, ведущих исследования такого уровня. То есть сформировалась насущная потребность в укреплении сотрудничества реального сектора экономики России с государственными научными центрами и научными организациями РАН.

Серьёзной проблемой на протяжении последних десятилетий стала зависимость Российской Федерации от массового импорта гражданских самолётов. Развитие же отечественного гражданского авиастроения во многом определяется созданием собственных газотурбинных двигателей нового поколения, поэтому первоочередная задача обеспечения технологического суверенитета нашей страны в области гражданской авиации заключается в разработке и освоении серийного производства современных гражданских турбовентиляторных двигателей пятого поколения ПД-14 и ПД-35. Решение в предельно сжатые сроки этой задачи потребует концентрации научного и технологического потенциала страны с участием профильных государственных научных центров (ЦАГИ, ЦИАМ, ВИАМ) и институтов РАН в разработке научных основ, а также ключевых материалов и технологий.

Возвращение Российской Федерации на передовые позиции в космонавтике — также в числе приоритетов государственной политики. Выведение в космическое пространство и обеспечение функционирования орбитальных группировок космических аппаратов необходимо для осуществления навигации, телекоммуникации, дистанционного зондирования Земли, повышения обороноспособности, проведения научных экспериментов и, наконец, для изучения Вселенной. Эффективность и конкурентоспособность космической отрасли в современных условиях во многом определяется созданием экономических ракет-носителей нового поколения и перспективных ракетно-космических систем как частично, так и полностью многоразовых.

Выход из строя более 80% изделий машиностроения происходит в результате их поверхностного разрушения при изнашивании, коррозии, эрозии при кавитации, воздействии высоких температур и контактных нагрузок. Усталостные трещины также зарождаются именно на поверхности деталей. В этой связи применением эффективных способов модифицирования поверхности нередко достигается кратное повышение ресурса деталей, узлов

и механизмов. Для обеспечения технологического суверенитета в этой области следует развивать передовые отечественные лазерные технологии создания сверхтвёрдых, износостойких и антифрикционных покрытий и легированных слоёв.

В обеспечении национальной безопасности в области сталелитейной промышленности стратегически важное значение имеют разработки материалов и технологий изготовления и ремонта кристаллизаторов машин непрерывного литья заготовок (на таких машинах осуществляется более 96% мирового объёма выпуска стали).

Рассмотрим подробнее пути решения перечисленных задач.

СОЗДАНИЕ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ ДЛЯ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ

Авиационное двигателестроение — наукоёмкая, высокотехнологичная и динамично развивающаяся отрасль, имеющая существенное значение для обороноспособности и социально-экономического развития страны. Для обеспечения технологического суверенитета в этой сфере реализуются три стратегически важные программы: “ПД-14”, “ПД-8” и “ПД-35”.

Первая из них предполагает создание семейства авиационных двигателей пятого поколения в диапазоне тяги 9–18 т. Базовый двигатель ПД-14, предназначенный для нового российского ближне-среднемагистрального самолёта МС-21-310, — это первый двигатель гражданского назначения, созданный в современной России с “осевой линии”, его разработка заложила фундамент для развития российского двигателестроения на десятилетия вперёд. Магистральный самолёт МС-21-310 с ПД-14 возвращает нашу страну на передовые позиции в мировой авиации (рис. 1).

Проектирование ПД-14 выполнено в АО “ОДК-Авиадвигатель”. Серийное производство налажено в АО “ОДК-Пермские моторы” в тесной кооперации с предприятиями Объединённой двигателестроительной корпорации (ГК “Ростех”). Впервые в истории отечественного двигателестроения пермским КБ создана двигательная установка, включающая в себя, помимо двигателя, и мотогондолу (в ней использованы современные полимерные композитные материалы, что позволило существенно снизить массу силовой установки). ПД-14 имеет все необходимые лётные сертификаты. Научно-методологическое сопровождение программы выполнено государственными научными центрами ЦАГИ, ЦИАМ, ВИАМ. Необходимо отметить и весомый вклад Института проблем сверхпластичности металлов РАН в разработку технологии изготовления пустотелой лопатки вентилятора, являющейся важнейшим элементом двигателя, Института механики сплошных сред УрО РАН, а также профильных институтов СО РАН в решение прикладных задач.



Рис. 1. Самолёт MC-21-310 с двигателями ПД-14

Вторая программа касается создания авиационного двигателя ПД-8, многие технологии и материалы которого уже серийно освоены в ПД-14. ПД-8 предназначен для замены российско-французского двигателя SaM146 и установки на пассажирский самолёт Sukhoi Superjet New. ПД-8 также планируется устанавливать на самолёт-амфибию Бе-200, оснащённый в настоящее время украинскими двигателями. Таким образом, в результате реализации программ “ПД-14” и “ПД-8” Россия достигает полного технологического суверенитета в области двигателестроения для ближне-среднемагистральной авиации.

Третья программа предусматривает разработку ключевых технологий двигателей большой тяги, демонстрацию готовности технологий на двигателе-демонстраторе ПД-35, создание семейства конкурентоспособных двигателей (диапазон взлётной тяги от 24 до 50 т) в востребованных рынках классов тяги. В числе 20 новых ключевых технологий (поколение 5+) – создание рабочей лопатки вентилятора из полимерных композиционных материалов (рис. 2 а), малоэмиссионной камеры сгорания, высокотемпературных турбин с уменьшенным расходом охлаждающего воздуха, мотогондолы с естественным ламинарным обтеканием, изготовление деталей двигателя, в частности крупногабаритных, с применением аддитивных технологий, изготовление литых, в том числе крупногабаритных и сложнофасонных, деталей из жаропрочных, титановых и цветных сплавов, конструктивно-технологические решения для производства подшипниковых опор роторов двигателя и др. Всего в рамках третьей программы с участием ЦАГИ, ЦИАМ, ВИАМ и профильных институтов РАН планируется решить более 1200 крупных научно-инженерных задач. Рассмотрим некоторые из них.

Авиационные материалы. Для перспективных образцов авиационной техники разрабатывается новый класс материалов, обладающих улучшенными эксплуатационными свойствами. Так, под руководством академика РАН Е.Н. Каблова в НИЦ “Курчатовский институт” – ВИАМ выполнен

большой объём НИОКР по созданию нового поколения конструкционных высокотемпературных, полимерных композиционных, аддитивных, интерметаллидных и функциональных материалов [1]. Всего учёными и специалистами ВИАМ для ПД-35 предложено 13 новых материалов с повышенными показателями физико-механических свойств и ещё 6 находятся в стадии разработки. Керамические композиционные материалы могут обеспечить длительную работу теплонапряжённой части двигателя при температурах до 1400°C без “дорогостоящего” воздушного охлаждения, что даёт дополнительный выигрыш в топливной эффективности. Для обеспечения требуемых параметров рабочего цикла двигателя в НИЦ “Курчатовский институт” – ВИАМ разрабатывается бескислородный керамический композиционный материал с матричным составом системы Si-B-Mo-C [2].

В Институте проблем сверхпластичности металлов РАН под руководством члена-корреспондента РАН Р.Р. Мулюкова разработан γ -TiAl интерметаллидный сплав [3]. В интервале температур 600–800°C он демонстрирует самые высокие удельные прочностные и упругие свойства среди известных конструкционных материалов, что обеспечивает снижение массы лопаток турбины низкого давления и повышение надёжности.

Аэродинамика. Для повышения дальности полёта актуально снижение аэродинамического сопротивления двигательной установки и самолёта в целом за счёт организации естественного ламинарного обтекания поверхности мотогондолы. Сотрудниками Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН под руководством академика РАН В.М. Фомина предложен программный продукт на основе e^N -метода для расчёта затягивания положения ламинарно-турбулентного перехода на поверхности мотогондолы [4, 5]. В ЦАГИ под руководством академика РАН С.Л. Чернышева и члена-корреспондента РАН К.И. Сыпало проведён цикл исследований проточной модели мотогондолы, спроектированной с учётом расчётов, проведённых в ИТПМ СО РАН. Получены положительные результаты.

В настоящее время учёные ЦАГИ, ИТПМ СО РАН и специалисты “ОДК-Авиадвигатель” совместно проектируют демонстратор мотогондолы с естественным ламинарным обтеканием для испытаний в составе летающей лаборатории. По предварительным оценкам, применение такой мотогондолы может привести к уменьшению потребного расхода топлива на 1.0–1.5%, что повысит конкурентоспособность российского двигателя большой тяги.

Повышение усталостной прочности элементов двигателя. В Институте механики сплошных сред УрО РАН под руководством члена-корреспондента РАН О.А. Плехова создана опытная установка для упрочнения деталей лазерным ударом, которая обеспечивает наведение поверхностных сжимающих остаточных

напряжений на глубину свыше 1 мм [6]. Внедрение этой технологии позволит существенно повысить эксплуатационную надёжность лопаток компрессора при возможном попадании града, льда, песка, иных посторонних предметов на вход двигателя.

Оптические измерительные технологии. В Институте теплофизики СО РАН под руководством академика РАН Д.М. Марковича создан современный стенд для испытаний отсека камеры сгорания с оптическим доступом, позволяющий детально исследовать рабочий процесс в модельной камере ПД-35 при повышенном давлении (до 20 атм) и температуре воздуха на входе в отсек (до 600°C). Оптические технологии способствуют также повышению качества математического моделирования процессов распыления и горения топлива, образования выбросов NO_x , CO (в 4D постановке).

Работы по созданию технологий двигателей большой тяги стартовали в 2018 г. С 2021 г. проводятся испытания газогенератора-демонстратора ПД-35. Первые испытания полноразмерного двигателя-де-

монстратора технологий ПД-35 (рис. 2 б) начались в АО «ОДК-Авиадвигатель» в феврале 2024 г. В апреле 2024 г. достигнута проектная взлётная тяга 35 тс. Для испытаний семейства таких двигателей в пригороде Перми сооружён уникальный испытательный стенд открытого типа, не имеющий аналогов в России, Евросоюзе и странах Азии (рис. 2 в).

ПРИОРИТЕТНЫЕ РАЗРАБОТКИ МНОГОРАЗОВЫХ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Первоочередная задача в гражданском ракетостроении — разработка полностью многоразовой одноступенчатой ракеты-носителя вертикального взлёта и посадки с применением отечественных многослойных композиционных материалов. Такая ракета-носитель будет способна не только выводить полезную нагрузку в космос, но и возвращать с орбиты отработавшие и вышедшие из строя космические аппараты.

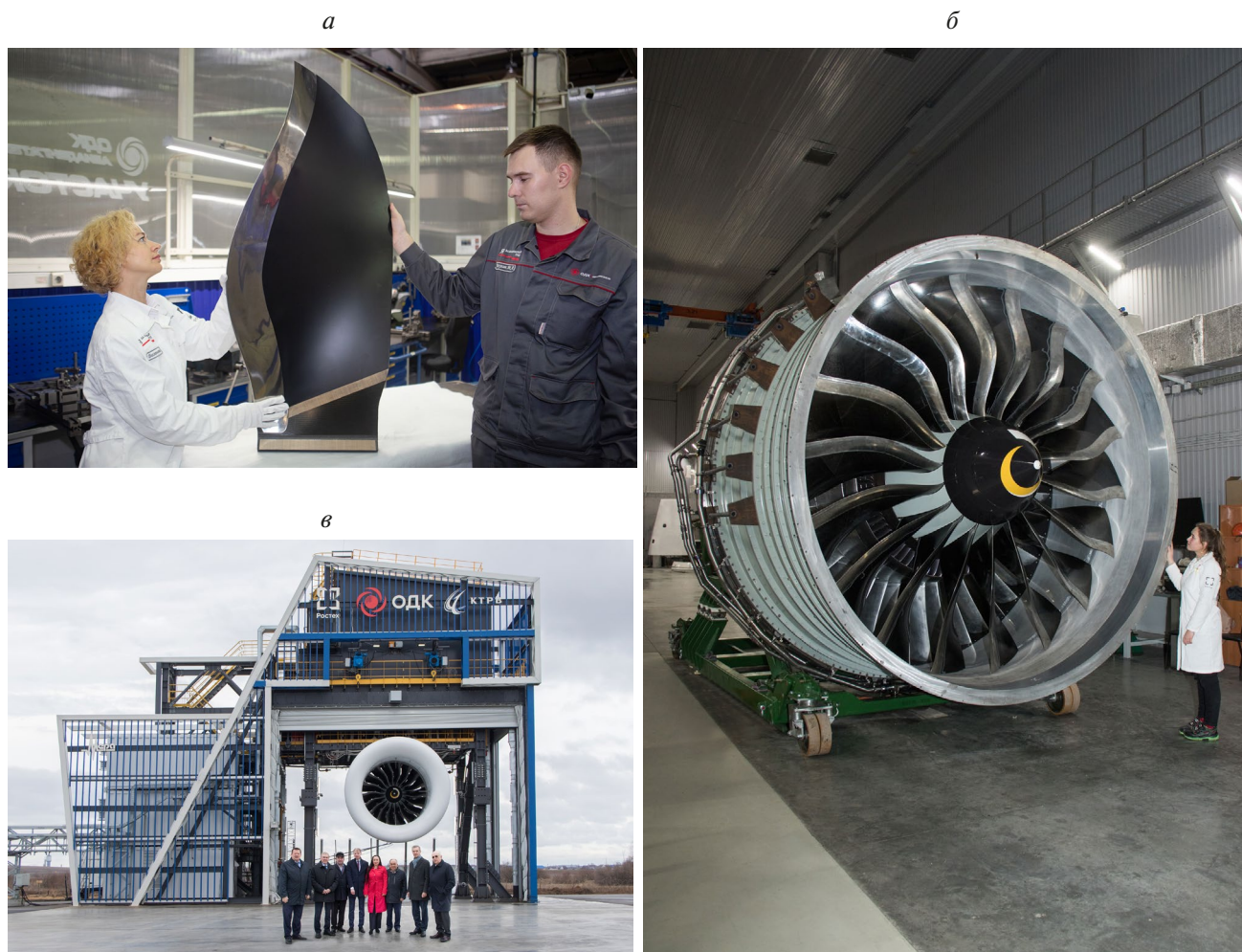


Рис. 2. Сборка и подготовка к испытаниям двигателя-демонстратора технологий ПД-35:

а — рабочая лопатка вентилятора из полимерных композиционных материалов, б — двигатель-демонстратор полностью собран, в — двигатель-демонстратор подготовлен к испытаниям

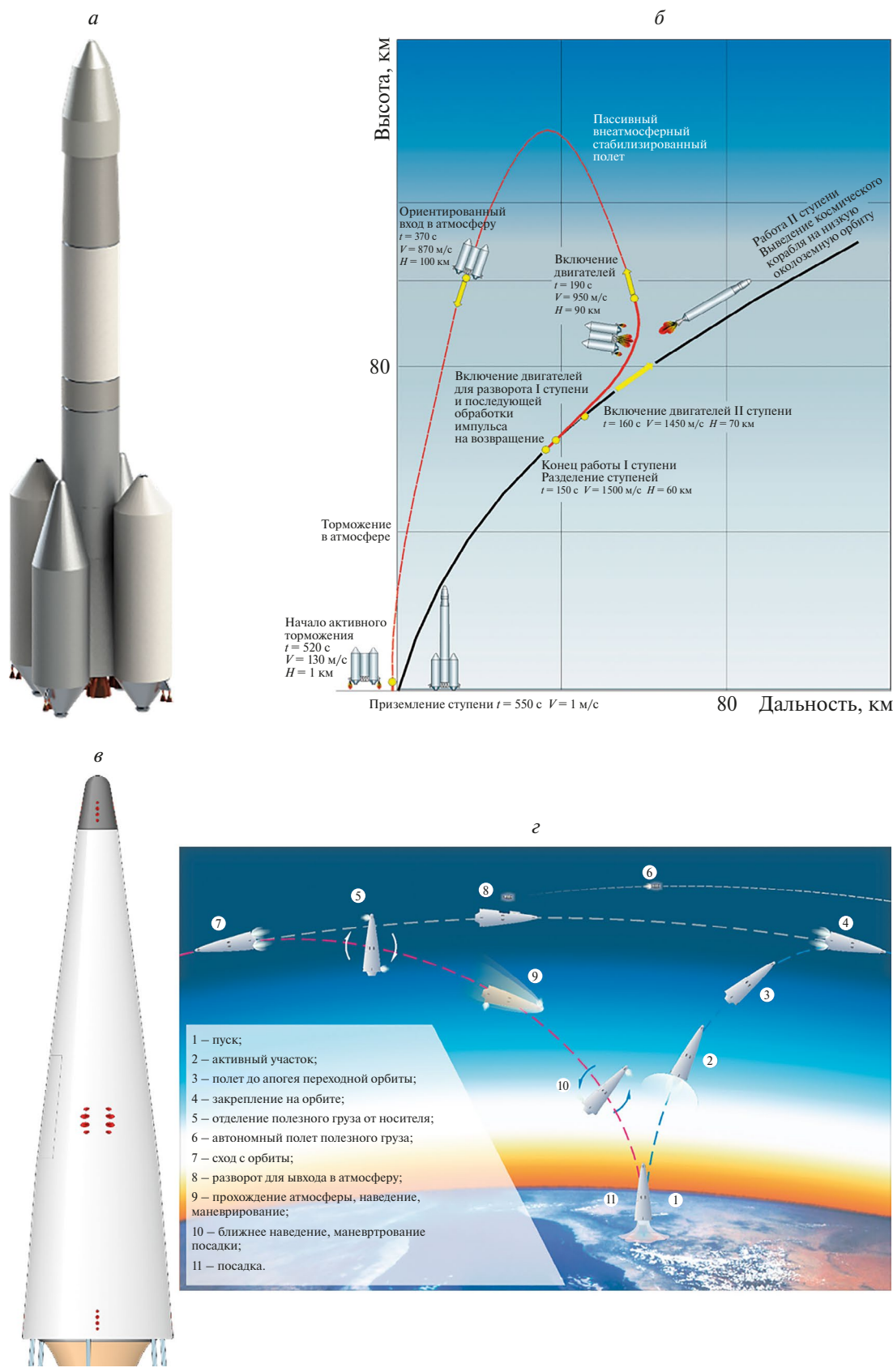


Рис. 3. Разработки многоразовых ракетно-космических систем АО “ГРЦ Макеева”: внешний вид (а) и схема полёта первой ступени (б) ракеты-носителя “Россиянка”; внешний вид (в) и схема полёта (з) ракеты-носителя КОРОНА

В АО “ГРЦ Макеева” формируется проектный облик многоразовых ракетно-конструкторских систем. Подготовлен проектный задел по ракете-носителю “Россиянка” с многоразовой возвращаемой первой ступенью (рис. 3 а, б), в которой в качестве топлива используются жидкий кислород и сжиженный природный газ [7]. Получены патенты на “Способ возвращения на космодром многоразовой первой ступени ракеты” [8] и “Способ использования многоразовой первой ступени ракеты-носителя” [9]. Здесь же ведутся проектно-конструкторские проработки полностью многоразовой одноступенчатой ракеты-носителя вертикального взлёта и посадки КОРОНА (рис. 3 в, г) [10]. Результаты защищены патентом [11].

Для достижения проектных параметров ракет-носителей нового поколения и перспективных ракетно-космических систем, как частично, так и полностью многоразовых, требуется комплексное развитие наукоёмких технологий в различных отраслях отечественной промышленности. Одна из таких критических технологий, необходимых для достижения совершенства конструкций по массе, уменьшения трудоёмкости изготовления и металлоёмкости конструкций, — создание баков большого диаметра из многослойных композиционных материалов.

За рубежом активно применяют полимерные композиционные материалы (ПКМ), например, в виде углеродной ленты в материале криогенных топливных баков ракет-носителей тяжёлого и сверхтяжёлого классов Falcon 9 FT, Falcon Heavy, Delta IV Heavy (США), Chang Zheng 9 (КНР), ARIANE-6 (Европейский союз), H3 Heavy (Япония), HLV и SHLV (Индия). Это даёт существенную экономию по весу и стоимости конструкций. Помимо NASA аналогичные разработки ПКМ ведутся в SpaceX, а также в Немецком авиакосмическом центре (DLR).

В российской ракетно-космической отрасли первая и пока единственная попытка изготовить криогенные топливные баки из ПКМ без металлического лайнера (тонкостенного стакана) была предпринята в 2006–2008 гг. в АО “ГКНПЦ имени М.В. Хруничева”. В 2020–2021 гг. в АО “ЦНИИ-маш” проводились научные исследования по этой же тематике. В АО “ГРЦ Макеева” в рамках работ по созданию многоразовой одноступенчатой ракеты-носителя вертикального взлёта и посадки предложена конструкция бака с многослойной стенкой для криогенных компонентов топлива. Основным материал стенки — углепластик, позволяющий избежать температурных деформаций и обеспечить термостабильность размеров элементов конструкций бака при высоких перепадах температуры. В составе стенки предусмотрены слои внутренней теплоизоляции, герметизирующий слой, силовые элементы и внешний слой теплозащитного покрытия. В рамках проекта Уральского межрегионального научно-образовательного центра с участием

Южно-Уральского государственного университета как научного партнёра разработан и изготовлен демонстратор технологии изготовления стенки криогенного бака, проведены статические испытания на прочность до и после криогенного воздействия на конструкцию демонстратора, оценена проницаемость материала.

В 2023 г. АО “ГРЦ Макеева” определён головным исполнителем НИР в рамках государственного контракта по подтверждению ключевых технологий создания многоразовой одноступенчатой ракеты-носителя вертикального взлёта и посадки. Одна из ключевых — технология производства баков большого диаметра для криогенных компонентов топлива из углепластика в виде нитей, сот, гофр. Стенка изделия обеспечивает при штатной эксплуатации температуру в баках жидкого кислорода от 80 до 95 К, жидкого водорода от 14.5 до 20 К, заправку баков при температурах, соответственно, 80 К и 14.5 К.

Ёмкости для криогенных компонентов даже при существующем уровне развития композиционных технологий могут быть востребованы в таких отраслях отечественной промышленности, как газовая и нефтяная, а также в медицине, доставке криогенных компонентов (жидкие кислород и водород). Однако широкое внедрение технологий производства ёмкостей из полимерных композиционных материалов требует масштабирования и кратного увеличения выпуска углеродного волокна, что возможно только при государственной поддержке и выделении этого направления в отдельную государственную программу.

КЕРАМИЧЕСКИЕ ПОКРЫТИЯ С УНИКАЛЬНЫМИ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Для обеспечения технологического суверенитета в машиностроении и металлургии первоочередной интерес вызывают методы, реализующие новые научные принципы и поэтому позволяющие ожидать действительно прорывных результатов. К ним можно отнести впервые разработанный метод нанесения на металлические подложки керамических покрытий, обладающих высокой твёрдостью (до 43 ГПа) и адгезионной прочностью соединения со сталями, никелевыми, титановыми и другими сплавами [12]. Этот метод позволяет также добиваться сверхнизкого коэффициента трения скольжения деталей, работающих в условиях ограниченной смазки или в её отсутствии [12, 13]. Для нанесения керамических покрытий используется способ высокоскоростного лазерного плавления дисперсных порошков лучом лазера с наносекундными импульсами. Высокоскоростной нагрев поверхности до 3500°C обеспечивает расплавление и смешивание практически любых материалов. При последующем интенсивном охлаждении за

счёт сверхвысоких скоростей затвердевания расплавов возникают сильнонеравновесные, аморфные состояния и пересыщенные твёрдые растворы, обеспечивающие материалам новые свойства.

Уникальное сочетание триботехнических и прочностных характеристик получено на образцах с керамическими покрытиями состава B_4C -BN-MgO- Li_2O [12]. В результате высокочастотной короткоимпульсной лазерной обработки формируется аморфное керамическое покрытие с нанодисперсными включениями, состоящее в основном из карбидов и нитридов бора. Хорошее сцепление таких покрытий с металлами объясняется формированием новых фаз на границе керамика–подложка в результате лазерной обработки [14]. Благодаря высокой скорости охлаждения, развиваемой из-за локальности короткоимпульсного лазерного воздействия, формируемый керамический слой хорошо смачивает металлическую поверхность, имеет высокую сплошность и низкую шероховатость. Максимальная микротвёрдость этих керамических покрытий, достигающая 43 ГПа, что соответствует почти половине твёрдости алмаза, зафиксирована для состава карбид бора B_4C – 50% нитрида бора BN, нанесённого на никелевую подложку.

Для высокотемпературных применений способом высокоскоростного лазерного плавления получены керамические покрытия на основе нитридов и боридов циркония (с возможным добавлением карбида кремния SiC) с жаростойкостью до 1050°C.

В целях улучшения эксплуатационных свойств покрытий при трении скольжения разработаны составы с добавлением оксидов металлов [14]. В этом случае снижение коэффициента трения достигается за счёт образования на трущихся поверхностях специального третьего тела, которое обеспечивает лёгкое скольжение даже при температурах до 500°C и высоких контактных напряжениях. Добавление оксида лития в состав покрытия позволяет резко снизить коэффициент трения скольжения без смазки, достигнуть рекордного значения 0.03 даже при малых нагрузках и температурах в зоне контакта [12].

Уникальные триботехнические результаты получены также благодаря легированию поверхности стали висмутом. Висмут, несмотря на то, что не смешивается с железом или медью даже в жидком состоянии, может быть диспергирован и внедрён в сталь с помощью короткоимпульсной лазерной обработки, при этом достигается крайне неравновесное состояние вещества [15, 16]. На рисунке 4 а показано поперечное сечение вала, легированного висмутом после лазерной обработки и алмазной притирки. Висмут появляется в стали в виде наноразмерных включений частиц металла и оксидов (рис. 4 б). Стальные валы, легированные висмутом, демонстрируют превосходную износостойкость и устойчивость к трению при отсутствии смазки и имеют сверхнизкий коэффициент

трения. Переход к сверхнизкому трению происходит по двойному механизму: за счёт устранения адгезии между телами скольжения (не происходит сцепления трущихся поверхностей) и образования в результате химических реакций особых поверхностных слоёв, которые обеспечивают лёгкое скольжение при трении без смазки. В отличие от всех известных твёрдых смазок на основе дисульфида молибдена MoS_2 , графита и тефлона, валы из легированной висмутом стали сохраняют эффективность даже в условиях скольжения при очень высоких нагрузках, линейных скоростях и скоростях вращения, например, в турбинах.

Для подтверждения полученных характеристик покрытий проводили испытания турбокомпрессоров двигателя внутреннего сгорания с узлом трения “стальной вал – бронзовая втулка” [15]. Турбокомпрессор со стандартным валом (без легирования висмутом) быстро вышел из строя уже после пяти циклов испытаний в условиях граничной смазки, что привело к значительному увеличению вибрации вала. При этом на его поверхности образовались сильные повреждения в местах контакта с бронзовыми втулками, а также следы адгезионного переноса бронзы (рис. 4 в).

Испытания турбокомпрессора с валом из стали, легированной висмутом, показали возможность его длительной бесперебойной работы без смазки при скорости вращения 75 000 об/мин (линейная скорость скольжения около 32 м/с). На поверхности легированного вала даже после 500 циклов испытаний без капли смазки не выявлено каких-либо повреждений и переноса бронзы (рис. 4 г). Таким образом, легирование висмутом исключает адгезию и массоперенос между телами скольжения, обеспечивая выдающиеся антифрикционные свойства и долговременную надёжность при скольжении на высоких линейных скоростях без смазки [15].

Разработанная технология нанесения керамических сверхтвёрдых покрытий со сверхнизким коэффициентом сухого трения скольжения, основанная на новых научных принципах и обеспечивающая прорывной результат в виде многократного улучшения свойств материалов, находит применение в машиностроении, нефтегазовой и электронной промышленности. Так, период стойкости инструмента (стальных валцов) для горячей обработки давлением металлических и керамических материалов для электронной промышленности увеличивается с нескольких дней до нескольких месяцев. При нанесении сверхтвёрдого керамического покрытия термостойкость детали клапана двигателя внутреннего сгорания сохраняется до температуры 1000°C, сопротивление окислительному и абразивному изнашиванию увеличивается на 480%, а срок службы деталей – в 10 раз. Ресурс вала гидромотора при применении технологии высокоскоростного лазерного плавления вырос на 30%, стойкость пуансонов для изготовления

полимерных трубопроводов – в 100 раз, а производительность процесса – почти наполовину.

Новая технология может быть модифицирована под потребности отраслей машиностроения, авиа-

ции и космоса. Инновационный метод обработки пар трения отличается экономичностью, простотой, надёжностью и подходит для массового производства [16].

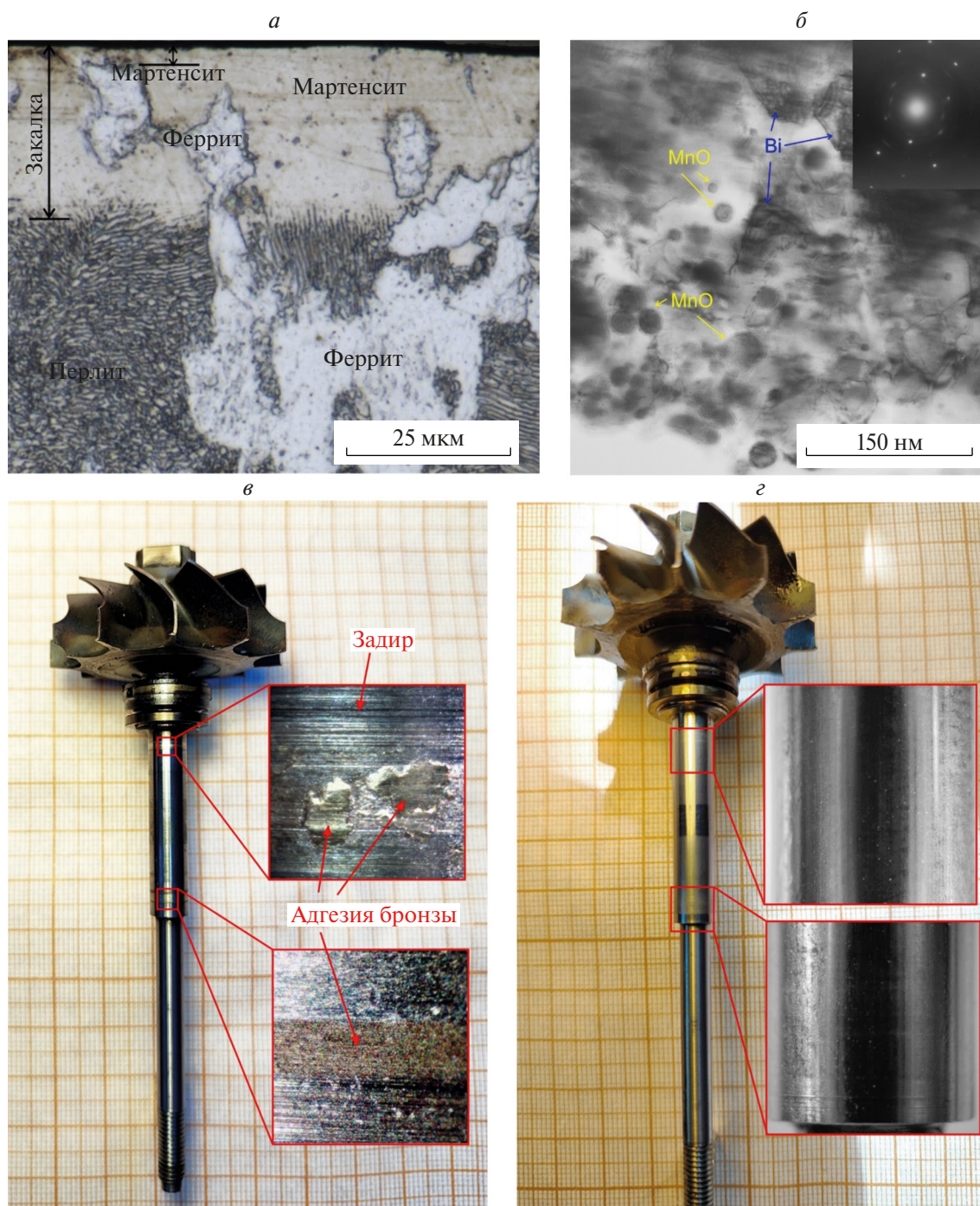


Рис. 4. Поверхностные покрытия нового поколения:

a – структура поперечного сечения поверхностного слоя стального вала, легированного висмутом, после лазерной обработки и алмазной притирки; *б* – просвечивающая электронная микроскопия и электронограмма (на вставке) микроструктуры вблизи поверхности вала; *в* – стальной вал турбокомпрессора в состоянии поставки после испытаний на трение скольжения с граничной смазкой при 75 000 об/мин в течение 5 циклов; *г* – стальной вал турбокомпрессора, легированный висмутом, после испытаний на трение скольжения без смазки при 75 000 об/мин в течение 500 циклов

ИННОВАЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ОБОРУДОВАНИЯ НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКИ СТАЛИ

Основным технологическим узлом машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) служит кристаллизатор (рис. 5 а). Для обеспечения качества поверхности слитков и уменьшения его износа при эксплуатации стенок (плит) из медных сплавов на их рабочую поверхность наносят защитные покрытия [17]. Доля импортозависимости в применении стенок с защитными покрытиями в 2012 г. составляла 97%, что критично для национальной безопасности. В 2022 г. с российского рынка ушли производители и поставщики плит кристаллизаторов из Германии, Италии и Японии. Следует учитывать, что импортные гальванические защитные покрытия на основе никеля и его сплавов как распространённый способ защиты рабочей поверхности медных плит кристаллизаторов не лишены серьёзных недостатков: в их числе низкая стойкость и неэкологичность, к тому же они не способны обеспечить требуемый уровень свойств для современных МНЛЗ.

В России объединёнными усилиями специалистов Института физики металлов УрО РАН, Ин-

ститута машиноведения УрО РАН, Уральского федерального университета, АО «НПП “Машпром”» и металлургических предприятий разработана и внедрена в промышленность инновационная технология восстановительного ремонта и производства новых стенок кристаллизаторов МНЛЗ с износостойкими композиционными покрытиями [17, 18]. При этом был решён комплекс важных задач.

1. Разработаны металлокерамические порошковые смеси для износостойких покрытий на основе порошков системы легирования $Ni-Cr$ с введением в состав карбидных (WC , Cr_3C_2 , SiC , TiC), боридных (CrB_2 , TiB_2) и металлических (Cr , Mo) соединений. Предложена уникальная технология роботизированного сверхзвукового газозвукового напыления покрытий (рис. 5 б) на водоохлаждаемые широкие и узкие стенки кристаллизатора (рис. 5 в, г).

2. Научно обоснована наибольшая эффективность применения композиционных покрытий с крупными упрочняющими фазами [19].

3. Разработана технология термической обработки, обеспечивающая упрочнение медного сплава, улучшение адгезии покрытия с медной основой и повышение тепло- и износостойкости покрытия

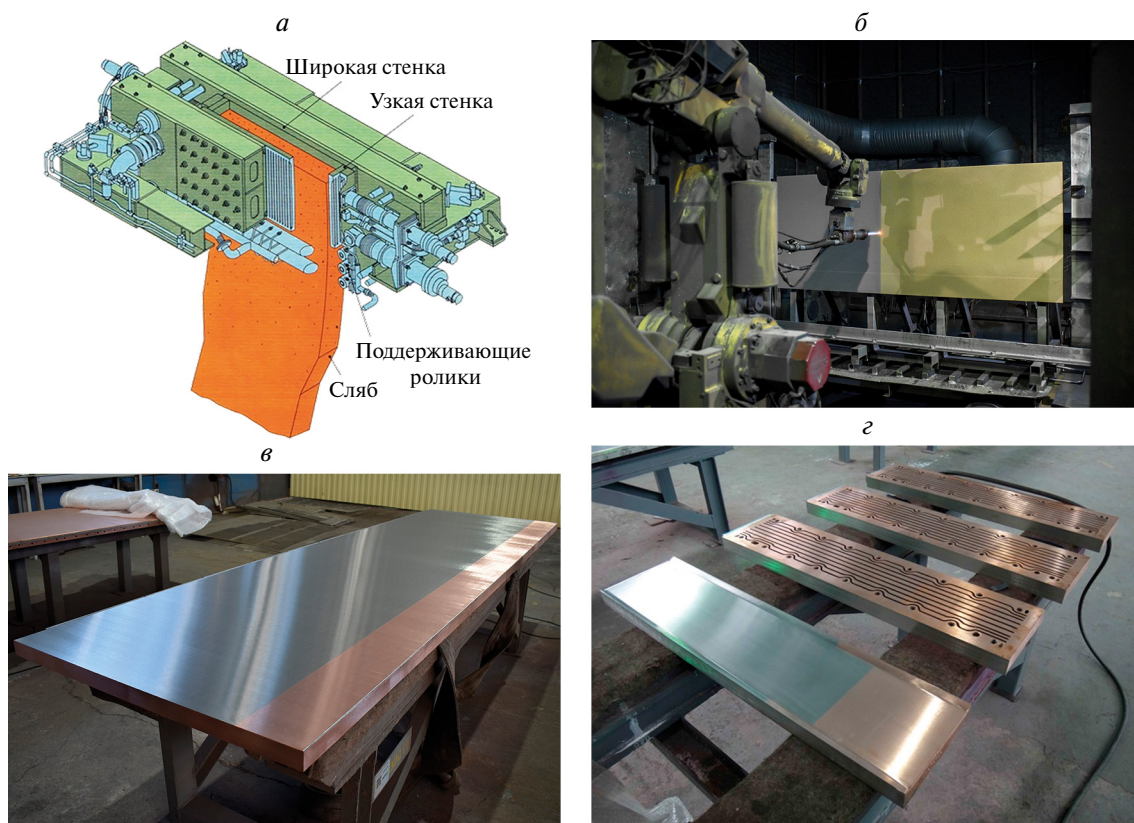


Рис. 5. Инновационная технология восстановительного ремонта и производства новых стенок кристаллизаторов машин непрерывного литья заготовок: конструкция кристаллизатора слябовой МНЛЗ (а); процесс роботизированного сверхзвукового газозвукового напыления покрытий (б); широкая (в) и узкие (г) стенки кристаллизатора с напылённым защитным покрытием и водоохлаждаемыми каналами

в результате формирования при отжиге износостойкого каркаса из крупных карбидных и боридных частиц [20–23].

Предлагаемые композиционные покрытия обладают высокими адгезионными, антикоррозионными и триботехническими характеристиками. В ходе промышленных испытаний на металлургических предприятиях установлено, что разработанные кристаллизаторы по надёжности и ресурсу превосходят показатели аналогов от зарубежных производителей в 4–20 раз с повышением качества получаемых непрерывнолитых заготовок. Стойкость композиционных покрытий против изнашивания достигает 700 тыс. т разливаемой стали на одном межремонтном цикле [24]. Экологичность, энерго- и ресурсоэффективность производства кристаллизаторов, реализованного НПП “Машпром” в г. Нижний Тагил [17], существенно превосходит соответствующие показатели гальванического производства зарубежных компаний. Благодаря внедрению технологии на основных металлургических предприятиях России доля отечественной продукции в применении слябовых кристаллизаторов с защитным покрытием увеличена с 3% в 2012 г. до 60% к концу 2023 г., что превышает показатель, заданный Планом мероприятий по импортозамещению в отрасли тяжёлого машиностроения Российской Федерации на период до 2024 г.

С целью продления ресурса и удешевления расходных компонентов МНЛЗ рассмотрены пути решения актуальной задачи восстановления медных плит слябовых кристаллизаторов после достижения ими минимально допустимой толщины в результате эксплуатации и ремонтов. Обоснованы преимущества восстановления плит кристаллизаторов из хромоциркониевой бронзы современным экологичным способом многопроходной плоскостной сварки трением с перемешиванием при наложении на восстанавливаемую плиту присадочной пластины из этого же материала (рис. 6 а) [24, 25].

Серией последовательных проходов вращающимся коническим инструментом из жаропрочного сплава ЖС6К (рис. 6 б) достигается однослойное или двухслойное сварное соединение (восстановленный слой бронзы толщиной соответственно ~5 и ~10 мм) (рис. 6 в) без разрывов, трещин, пор (рис. 6 г). При послойном нанесении бронзы с использованием аддитивной технологии на основе сварки трением с перемешиванием получение слоя большой толщины не требует массивного сварочного инструмента и мощного сварочного оборудования [25]. Прогрессивный способ сварки наряду с экономической эффективностью обеспечит несомненные экологические преимущества, поскольку уменьшится потребность во вредном металлургическом производстве новых плит кристаллизаторов из медных сплавов [24].

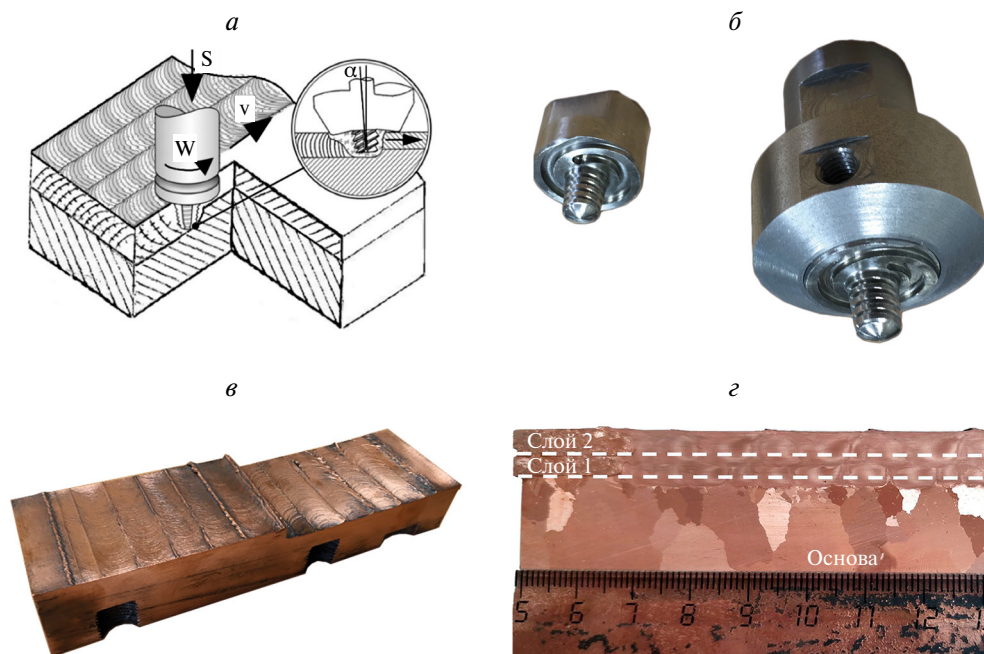


Рис. 6. Инновационная технология восстановительного ремонта стенок (плит) кристаллизаторов машин непрерывного литья заготовок способом плоскостной сварки трением с перемешиванием (СТП):

а — схема процесса плоскостной СТП: S — нагрузка; W — скорость вращения инструмента, об/мин; V — скорость сварки, мм/мин; α — угол наклона, град; б — внешний вид сварочного инструмента из жаропрочного сплава без оправки и в оправке; в — фрагмент плиты из хромоциркониевой бронзы, восстановленной одним слоем толщиной 5 мм (справа) и двумя слоями (слева) бронзы; г — макроструктура восстановленных слоёв и основы плиты в поперечном сечении

Разработаны и реализованы инновационные кристаллизаторы с износостойкими композиционными покрытиями для всех типов МНЛЗ в производстве слывов толщиной от 90 до 400 мм со скоростями разлива 0.6–5.0 м/мин, применяемых в судостроительной, нефтегазовой, строительной и оборонной отраслях промышленности. Новые технологии внедрены на крупнейших металлургических комбинатах Российской Федерации [17]. Отливаемые слывы используются в получении толстого листа для труб большого диаметра, в том числе по заказам Газпрома и Транснефти для газопроводов “Турецкий поток”, “Южный коридор”, “Сила Сибири” и других. Суммарный экономический эффект за 2019–2023 гг. превысил 30 млрд руб.

Перспективы направления связаны с разработкой технологии лазерной наплавки композиционных износостойких покрытий на медные плиты. Это позволит решить актуальную задачу снижения себестоимости процесса нанесения покрытия за счёт повышения производительности и коэффициента использования порошка до 95–97%, улучшит адгезию покрытия с медной основой, качество покрытий и их свойства, а также расширит применение тугоплавких материалов. Однако активный переход на современные лазерные технологии ограничивается низким коэффициентом поглощения бронзой (~10%) излучения мощных технологических лазеров с длиной волны $\lambda=1064$ нм. Скачкообразный рост коэффициента поглощения до 50–55% наблюдается для лазерного излучения видимого диапазона (“зелёный” лазер с $\lambda=515$ нм и “синий” лазер с $\lambda=450$ нм) [26]. Эти факторы определяют потребность в развитии производства в России ультракоротковолновых технологических лазеров.

* * *

Перспективные базовые наукоёмкие технологии невозможно купить, их можно только создать и развивать. Технологический суверенитет и комплексная безопасность государства определяются степенью технологической независимости объектов его критической инфраструктуры и способностью самостоятельно создавать и выпускать высокотехнологичную продукцию, необходимую для достижения стратегических целей развития. Ещё раз подчеркнём: всё это невозможно без серьёзного научного задела и использования перспективных научных разработок, что определяет возрастающую координирующую роль РАН и потребность в укреплении кооперации научных организаций и предприятий реального сектора экономики Российской Федерации.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследования, представленные в разделе “Керамические покрытия с уникальными триботехническими характеристиками”, выполнены при финансовой

поддержке Российского научного фонда (проект № 19-79-20012). Исследования, представленные в разделе “Инновационные материалы и технологии для оборудования непрерывной разливки стали”, проведены в рамках государственного задания Минобрнауки России (тема “Структура”, № 122021000033-2) и комплексного проекта “Разработка новых материалов и технологий для формирования покрытий, стойких в условиях абразивного и коррозионного изнашивания” Уральского межрегионального научно-образовательного центра мирового уровня “Передовые производственные технологии и материалы” [27].

ЛИТЕРАТУРА

1. *Каблов Е.Н., Антипов В.В.* Роль материалов нового поколения в обеспечении технологического суверенитета Российской Федерации // Вестник РАН. 2023. Т. 93. № 10. С. 907–916.
Kablov E.N., Antipov V.V. The role of new generation materials in ensuring the technological sovereignty of the Russian Federation // Herald of the Russian Academy of Sciences. 2023. V. 93. № 10. P. 907–916. (In Russ.)
2. *Гончаров Б.Э., Сипатов А.М., Черкашнев Н.Н. и др.* Исследование высокотемпературной термостойкости антиокислительного покрытия для керамического композиционного материала с многослойной структурой // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 4(65). С. 51–58.
Goncharov B.E., Sipatov A.M., Cherkashneva N.N. et al. Studies of thermal shock resistance of an anti-oxidation coating for a multi-layered ceramic composite // Aviation Materials and Technologies. 2021. V. 65. № 4. P. 51–58. (In Russ.)
3. *Мулюков Р.Р., Иноземцев А.А., Чинейкин С.В. и др.* Патент РФ № 2777775. Интерметаллидный сплав на основе γ -TiAl фазы для изготовления лопаток турбины низкого давления газотурбинного двигателя и способ изготовления заготовки лопатки из интерметаллидного сплава на основе γ -TiAl фазы // Бюл. № 22. Оpubл. 09.08.2022.
Mulyukov R.R., Inozemtsev A.A., Chinejkin S.V. et al. RF Patent No. 2777775. Intermetallic alloy based on the γ -TiAl phase for the manufacture of a low-pressure turbine blade of a gas turbine engine and a method for manufacturing a blade blank from an intermetallic alloy based on the γ -TiAl phase // BIMP. № 22. Publ. 09.08.2022.
4. *Бойко А.В., Демьянко К.В., Иноземцев А.А. и др.* Определение положения ламинарно-турбулентного перехода при численном моделировании обтекания пластины дозвуковыми и транзвуковыми потоками // Теплофизика и аэромеханика. 2019. Т. 26. № 5. С. 675–683.
Boiko A.V., Demyanko K.V., Inozemtsev A.A. et al. Determination of the laminar-turbulent transition location in numerical simulations of subsonic and

- transonic flows past a flat plate // Thermophysics and Aeromechanics. 2019. V. 26. № 5. P. 629–637. (In Russ.)
5. Boiko A.V., Demyanko K.V., Kirilovskiy S.V. et al. Modeling of transonic transitional three-dimensional flows for aerodynamic applications // AIAA Journal. 2021. V. 59. Is. 9. P. 3598–3610.
 6. Прохоров А.Е., Вишников А.Н., Гачегова Е.А., Плехов О.А. Использование метода лазерной ударной проковки в целях увеличения усталостного ресурса металлических материалов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2022. Т. 88. № 1(1). С. 92–97.
Prokhorov A.E., Vshivkov A.N., Gachegova E.A., Plekhov O.A. Experimental implementation of the laser shock peening method aimed at an increase in the fatigue properties of metals. Industrial laboratory // Industrial Laboratory. Diagnostics of materials. 2022. V. 88. № 1(1). P. 92–97.
 7. Из морских глубин — в глубины космоса / Под общ. ред. В.Г. Дегтяря. Миасс: ГРЦ Макеева, 2011.
From Deep Sea to Outer Space / Under general editorship of Degtyar V.G. Miass: JSC Makeyev Design Bureau, 2011.
 8. Дегтярь В.Г., Данилкин В.А., Телицын Ю.С. и др. Патент РФ № 2309089. Способ возвращения на космодром многоразовой первой ступени ракеты // Бюл. № 30. Оpubл. 27.10.2007.
Degtyar V.G., Danilkin V.A., Telitsyn Ju.S. et al. RF Patent No. 2309089. Method of return of non-expendable first stage of rocket to cosmodrome // BIMP. № 30. Publ. 27.10.2007. (In Russ.)
 9. Дегтярь В.Г., Калашников В.Н., Мочалов Е.Н., Слета А.В. Патент РФ № 2678616. Способ использования многоразовой первой ступени ракеты-носителя // Бюл. № 4. Оpubл. 30.01.2019.
Degtyar V.G., Kalashnikov V.N., Mochalov E.N., Sleta A.V. RF Patent No. 2678616. Method of using the reusable first stage of a launch vehicle // BIMP. № 4. Publ. 30.01.2019. (In Russ.)
 10. Дегтярь В.Г., Вавилин А.В., Маханьков С.А., Молчанов С.Ф. Вопросы создания многоразовой одноступенчатой ракеты-носителя КОРОНА. Продолжение работ. XLIV академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных учёных — пионеров освоения космического пространства: сборник тезисов. Москва 28–31 января 2020 года: в 2 т. Т. 1. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020. С. 46–48.
Degtiar V.G., Vavilin A.V., Makhankov S.A., Molchanov S.F. On the development of a reusable one-stage KORONA launch vehicle. Continuation of works. — Abstracts of XLIV Academic Space Conference dedicated to the memory of academician S.P. Korolev and other outstanding national scientists — pioneers of space exploration. Moscow January 28–31, 2020: in 2 vol. V. 1. М.: Publishing house of Bauman MSTU, 2020. P. 46–48. (In Russ.)
 11. Вавилин А.В., Усолкин Ю.Ю., Фетисов В.А. Патент РФ № 2309088. Одноступенчатая многоразовая ракета-носитель вертикального взлёта и посадки // Бюл. № 30. Оpubл. 27.10.2007.
Vavilin A.V., Usolkin Yu.Yu., Fetisov V.A. RF Patent No. 2309088. Non-expendable single-stage vertical takeoff and landing launch vehicle // BIMP. № 30. Publ. 27.10.2007. (In Russ.)
 12. Kharanzhevskiy E., Ipatov A., Krivilyov M. et al. Ultralow friction behaviour of B₄C-BN-MeO composite ceramic coatings deposited on steel // Surface and Coatings Technology. 2020. V. 390. P. 125664.
 13. Kharanzhevskiy E.V., Ipatov A.G., Makarov A.V. et al. Tribological performance of boron-based superhard coatings sliding against different materials // Wear. 2021. V. 477. P. 203835.
 14. Kharanzhevskiy E.V., Ipatov A.G., Makarov A.V. et al. Effect of oxygen in surface layers formed during sliding wear of Ni–ZrO₂ coatings // Surface and Coatings Technology. 2022. V. 434. P. 128174.
 15. Kharanzhevskiy E.V., Ipatov A.G., Makarov A.V., Gil'mutdinov F.Z. Towards eliminating friction and wear in plain bearings operating without lubrication // Scientific Reports. 2023. V. 13. P. 17362.
 16. Понизовкина Е. Износа не будет. Уральские специалисты близки к прорыву в трибологии // Поиск. 2023. № 48(1798). С. 16.
Ponizovkina E. No wear and tear. Ural specialists are close to a breakthrough in tribology // Poisk. 2023. № 48(1798). P. 16. (In Russ.)
 17. Котельников А.Б., Воннерук А.А., Макаров А.В. и др. Новые материалы и технологии существенного повышения износостойкости рабочей поверхности металлургического оборудования // Тяжёлое машиностроение. 2018. № 9. С. 14–20.
Kotelnikov A.B., Vopneruk A.A., Makarov A.V. et al. New materials and technologies for significantly increase the wear resistance of the working surface of metallurgical equipment // Heavy engineering. 2018. V. 9. P. 14–20. (In Russ.)
 18. Кушнарев А.В., Киричков А.А., Воннерук А.А. и др. Физико-механические характеристики газотермических покрытий стенок кристаллизатора машин непрерывного литья заготовок // Сварка и диагностика. 2017. № 5. С. 50–53.
Kushnarev A.V., Kirichkov A.A., Vopneruk A.A. et al. Physico-mechanical characteristics of thermal spray coatings of the mold copper plates of continuous casting machines // Welding and diagnostics. 2017. V. 5. P. 50–53. (In Russ.)
 19. Макаров А.В., Соболева Н.Н., Малыгина И.Ю. Роль упрочняющих фаз в сопротивлении абразивному изнашиванию NiCrBSi покрытий,

- сформированных лазерной наплавкой // Трение и износ. 2017. Т. 38. № 4. С. 311–318.
- Makarov A.V., Soboleva N.N., Malygina I.Yu.* Role of the strengthening phases in abrasive wear resistance of laser-clad NiCrBSi coatings // Journal of Friction and Wear. 2017. V. 38. № 4. P. 272–278.
20. *Макаров А.В., Соболева Н.Н., Малыгина И.Ю., Осинцева А.Л.* Патент РФ № 2492980. Способ получения теплостойкого покрытия // Бюл. № 26. Оpubл. 20.09.2013.
- Makarov A.V., Soboleva N.N., Malygina I.Ju., Osintseva A.L.* RF Patent No. 2492980. Method of producing heat-resistant coating // ВІМР. №. 26. Publ. 20.09.2013.
21. *Макаров А.В., Соболева Н.Н., Малыгина И.Ю., Осинцева А.Л.* Формирование износостойкого хромоникелевого покрытия с особо высоким уровнем теплостойкости комбинированной лазерно-термической обработкой // Металловедение и термическая обработка металлов. 2015. № 3. С. 39–46.
- Makarov A.V., Soboleva N.N., Malygina I.Yu., Osintseva A.L.* Formation of wear-resistant chromium-nickel coating with extra high thermal stability by combined laser-and-heat treatment // Metal Science and Heat Treatment. 2015. V. 57. № 3–4. P. 161–168.
22. *Makarov A.V., Soboleva N.N., Malygina I.Yu., Kharanzhevskiy E.V.* Improving the properties of a rapidly crystallized NiCrBSi laser clad coating with high-temperature processing // Journal of Crystal Growth. 2019. V. 525. P. 125200.
23. *Makarov A.V., Korobov Yu.S., Soboleva N.N. et al.* Wear-resistant nickel-based laser clad coatings for high-temperature applications // Letters on Materials. 2019. V. 9. No. 4. P. 470–474.
24. *Макаров А.В., Лежнин Н.В., Котельников А.Б. и др.* Восстановление стенок кристаллизаторов машин непрерывного литья заготовок из хромоциркониевой бронзы методом многопроходной сварки трением с перемешиванием // Известия вузов. Цветная металлургия. 2023. Т. 29. № 6. С. 66–83.
- Makarov A.V., Lezhnin N.V., Kotelnikov A.B. et al.* Restoration of continuous casting machine mold copper plates made of Cr-Zr bronze using multi-pass friction stir lap welding // Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy. 2023. V. 29. № 6. P. 66–83. (In Russ.)
25. *Лежнин Н.В., Макаров А.В., Валиуллин А.И. и др.* Применение аддитивной технологии на основе сварки трением с перемешиванием для восстановления исходной геометрии изношенных плит кристаллизаторов МНЛЗ // Тяжёлое машиностроение. 2023. № 11–12. С. 26–33.
- Lezhnin N.V., Makarov A.V., Valiullin A.I. et al.* The use of additive technology based on friction stir welding to restore the original geometry of worn plates of the CCM casting mold // Heavy engineering. 2023. № 11–12. P. 26–33. (In Russ.)
26. *Tang X., Chen X., Sun F. et al.* The current state of CuCrZr and CuCrNb alloys manufactured by additive manufacturing: A review // Materials & Design. 2022. V. 224. P. 111419.
27. О работе Уральского отделения РАН в 2022 году. Выступление председателя Уральского отделения РАН академика РАН В.Н. Руденко // Вестник РАН. 2023. Т. 93. № 8. С. 752–757.
- On the activities of the Ural branch of the Russian Academy of Sciences in 2022. Speech by the chairman of the Ural branch of the RAS, RAS academician V.N. Rudenko // Herald of the Russian Academy of Sciences. 2023. V. 93. № 8. P. 752–757. (In Russ.)

ENSURING OF TECHNOLOGICAL SOVEREIGNTY OF RUSSIA IN METALLURGY AND MACHINE BUILDING

A.V. Makarov^{a,*}, A.A. Inozemtsev^{b,}, V.G. Degtyar^{c,***}, E.V. Kharanzhevskiy^{d,****},
A.B. Kotelnikov^{e,*****}, A.A. Vopneruk^{e,*****}**

^a*M.N. Mikheev Institute of Metal Physics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia*

^b*UEC-Aviadvigatel JSC, Perm, Russia*

^c*JSC Makeyev Design Bureau, Miass, Russia*

^d*Udmurt State University, Izhevsk, Russia*

^e*R&D Enterprise "Mashprom", JSC, Yekaterinburg, Russia*

^{*}*E-mail: avm@imp.uran.ru*

^{**}*E-mail: office@avid.ru*

^{***}*E-mail: src@makeyev.ru*

^{****}*E-mail: eh@udsu.ru*

^{*****}*E-mail: kab@mprom.biz*

^{*****}*E-mail: rp.mmp@mprom.biz*

The article presents the results of the implementation of three strategically important programs for the creation of aircraft gas turbine engines of the new generation PD-14, PD-8 and PD-35 for the purpose of solving the issue of ensuring the technological sovereignty of the Russian Federation in civil aircraft engine manufacturing. Considered are developments which are priority for civil rocket engineering, namely: launch vehicle with a reusable returnable first stage and a fully reusable single-stage launch vehicle for vertical take-off and landing made using multilayer composite materials. Provided are new technologies for implementation by short-pulse laser fusion of ceramic coatings based on boron carbide with microhardness up to 43 GPa and bismuth-alloyed surface layers of steel with unique tribotechnical characteristics: excellent wear resistance and ultra-low dry friction coefficient (up to 0.03). To ensure technological sovereignty in metallurgy, presented are Russian innovative technologies for the repair and production of new mold copper plates of continuous casting machines with wear-resistant composite coatings and recovering of the thickness of copper plates by multipass friction stir lap welding.

Keywords: aircraft gas turbine engine, fan blades, engine nacelle, fuel burning, reusable launch vehicle, polymer composite materials, carbon-fiber-reinforced polymers, ceramic coatings, boron carbide, metal oxides, ultra-low friction coefficient, mold copper plates, composite coating, friction stir welding.

ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА: ПРИЧИНЫ, ПОСЛЕДСТВИЯ, АКТУАЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ

© 2024 г. В.А. Семенов^{a,b,*}

^aИнститут физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

^bИнститут географии РАН, Москва, Россия

*E-mail: vasesmenov@ifaran.ru

Поступила в редакцию 31.01.2024 г.

После доработки 02.02.2024 г.

Принята к публикации 27.02.2024 г.

Изменение климата — одна из важнейших междисциплинарных проблем XXI столетия, охватывающая экологические, экономические и социальные аспекты устойчивого развития Российской Федерации. В статье рассматриваются основные факторы глобальных изменений климата, их особенности и последствия на территории России. Автор формулирует актуальные задачи науки о климате на ближайшие годы и десятилетия, предлагаются важные шаги по их решению. Статья основана на материалах доклада, представленного автором на Общем собрании РАН 12 декабря 2023 г.

Ключевые слова: изменения климата, причины изменений климата, последствия изменений климата, актуальные задачи климатологии.

DOI: 10.31857/S0869587324030076, EDN: GGRFJR

ГЛОБАЛЬНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА И ИХ ОСОБЕННОСТИ НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ

Климат Земли быстро меняется на протяжении последнего столетия. С начала XX в. глобальная приповерхностная температура воздуха выросла на 1.2°C [1]. При этом над сушей изменения происходят примерно в 2 раза быстрее, чем над океанами, что связано с большей тепловой инерцией океанов и переносом водяного пара с них на континенты [2]. Современные значения глобальной температуры рекордно высоки за как минимум последние 2000 лет согласно данным палереконструкций [3, 4]. Принципиально важно, что наблюдаемые за последние

100 лет темпы роста температуры в несколько раз превышают скорость изменений климата за аналогичные промежутки времени во втором тысячелетии нашей эры. Стоит отметить, что основной прирост температуры пришёлся на последние десятилетия, только за 1976–2020 гг. глобальная температура выросла на 0.8°C [1]. Особенно быстро температура повышалась в Северной полярной области, где за 30 лет (1991–2020) рост среднегодовой температуры составил 2.6°C.

Глобальное потепление сопровождается подъёмом уровня океана (на 20 см с 1901 г.) вследствие термического его расширения и таяния ледников суши. При этом темпы подъёма уровня океана в конце XX в. ускорились почти в 2 раза по сравнению с предшествующими десятилетиями, с начала 1990-х годов уровень поднялся более чем на 9 см [1]. В летний период резко сокращается площадь арктических морских льдов (примерно на 12% за десятилетие на протяжении последних 40 лет) [5]. В результате наблюдаемая в сентябре площадь арктических морских льдов сократилась почти в 2 раза относительно значений конца 1970-х годов, что, по всей видимости, беспрецедентно за последние 400 лет [6]. Значимо уменьшается объём большинства горных ледников [7], растёт температура верхнего слоя многолетней мерзлоты и глубина её



СЕМЕНОВ Владимир Анатольевич — академик РАН, заместитель директора Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН.

сезонного протаивания [8]. Вследствие изменений градиентов температуры и солёности, областей нагрева и охлаждения атмосферы и океана трансформируется характер циркуляции последних.

При потеплении климата увеличивается число экстремальных погодных явлений [9]. Повышение средней приземной температуры воздуха и изменения атмосферной циркуляции приводят к росту частоты и интенсивности волн жары в атмосфере практически во всех регионах планеты, на суше подобные явления сопровождаются засухами и природными пожарами [1, 10]. Увеличивается количество осадков и влагоёмкость атмосферы, что приводит к повышению интенсивности осадков над сушей и в целом к интенсификации гидрологического цикла [11]. Важно, что изменения осадков характеризуются пространственной неоднородностью. Например, вследствие отклика атмосферной циркуляции на потепление осадки растут в средних и высоких широтах Северного полушария и уменьшаются в субтропических регионах. Интенсификация гидрологического цикла, рост влагосодержания атмосферы и снижение статической устойчивости приводят к росту экстремальности осадков во многих регионах с одновременным учащением экстремальных явлений конвективного характера — сильных ливней, шквалов, торнадо [12]. Такие особенности изменений характеристик осадков при глобальном потеплении в целом были выявлены более 20 лет назад на основе анализа данных численных экспериментов с моделями климата [13]. При этом, как показывают недавние исследования, зависимость интенсивности экстремальных осадков от температуры может быть существенно нелинейной [14].

Изменения климата на территории России имеют ряд важных особенностей. Повышение температуры здесь происходит в 2.5 раза быстрее, чем в среднем по планете [1], что связано с эффектом арктического усиления глобального потепления [15]; он вызван наличием положительных обратных связей в климатической системе, усиливающих отклик климата на внешние воздействия в высоких широтах [16]. Огромная протяжённость территории России обуславливает существенные различия тенденций изменений климата в разных регионах, в частности, наблюдаемые разнонаправленные изменения осадков в тёплый период года, когда в северных регионах отмечается тенденция к росту, а в южных — к уменьшению [17].

Высокая изменчивость атмосферной циркуляции в средних и высоких широтах Северного полушария, а также преобладающая континентальность климата России обуславливают большую амплитуду межгодовых вариаций температуры на фоне долгопериодной тенденции к потеплению и, как следствие, низкую предсказуемость погоды и климатических аномалий. Две трети территории страны расположено в зоне “вечной мерзлоты” и в грани-

цах сезонного снежного покрова. Трансформация ландшафтов, заболачивание, быстрое разрушение берегов Российской Арктики при потеплении также относятся к важным особенностям трансформации природной среды нашей страны [18–20].

ПРИЧИНЫ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА

Что является причиной глобальных изменений климата? Решение этой задачи было главным предметом науки об изменении климата во второй половине XX века. Научно обоснованный ответ на этот вопрос специалистам удалось найти в 1970-х годах, когда стал очевиден рост концентрации парниковых газов в атмосфере, прежде всего углекислого газа вследствие сжигания человеком ископаемого топлива. Потепление вызывает так называемый парниковый эффект — способность некоторых газов поглощать инфракрасное излучение земной поверхности и переизлучать его во всех направлениях, в том числе обратно к поверхности, таким образом увеличивая приток энергии к Земле и разогревая её [21]. В это время группой учёных во главе с Сёкиро Манабе с помощью численных экспериментов с моделью общей циркуляции атмосферы были получены первые оценки изменения приземной температуры воздуха при удвоении концентрации углекислого газа в атмосфере¹ [22] (позднее они подтвердились как данными наблюдений, так и результатами более совершенных моделей климата [23, 24]). В те же 1970-е годы выдающийся советский климатолог академик М.И. Будыко получил схожие по величине оценки [25]. Следует отметить, что в 1950–1970-х годах был период, когда вследствие суперпозиции внутренних вариаций климата и потепления, вызванного ростом концентрации парниковых газов, глобальная температура не росла, а в высоких широтах Северного полушария падала. Несмотря на это М.И. Будыко утверждал, что потепление неизбежно продолжится, и оказался прав.

На чём основана уверенность в преобладающем антропогенном характере глобального потепления на масштабе 100 лет? Количество рецензируемых научных работ по тематике изменений климата и смежных дисциплин достигает в настоящее время нескольких десятков тысяч в год. Ввиду важности проблемы, её глобального характера, значительных происходящих и ожидаемых негативных последствий Всемирная метеорологическая организация и ООН в 1988 г. создали Межправительственную группу экспертов по изменению климата (МГЭИК) для обобщения состояния знаний в этой области на основе экспертной оценки исследований по климатической тематике [26]. В группу экспертов входят представители более 100 стран, в том числе и специ-

¹ За эти работы С. Манабе (совместно с немецким физиком и метеорологом К. Хассельманом) был удостоен Нобелевской премии по физике 2021 г.

алисты по климату из России, сотрудники учреждений Росгидромета и РАН. Каждые 5–8 лет МГЭИК публикует доклады, содержащие аналитический обзор рецензируемой научной литературы с итоговыми выводами и резюме для политиков. Аналогичные оценочные доклады об изменении климата начиная с 2008 г. публикует и Росгидромет. В конце 2022 г. обнародован Третий оценочный доклад Росгидромета. Выводы профильных специалистов в области изменений климата однозначны: “Не вызывает сомнений, что разогрев атмосферы, океана и суши произошёл под влиянием человека” [27]. Ситуация, когда человек оказался в состоянии влиять на глобальный климат, беспрецедентна в истории Земли и может означать начало новой эпохи — антропоцена [28].

В качестве аргументов в пользу научных результатов, указывающих на важную роль антропогенного воздействия в глобальном потеплении последних 100 лет, можно указать на следующие факты.

1. Рост почти на 50%, с 280 до 420 частей на миллион (ч.н.м.), содержания углекислого газа в атмосфере вызван именно антропогенными эмиссиями, о чём свидетельствует изменение изотопного состава углерода в атмосфере [29]; углерод в ископаемом топливе содержит очень малое количество тяжёлых изотопов по сравнению с атмосферным “природным” углеродом.

2. Данные о составе атмосферы, полученные на основе анализа замороженных пузырьков воздуха в кернах антарктического ледника на станции “Восток” и в рамках проекта EPICA [30, 31], позволили получить данные о концентрации парниковых газов за последние 800 000 лет. На протяжении восьми ледниковых циклов рост концентрации CO_2 ограничивался диапазоном 170–300 ч.н.м и лишь в последние 100 лет его содержание возросло, как упомянуто выше, с 280 до 420 ч.н.м., что резко отличается от предшествующих вариаций. Современный рост беспрецедентен по своим темпам. Такие изменения за столь короткий срок могут быть объяснены только антропогенным воздействием.

3. Наблюдаемая вертикальная структура отклика температуры атмосферы (рост температуры в тропосфере и её падение в стратосфере и мезосфере) [32] соответствует радиационному воздействию вследствие роста содержания парниковых газов. Другие внешние воздействия, например солнечная или вулканическая активность, потоки тепла из океана или от суши, не приводят к таким контрастным тенденциям вертикального отклика температуры [33].

4. Спутниковые данные (начиная с 2000 г.), позволившие инструментально оценить величину дисбаланса энергии на верхней границе атмосферы вследствие роста концентрации углекислого газа [34], совпали с теоретическими результатами численных моделей, на которых основаны оценки

антропогенного вклада в современные изменения климата и сценарии его изменений в будущем.

5. Модели Земной системы, успешно воссоздающие основные характеристики климата, циркуляцию атмосферы, океана и морских льдов, гидрологический цикл, воспроизводят изменения глобальной температуры в последние 150 лет только при учёте антропогенного воздействия на климат. Без такого воздействия, с учетом влияния только факторов вулканической и солнечной активности, наблюдаемого роста температуры в моделях не происходит [35].

ВРЕМЕННЫЕ МАСШТАБЫ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА

Для понимания причин изменений климата важно учитывать разнообразие временных масштабов климатических изменений, вызванных различными факторами внешнего воздействия и внутренней изменчивости климата. Динамика атмосферы и океана, деятельного слоя суши приводит к квазипериодическим изменениям климата на масштабах от сотен лет до межгодовых вариаций. Глубинная циркуляция океана, динамика ледников, в том числе под воздействием внешних факторов, могут формировать циклы длительностью в тысячи и десятки тысяч лет [36]. Геологические факторы, такие как движение континентов, субдукция и спрединг земной коры, дифференциация мантийного вещества, выветривание пород суши и связанные с этими процессами изменения состава атмосферы и уровня океана, обуславливают трансформации климата на масштабах от нескольких миллионов до миллиардов лет [37]. В ледниковых циклах диапазон изменений глобальной температуры составлял около 10°C , а за последние 500 млн лет размах температурных колебаний составлял $15\text{--}20^\circ\text{C}$. Важно, что эти изменения происходили на масштабах от нескольких тысяч лет до нескольких миллионов лет, тогда как современные изменения произошли за 100 лет — мгновение в геологической истории Земли и очень короткий временной промежуток на масштабах ледниковых циклов.

Некоторые циклы внутренней изменчивости океана и атмосферы проявляются на масштабах от нескольких лет до нескольких десятилетий и могут приводить к заметным изменениям глобальной температуры (на $0.2\text{--}0.5^\circ\text{C}$) [38]. Крупные вулканические извержения в исторический период приводили к отрицательной аномалии температуры поверхности до 0.5°C длительностью 1–2 года. Факторы внутренней изменчивости и естественного внешнего воздействия на климат в период инструментальных наблюдений (последние 150 лет) способны формировать значимые аномалии климата на масштабах от года до нескольких десятков лет. С ростом рассматриваемого периода изменений от 60 лет и больше вклад этих циклов и корот-

ких аномалий в долгопериодный климатический тренд становится малым и определяющую роль начинает играть антропогенное воздействие на климат [39].

ПОСЛЕДСТВИЯ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА И ВОПРОСЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ

В Общем резюме Третьего оценочного доклада Росгидромета указывается: “Проявления изменений климата на территории Российской Федерации характеризуются впечатляющим многообразием и неоднозначностью последствий для природной среды, экономики и населения нашей страны. Для России важен весь комплекс угроз, рисков и возможностей, обусловленных наблюдаемыми и ожидаемыми климатическими изменениями, что вносит специфические особенности в политику Российской Федерации в области климата как на федеральном, так и на региональном уровнях и что в определённой мере отличает нашу страну от большинства стран мира”. Для России изменения климата имеют как негативные, так и позитивные последствия [40].

К числу значимых негативных последствий относятся ущерб от опасных погодно-климатических явлений, участвовавших при глобальном потеплении, — природных пожаров, почвенных засух, маловодности рек в южных регионах России, деградации вечной мерзлоты, связанной с рисками для построенной на многолетнемёрзлых грунтах инфраструктуры [41, 42], выхода климатических характеристик за принятые в строительных нормах диапазоны. Растут риски для тепловой энергетики в летний период из-за увеличения энергопотребления и снижения мощности производства вследствие повышения температуры водяных охладителей. Повышение глобальной температуры усиливает риски негативного влияния этого фактора на здоровье населения, в том числе из-за волн жары и загрязнения атмосферы [43–45]. Следует также иметь в виду, что современная техника и инфраструктура становятся более сложными, требуют тонкой настройки и более чувствительны к климатическим параметрам.

К положительным последствиям можно отнести сокращение площади арктических морских льдов, что облегчит добычу полезных ископаемых на арктическом шельфе и приведёт к увеличению продолжительности безлёдной навигации по Северному морскому пути [46, 47]. Возрастёт объём стока северных рек как источника пресной воды и гидроэнергии, ослабнет холодовой стресс, уменьшится температурный контраст зима–лето, сократится отопительный сезон [1].

При этом важно учитывать, что продолжающееся потепление в будущем может изменить характер ожидаемых последствий. Например, дальнейшее сокращение морских льдов в Арктике и устойчивый

безлёдный режим за пределами российской экономической зоны откроют возможность прохода судов иностранных государств через Северный Ледовитый океан, что может представлять потенциальную угрозу военной, экономической и экологической безопасности России.

Очевидно, что для снижения рисков негативных последствий изменений климата и использования выгод от положительных последствий необходимо своевременно принимать меры адаптации [48, 49], для чего требуется разработка прогнозов возможных будущих изменений климата с оценкой диапазона их неопределённости. Учёт возможных изменений климатических факторов критически важен при планировании устойчивого развития российских регионов на горизонте 10–20 лет и более.

Источником информации о возможных изменениях климата в будущем служат численные модели Земной системы, которых в настоящее время в мире насчитывается около 50. В них используются сценарии изменений антропогенных эмиссий парниковых газов и аэрозолей в атмосферу, которые зависят от темпов роста и характера мировой экономики, увеличения населения Земли, предпринимаемых усилий по снижению антропогенных выбросов. Результаты множества моделей обобщаются и верифицируются в рамках специальных проектов по сравнению моделей и с использованием статистических методов, позволяющих сузить диапазон неопределённости получаемых прогнозов [50]. В Институте вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН активно развивается национальная модель Земной системы, участвующая в международных проектах сравнения моделей климата [51]. В Институте физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН разрабатывается модель Земной системы промежуточной сложности — с её помощью можно проводить численные эксперименты, позволяющие моделировать климатические процессы на временных интервалах в тысячи лет, в том числе с учётом интерактивных биогеохимических процессов [52].

Наиболее реалистичные сценарии антропогенного воздействия приводят к выводу, что к концу XXI в. глобальная температура повысится на 3–5°C, количество осадков над сушей возрастёт на 4–8% относительно современных значений. Важно, что рост глобальной температуры и количества осадков в ближайшие два десятилетия мало зависит от выбранного сценария антропогенной эмиссии и составляет, соответственно, около 0.6°C и 1.5%, что примерно соответствует изменениям в последние 20 лет [1]. Таким образом, современные глобальные тенденции можно линейно экстраполировать на ближайшее будущее.

Важно, что региональные климатические изменения могут существенно отличаться от глобальных, в том числе и качественно, вследствие влияния факторов внутренней изменчивости климата (например, вследствие квазициклических изменений

океанической циркуляции с периодами 30–60 лет). Учёт этих факторов может существенно повысить достоверность сценарных прогнозов. В последние 15 лет активно развивается такое направление, как десятилетний прогноз, учитывающий внутреннюю динамику климата и её начальные условия, что позволяет точнее прогнозировать изменения климата во многих регионах [53].

НАУКА О КЛИМАТЕ И ЕЁ ЗАДАЧИ

Наука о климате представляет собой один из разделов наук о Земле. Являясь главным образом частью геофизики, она обладает рядом важных особенностей. Первейшая из них — мультидисциплинарность [54], связанная со сложностью объекта исследования (в формировании климата активно участвует Земная климатическая система, состоящая из атмосферы, океана, криосферы, литосферы и биосферы), а также существенным влиянием изменений климата на окружающую среду, жизнедеятельность человека, экономику, инфраструктуру, а в последнее время на геополитику и даже мораль современного общества [55].

Для профессионального понимания динамики климата учёный должен обладать профильным образованием, представлением об основных механизмах изменчивости климата, о динамике климатической системы на разных масштабах, опытом решения научных задач в этой области. Показатель уровня компетенции исследователя — защищённые диссертации, публикации в рецензируемых научных журналах соответствующего профиля и, конечно, опыт работы в этой сфере, тесно связанный с количеством и качеством публикаций. Считаю важным подчеркнуть, что проблемы изменений климата должны обсуждаться компетентными специалистами.

Политизированность обсуждения этих проблем и широкий общественный интерес к ним привлекают внимание учёных из других областей науки, не имеющих специализированных знаний и опыта исследований в науке о климате. Часто, ввиду значительности заслуг и достижений в своей области знаний, мнение неспециалистов в вопросах изменений климата выдаётся за альтернативное общепринятому в научном сообществе климатологов.

Выводы специалистов о ведущей роли антропогенных воздействий в глобальных трансформациях климата последних десятилетий, основанные на всесторонней диагностике и моделировании природных процессов, никак не связаны с их позицией по вопросам “зелёной энергетики”, углеродного регулирования, по другим экономическим и политическим инициативам. Эти выводы — результат естественно-научных исследований и публикаций в рецензируемых научных журналах.

Все ведущие отечественные учёные-климатологи отмечают, что изменения климата несут для Рос-

сии как негативные, так и позитивные последствия, а также указывают на необходимость взвешенного подхода к этим изменениям с учётом траектории экономического развития страны, где на первом месте должны быть устойчивое развитие и рост благосостояния граждан. Регулирование российской экономики, в том числе в рамках международных соглашений в области климата, равно как и принятие таких соглашений, должны осуществляться на основе принципа абсолютного приоритета национальных интересов в условиях глобализации и серьёзных геополитических вызовов. А решение задач науки о климате, в том числе выявления механизмов современных и прогноза будущих изменений климата, — фундаментальная проблема физики атмосферы и океана, которая должна решаться специалистами на основе накопленных знаний и новых экспериментальных и теоретических исследований, результаты которых доказали свою достоверность.

Нередко встречающаяся при общественном обсуждении климатической повестки искусственная дихотомия “сторонники антропогенного потепления как проводники западной политики” и “сторонники естественных факторов изменения климата как защитники национальных интересов”, с одной стороны, препятствует конструктивному обсуждению научных вопросов, переводя дискуссию в политическую плоскость, а с другой — создаёт прямую угрозу национальной безопасности страны при обсуждении, обосновании и принятии стратегических решений в области политики и экономики, дискредитируя с использованием политических ярлыков консолидированную позицию специалистов и противопоставляя ей аргументы, не прошедшие научной экспертизы.

В настоящее время главными задачами, стоящими перед наукой о климате и имеющими важное практическое значение, являются:

- разработка сценарных прогнозов изменений климата в будущем с высокой детальностью и оценкой их неопределённости на горизонте 20–50 лет;
- региональные прогнозы состояния климата с учётом его внутренней изменчивости (десятилетний прогноз) на масштабах 10–20 лет;
- мониторинг состояния климата, в том числе выявление тенденций изменений и оценка статистических распределений климатических характеристик;
- оценка рисков опасных погодноклиматических явлений, сезонный и межгодовой прогноз погодноклиматических аномалий;
- оценка последствий изменений климата для окружающей среды и человека.

Для решения указанных задач необходимы фундаментальные исследования механизмов изменчивости климата на разных пространственных и временных масштабах, выявление относительной роли антропогенных факторов, внутренней

естественной изменчивости и внешнего естественного воздействия. Необходимо создание новых и совершенствование существующих глобальных численных моделей Земной системы и региональных моделей климата. Требуется развитие методов прогноза погоды и климата на разных временных масштабах, методов диагностики и статистического анализа данных наблюдений и результатов численного моделирования. Критически важно получать инструментальные данные о состоянии Земной системы, в том числе океанографические и спутникового мониторинга, развивать сеть станционных наблюдений, совершенствовать методы получения и обработки массива информации, полученной инструментальными методами.

На наш взгляд, следует расширить взаимодействие и объединить усилия Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды и Российской академии наук, часто работающих над общими проблемами, в том числе прогноза погоды и климата. Этому может способствовать создание межведомственного климатического центра Росгидромета и РАН с определением основных направлений и координацией работ по ним.

Критически важно качественно расширить суперкомпьютерные ресурсы, доступные для климатических исследований. Во всех ведущих странах существуют суперкомпьютерные центры, специализирующиеся на моделировании и прогнозе климата. Создание такого центра под руководством РАН позволило бы существенно активизировать научные исследования и получать более детальные и достоверные результаты в области диагностики и прогнозирования изменений климата.

Важно поддерживать и развивать ведущие научные школы в области физики атмосферы, океана, климата, усиливать взаимодействие институтов РАН с профильными кафедрами вузов, обеспечить приток новых квалифицированных молодых учёных и обеспечить их поддержку.

Крайне необходимо увеличить финансирование экспедиционных исследований, в том числе морских экспедиций, развивать существующие и создавать новые научные стационары, занимающиеся наблюдениями за климатическими процессами.

Успешным опытом организации мультидисциплинарных исследований в области климата была Программа фундаментальных исследований президиума РАН “Изменение климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования”. Возобновление этой программы с определением новых задач и участников под эгидой Научного совета РАН по проблемам климата Земли будет способствовать координации исследований, усилит взаимодействие научных коллективов, позволит сформулировать и решить актуальные задачи в области изменений климата и адаптации к ним.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает благодарность академикам РАН В.Г. Бондуру, И.И. Мохову, Б.Н. Порфирьеву, члену-корреспонденту РАН А.А. Макоско, докторам физико-математических наук, профессорам РАН А.С. Грищину, А.В. Елисееву, кандидату физико-математических наук А.В. Чернокульскому и кандидату географических наук М.А. Алешиной за полезные обсуждения и помощь в подготовке статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / Под ред. В.М. Катцова. СПб.: Научно-технологические, 2022.
The third assessment report on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation / Ed. by V.M. Kattsov. St.Petersburg.: Science-intensive technologies, 2022. (In Russ.)
2. Dommenget D. The Ocean's Role in Continental Climate Variability and Change // J. Climate. 2009. V. 22. P. 4939–4952.
3. PAGES 2k Consortium. Consistent multidecadal variability in global temperature reconstructions and simulations over the Common Era // Nat. Geosci. 2019. V. 12. P. 643–649.
4. Neukom R., Steiger N., Gómez-Navarro J.J. et al. No evidence for globally coherent warm and cold periods over the preindustrial Common Era // Nature. 2019. V. 571. P. 550–554.
5. Matveeva T.A., Semenov V.A. Regional features of the Arctic sea ice area changes in 2000–2019 versus 1979–1999 periods // Atmosphere. 2022. V. 13. P. 1434.
6. Семенов В.А. Современные исследования климата Арктики: прогресс, смена концепций, актуальные задачи // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 61. № 1. С. 21–33.
Semenov V.A. Modern Arctic climate research: Progress, change of concepts, and urgent problems // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2021. V. 57. P. 18–28.
7. Zemp M., Huss M., Thibert E. et al. Global glacier mass changes and their contributions to sea-level rise from 1961 to 2016 // Nature. 2019. V. 568. P. 382–386.
8. Smith S.L., O'Neill H.B., Isaksen K. et al. The changing thermal state of permafrost // Nat. Rev. Earth Environ. 2022. V. 3. P. 10–23.
9. Мохов И.И., Семенов В.А. Погодно-климатические аномалии в российских регионах в связи с глобальными изменениями климата // Метеорология и гидрология. 2016. № 2. С. 16–28.
Mokhov I.I., Semenov V.A. Weather and climate anomalies in Russian regions related to global climate change // Russian Meteorology and Hydrology. 2016. V. 41. P. 84–92.

10. *Елисеев А.В., Васильева А.В.* Природные пожары: данные наблюдений и моделирование // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2020. Т. 3. С. 73–119.
Eliseev A.V., Vasileva A.V. Natural fires: observational data and modelling // *Fundamental and Applied Climatology*. 2020. V. 3. P. 73–119. (In Russ.)
11. *Allan R.P., Barlow M., Byrne M.P. et al.* Advances in understanding large-scale responses of the water cycle to climate change // *Ann. N.Y. Acad. Sci.* 2020. V. 1472. P. 49–75.
12. *Чернокульский А.В., Елисеев А.В., Козлов Ф.А. и др.* Опасные атмосферные явления конвективного характера в России: наблюдаемые изменения по различным данным // *Метеорология и гидрология*. 2022. № 5. С. 27–41.
Chernokulsky A.V., Eliseev A.V., Kozlov F.A. et al. Atmospheric severe convective events in Russia: Changes observed from different data // *Russian Meteorology and Hydrology*. 2022. V. 47. № 5. P. 343–354.
13. *Semenov V., Bengtsson L.* Secular trends in daily precipitation characteristics: greenhouse gas simulation with a coupled AOGCM // *Climate Dynamics*. 2002. V. 19. P. 123–140.
14. *Aleshina M.A., Semenov V.A., Chernokulsky A.V.* A link between surface air temperature and extreme precipitation over Russia from station and reanalysis data // *Env. Res. Lett.* 2021. V. 16. P. L105004.
15. *Bekryaev R.V., Polyakov I.V., Alexeev V.A.* Role of polar amplification in long-term surface air temperature variations and modern arctic warming // *Journal of Climate*. 2010. V. 23(14). P. 3888–3906.
16. *Семенов В.А.* Современные исследования климата Арктики: прогресс, смена концепций, актуальные задачи // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2021. Т. 61. № 1. С. 21–33.
Semenov V.A. Modern Arctic climate research: Progress, change of concepts, and urgent problems // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2021. V. 57. P. 18–28.
17. *Золina О.Г., Булыгина О.Н.* Современная климатическая изменчивость характеристик экстремальных осадков в России // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2016. № 1. С. 84–103.
Zolina O.G., Bulygina O.N. Current climatic variability of extreme precipitation in Russia // *Fundamental and Applied Climatology*. 2016. V. 1. P. 84–103. (In Russ.)
18. *Anisimov O., Reneva S.* Permafrost and Changing Climate: The Russian Perspective // *Ambio*. 2006. V. 35. P. 169–175.
19. *Ogorodov S., Aleksyutina D., Baranskaya A et al.* Coastal erosion of the Russian Arctic: an overview // *J. Coast. Res.* 2020. V. 95. P. 599–604.
20. *Kirpotin S.N., Callaghan T.V., Peregon A.M. et al.* Impacts of environmental change on biodiversity and vegetation dynamics in Siberia // *Ambio*. 2021. V. 50. P. 26–52.
21. *Семёнов С.М.* Парниковый эффект: открытие, развитие концепции, роль в формировании глобального климата и его антропогенных изменений // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2015. № 2. С. 103–126.
Semenov S.M. Greenhouse effect: discovery, concept development, role in formation of global climate and its human induced changes // *Fundamental and Applied Climatology*. 2015. V. 2. P. 103–126. (In Russ.)
22. *Manabe S., Wetherald R.T.* Effects of doubling the CO₂ concentration on the climate of a general circulation model // *Journal of the Atmospheric Sciences*. 1975. V. 32(1). P. 3–15.
23. *Feldman D.R. et al.* Observational determination of surface radiative forcing by CO₂ from 2000 to 2010 // *Nature*. 2015. V. 519(7543). P. 339–343.
24. IPCC, 2023: Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.).* IPCC. Geneva, Switzerland. P. 1–34.
25. *Будыко М.И.* Влияние человека на климат. Л.: Гидрометеиздат. 1972.
Budyko M.I. Human influence on the climate. L.: Gidrometeoizdat, 1972. (In Russ.)
26. IPCC – The Intergovernmental Panel on Climate Change. <https://www.ipcc.ch/>
27. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме / Под ред. В.М. Катцова. СПб.: Научоёмкие технологии, 2022.
The third assessment report on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation. General summary / Ed. by V.M. Kattsov. St. Petersburg: High-tech technologies, 2022. (In Russ.)
28. The history of climate. L.: Hydrometeoizdat, 1979. *Steffen W., Grinevald J., Crutzen P., McNeill J.* The Anthropocene: Conceptual and historical perspectives // *Philos. Trans. R. Soc. London Ser. A*. 2011. V. 369. P. 842–867.
29. *Keeling C.D.* The Suess effect: 13Carbon-14Carbon interrelations // *Environ. Int.* 1979. V. 2. P. 229–300.
30. *Petit J., Jouzel J., Raynaud D. et al.* Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica // *Nature*. 1999. V. 399. P. 429–436.
31. *Luthi D., Le Floch M., Bereiter B. et al.* High-resolution carbon dioxide concentration record 650,000–800,000 years before present // *Nature*. 2008. V. 453(7193). P. 379–382.
32. *Мохов И.И., Семенов А.И.* Нелинейные температурные изменения в атмосфере в области мезопаузы на фоне глобальных изменений климата

- в 1960–2012 гг. // Доклады Академии наук. 2014. Т. 456. № 5. С. 596–599.
- Mokhov I.I., Semenov A.I.* Nonlinear temperature changes in the atmospheric mesopause region of the atmosphere against the background of global climate changes, 1960–2012 // Doklady Earth Sciences. Springer Nature BV. 2014. V. 456. №. 2. P. 741.
33. *Santer B.D., Po-Chedley S. Zhao L. et al.* Exceptional stratospheric contribution to human fingerprints on atmospheric temperature // Proc. Natl. Acad. Sci. 2023. V. 120. P. e2300758120.
 34. *Trenberth K.E., Fasullo J.T., Balmaseda M.A.* Earth's Energy Imbalance // J. Climate. 2014. V. 27. P. 3129–3144.
 35. *Hegerl G., Zwiers F.* Use of models in detection and attribution of climate change // Wiley Interdiscip. Rev.: Clim. Change. 2011. V. 2. P. 570–591.
 36. *Franzke C.L.E., Barbosa S., Blender R. et al.* The structure of climate variability across scales // Reviews of Geophysics. 2020. V. 58. P. e2019RG000657.
 37. *Монин А.С., Шишков Ю.А.* История климата. Л.: Гидрометеиздат, 1979.
Monin A.S., Shishkov YU.A. The history of climate. L.: Hydrometeoizdat, 1979. (In Russ.)
 38. *Semenov V.A., Latif M., Dommenget D. et al.* The impact of North Atlantic-Arctic multidecadal variability on Northern Hemisphere surface air temperature // J. Climate. 2010. V. 23. P. 5668–5677.
 39. *Мохов И.И., Смирнов Д.А.* Эмпирические оценки вклада парниковых газов и естественной климатической изменчивости в тренды приповерхностной температуры для различных широт // Доклады РАН. 2022. Т. 503. С. 48–54.
Mokhov I.I., Smirnov D.A. Empirical estimates of the contribution of greenhouse gases and natural climatic variability to surface air temperature trends for various latitudes // Doklady Earth Sciences. M.: Pleiades Publishing, 2022. V. 503. №. 1. P. 114–118.
 40. *Мохов И.И.* Изменения климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования // Вестник РАН. 2022. № 1. С. 3–14.
Mokhov I.I. Climate Change: Causes, Risks, Consequences, and Problems of Adaptation and Regulation // Herald of the RAS. 2022. № 1. P. 1–11.
 41. *Порфирьев Б.Н., Елисеев Д.О., Стрелецкий Д.А.* Экономическая оценка последствий деградации вечной мерзлоты под влиянием изменений климата для устойчивости дорожной инфраструктуры в Российской Арктике // Вестник РАН. 2019. № 12. С. 1228–1239.
Porfiriev B.N., Eliseev D.O., Streletskiy D.A. Economic Assessment of Permafrost Degradation Effects on Road Infrastructure Sustainability under Climate Change in the Russian Arctic // Herald of the RAS. 2019. № 6. P. 567–576.
 42. *Порфирьев Б.Н., Елисеев Д.О., Стрелецкий Д.А.* Экономическая оценка последствий деградации многолетней мерзлоты для объектов системы здравоохранения российской Арктики // Вестник РАН. 2021. № 12. С. 1125–1136.
Porfiriev B.N., Eliseev D.O., Streletskiy D.A. Economic Assessment of Permafrost Degradation Effects on Healthcare Facilities in the Russian Arctic // Herald of the RAS. 2021. № 6. P. 677–686.
 43. *Ревич Б.А., Малеев В.В.* Изменения климата и здоровье населения России: Анализ ситуации и прогнозные оценки. М.: ЛЕНАНД, 2011.
Revich B.A., Maleev V.V. Climate change and the health of the Russian population: Situation analysis and forecast estimates. M.: LENAND, 2011. (In Russ.)
 44. *Макоско А.А., Матешева А.В.* Загрязнение атмосферы и качество жизни населения в XXI веке: угрозы и перспективы. М.: Российская академия наук, 2020.
Makosko A.A., Matesheva A.V. Atmospheric pollution and the quality of life of the population in the XXI century: threats and prospects. M.: Russian Academy of Sciences, 2020. (In Russ.)
 45. *Grigorieva E.A., Revich B.A.* Health Risks to the Russian Population from Temperature Extremes at the Beginning of the XXI Century // Atmosphere. 2021. V. 12. P. 1331.
 46. *Парфёнова М.Р., Елисеев А.В., Мохов И.И.* Изменения периода навигации на Северном морском пути в 21 веке: Байесовы оценки по расчётам с ансамблем климатических моделей // Доклады РАН. 2022. Т. 507. № 1. С. 118–125.
Parfenova M.R., Eliseev A.V., Mokhov I.I. Changes in the duration of the navigation period in Arctic seas along the Northern Sea Route in the twenty-first century: Bayesian estimates based on calculations with the ensemble of climate models // Doklady Earth Sciences. M.: Pleiades Publishing. 2022. V. 507. №. 1. P. 952–958.
 47. *Семенов В.А., Черенкова Е.А., Алдонова Т.А.* Современные и ожидаемые характеристики сезонного хода ледового покрова в морях Российской Арктики // Доклады РАН. 2023. Т. 511. № 1. С. 112–118.
Semenov V.A., Cherenkova E.A., Aldonina T.A. Modern and Projected Characteristics of the Seasonal Cycle of Ice Cover in the Russian Arctic Seas // Doklady Earth Sciences. M.: Pleiades Publishing, 2023. V. 511. №. 1. P. 608–613.
 48. *Катцов В.М., Порфирьев Б.Н.* Адаптация России к изменению климата: концепция национального плана // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. Выпуск 586 / Под ред. В.М. Катцова, В.П. Мелешко. СПб.: Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова, 2017. С. 7–20.
Kattsov V.M., Porfir'ev B.N. Adaptation of Russia to climate change: the concept of the national plan // Proceedings of the Main Geophysical Observatory named after A.I. Voeikov. Issue 586 / Ed. by

- V.M. Kattsov, V.P. Meleshko. St. Petersburg: Main Geophysical Observatory named after A.I. Voeikov, 2017. P. 7–20.
49. Макаров И.А., Чернокульский А.В. Влияние изменения климата на экономику России: рейтинг регионов по необходимости адаптации // Журнал Новой экономической ассоциации. 2023. № 4(61). С. 145–202.
- Makarov I.A., Chernokul'skij A.V.* The impact of climate change on the Russian economy: a rating of regions on the need for adaptation // Journal of the New Economic Association. 2023. №. 4(61). P. 145-202. (In Russ.)
50. Eyring V., Bony S., Meehl G. A. et al. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization // Geosci. Model Dev. 2016. V. 9. P. 1937–1958.
51. Володин Е.М., Грицун А.С. Воспроизведение возможных будущих изменений климата в XXI веке с помощью модели климата INM-CM5 // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2020. Т. 56. № 3. С. 255–266.
- Volodin E. M., Gritsun A. S.* Simulation of possible future climate changes in the 21st century in the INM-CM5 climate model // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2020. V. 56. №. 3. P. 218–228.
52. Мохов И.И., Елисеев А.В., Гурьянов В.В. Модельные оценки глобальных и региональных изменений климата в голоцене // Доклады РАН. 2020. Т. 490. № 1. С. 27–32.
- Mokhov I.I., Eliseev A.V., Guryanov V.V.* Model estimates of global and regional climate changes in the Holocene // Doklady Earth Sciences. Pleiades Publishing. 2020. V. 490. P. 23–27.
53. Keenlyside N., Latif M., Jungclaus J. et al. Advancing decadal-scale climate prediction in the North Atlantic sector // Nature. 2008. V. 453(7191). P. 84–88.
54. Данилов-Данильян В.И., Катцов В.М., Порфирьев Б.Н. Проблема климатических изменений — поле сближения и взаимодействия естественных и социогуманитарных наук // Вестник РАН. 2020. № 10. С. 914–925.
- Danilov-Danil'yan V.I., Kattsov V.M., Porfiriev B.N.* The Problem of Climate Change: The Field of Convergence and Interaction between Natural Sciences and the Sociohumanities // Herald of the RAS. 2020. № 5. P. 577–587.
55. Семенов В.А. Изменения климата как новая мораль в экономических отношениях // Труды Вольного экономического общества России. 2019. Т. 2016. № 2. С. 215–226.
- Semenov V.A.* Climate change as a new morality in economic relations // Proceedings of the Free Economic Society of Russia. 2019. V. 2016. №. 2. P. 215–226. (In Russ.)

CLIMATE CHANGE: CAUSES, CONSEQUENCES, IMPERATIVES

V.A. Semenov^{a,b,*}

^aA.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Moscow, Russia

^bInstitute of Geography RAS, Moscow, Russia

*E-mail: vasesmenov@ifaran.ru

Climate change is one of the most important interdisciplinary problems of the XXI century, encompassing environmental, economic and social aspects of sustainable development of the Russian Federation. The article considers the main aspects of the global climate change, its peculiarities and consequences on the territory of the Russian Federation. The author formulates actual tasks of climate science for the coming years and decades and suggests important steps necessary for solving these tasks. The article is based on the materials of the report presented by the author at the General Meeting of the Russian Academy of Sciences on December 12th, 2023.

Keywords: climate change, causes of climate change, consequences of climate change, current challenges of climate science.

СТРУКТУРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СДВИГИ И МОДЕРНИЗАЦИЯ ЭКОНОМИКИ РОССИИ (СРЕДНЕ- И ДОЛГОСРОЧНЫЕ ПЕРСПЕКТИВЫ)

© 2024 г. Б.Н. Порфирьев^{а,*}, А.А. Широ^{а,**}

^аИнститут народнохозяйственного прогнозирования РАН, Москва, Россия

*E-mail: b_porfiriev@mail.ru

**E-mail: schirov-mse@yandex.ru

Поступила в редакцию 09.01.2024 г.

После доработки 02.02.2024 г.

Принята к публикации 22.02.2024 г.

В статье структурно-технологические сдвиги и тенденции модернизации экономики России рассматриваются в контексте и как ответ на большие вызовы устойчивому развитию и национальной безопасности страны, включая: демографические проблемы, технологическое отставание и зависимость; финансирование и организацию управления научно-техническим развитием; вопросы пространственной организации территории. Анализируются: качественные изменения на рынке труда и в сфере занятости населения и императивы роста производительности труда как компенсатора демографической нагрузки на экономику; сдвиги в отраслевой и производственно-технологической структуре экономики, прежде всего форсированное развитие обрабатывающей промышленности в 2022–2023 гг.; качественные улучшения в научно-технологической политике и системе управления наукой, основанные на использовании отечественного и зарубежного опыта организации управления прорывными научными проектами; сбалансированное пространственное развитие и поворот территориальной политики на Восток.

Ключевые слова: большие вызовы развитию, рынок труда и занятости, сдвиги в отраслевой и производственно-технологической структуре экономики, научно-технологическая политика, пространственное развитие.

DOI: 10.31857/S0869587324030085, EDN: GGHNTL

Современная Россия столкнулась с большими внешними и внутренними вызовами. Внешние вызовы, включая прошедшую свой пик, но не канув-



ПОРФИРЬЕВ Борис Николаевич — академик РАН, научный руководитель ИНП РАН. ШИРОВ Александр Александрович — член-корреспондент РАН, директор ИНП РАН.

шую в лету пандемию коронавируса, унёсшую более 20 млн жизней в мире, в том числе около 800 тыс. в нашей стране, а также нынешний геополитический и геоэкономический кризис, спровоцированный событиями вокруг Украины и связанной с ними санкционной войной западных экономик против России, стали катализатором и одновременно стимулом для ответа на вызовы внутренние. Последние принципиально не меняются на протяжении последних десятилетий и остаются главным тормозом на пути устойчивого социально-экономического развития страны. В свою очередь, структурно-технологические сдвиги и модернизацию экономики правомерно рассматривать в качестве одного из принципиальных ответов на внешние и внутренние вызовы и как одно из ключевых направлений стратегического планирования и стратегии действий, охватывающее государственную социально-экономическую и научно-техническую политику. Базовым элементом обоснования такой

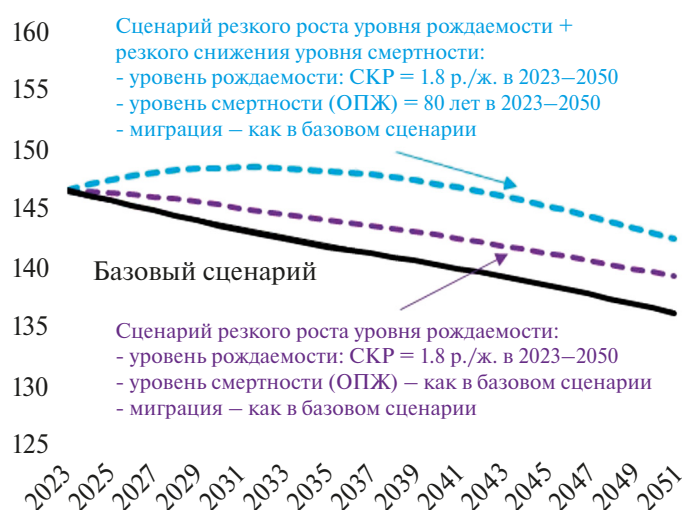


Рис. 1. Прогноз динамики численности населения России в 2023–2050 гг.

Источник: Росстат, расчёты ИПП РАН.

стратегии, прежде всего целеполагания и ключевых механизмов достижения целей, должен выступать социально-экономический и научно-технический прогноз развития на долгосрочную перспективу.

В данной статье в контексте вышеупомянутого подхода рассматриваются четыре больших вызова устойчивому социально-экономическому развитию и национальной безопасности страны и, соответственно, четыре направления структурных сдвигов и модернизации экономики как стратегические ответы на эти вызовы.

ДЕМОГРАФИЧЕСКИЙ ВЫЗОВ И СТРУКТУРНЫЙ СДВИГ В СФЕРЕ ЗАНЯТОСТИ НАСЕЛЕНИЯ

Анализ демографических процессов последних десятилетий, включая показатели смертности, рождаемости, миграции, а также сценарии их изменения до 2050 г., свидетельствует о двух негативных тенденциях — снижении численности и старении населения (рис. 1). Возникают серьёзные риски *увеличения коэффициента демографической нагрузки* на экономику (соотношение неработающего и экономически активного населения) и связанные с ними дефицит кадров, торможение роста производства и доходов. По данным ЦБ России, уже в середине 2023 г. 60% производств испытывали кадровый дефицит, 80% промышленных предприятий, прежде всего в обрабатывающей промышленности, — проблемы с наймом персонала [1].

Следует подчеркнуть: указанные риски актуальны при неизменной производительности труда

Базовый сценарий ИПП РАН
(близок к прогнозу Росстата от октября 2023 года):

1) Уровень рождаемости (измеряемый через суммарный коэффициент рождаемости, детей на женщину):

1.42 (2022) => 1.75 (2035–50)

2) Уровень смертности (измеряемый через ожидаемую продолжительность жизни, лет):

мужчины: 67.6 (2022) => 77 (2050)

женщины: 77.8 (2022) => 83 (2050)

оба пола: 72.7 (2022) => 80 (2050)

3) Миграционный прирост:
в среднем 200 тыс. чел. в год.

(рис. 2), что в перспективе ближайших десятилетий представляется маловероятным. Если в 2023–2050 гг. среднегодовой прирост производительности труда будет равен 1%, то, согласно модельным расчётам, реальный эффективный коэффициент демографической нагрузки останется на уровне 2022 г.² Если же в указанный период среднегодовые темпы роста производительности удастся поддерживать на уровне 2002–2019 гг. (3%), а предприятия, реализующие национальный проект “Производительность труда”, снизившие всего за несколько лет потребность в кадрах на 100 тыс. человек [3], смогут сохранить достигнутые показатели, это станет эффективным ответом на демографический вызов.

Реализация потенциала роста производительности труда требует значительных инвестиций в развитие здравоохранения и образования, а также в науку (НИОКР). Это тем более необходимо, учитывая нынешнее примерно двукратное отставание России от развитых экономик мира по доле вклада так называемой *экономики знаний* (важнейшими составляющими которой являются здравоохранение, образование и наука) в ВВП: примерно 15–16% против 35% [4]. Кроме того, инвестиционный импульс должен быть увязан с соответствующими качественными изменениями в структуре рынка труда, а именно с ростом занятости в перечисленных выше сферах. Как показывают прогнозные расчёты, именно эти секторы наряду с реципиентами научно-технологических достижений (высоко- и среднетехнологическими отраслями обрабатывающей промышленности, а также строительством) в период 2019–2035 гг.

¹ По данным Института экономической политики им. Е.Т. Гайдара, кадровый дефицит испытывали 42% предприятия [2].

² Определяется как соотношение прироста эффективного коэффициента демографической нагрузки (для всех возрастных групп) и прироста производительности труда в экономике.

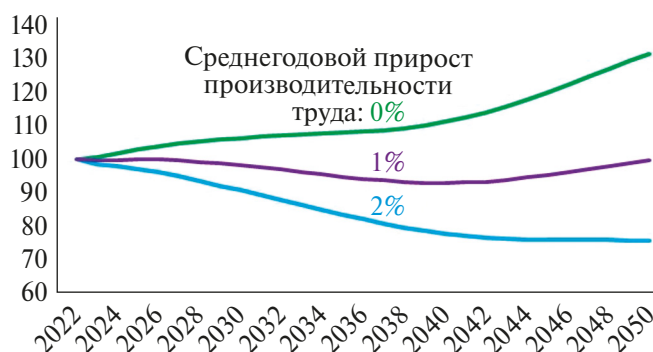


Рис. 2. Изменение реального эффективного коэффициента демографической нагрузки в зависимости от производительности труда (2022 = 100)

Источник: расчёты ИНП РАН.

должны стать главным драйвером роста совокупной занятости, тогда как в её основном резервуаре, торговле, ожидается сокращение (рис. 3).

Для проведения эффективной политики на рынке труда необходим единый прогноз *потребности экономики в кадрах* на отраслевом, региональном и профессионально-квалификационном уровнях, а также согласование классификаторов в сфере труда

и образования, задача разработки которых в 2024 г. была поставлена перед научно-экспертным сообществом Президентом России на расширенном заседании Президиума Госсовета по вопросу “О развитии рынка труда в Российской Федерации” в сентябре 2023 г. [5]. Решить эту задачу можно только на основе консолидации усилий бизнеса, государства и научно-экспертного сообщества. Бизнес должен определить параметры спроса на труд со стороны его потребителей – компаний (предприятий), то есть снизу. Государство (органы власти) как ключевой институт и регулятор, управляющий сверху, на макроэкономическом уровне, формированием такого спроса, его объёмом и структурой, должно увязывать качественные и количественные параметры предложения труда в рамках социально-экономического и научно-технологического прогнозов долгосрочного развития страны. Задача научно-экспертного сообщества – разрабатывать такие прогнозы.

Важнейшую роль в процессе согласования параметров спроса на труд должны играть *оценки изменения эффективности производства*, что предполагает тесное сопряжение социально-экономической политики со стратегией научно-технологического развития страны. А это одна из наиболее сложных, комплексных проблем, решение которой предполагает



Рис. 3. Направление сдвигов в отраслевой структуре занятости в 2019–2035 гг., % совокупной занятости (голубая линия – 2019 г., коричневая – 2035 г.)

Источник: расчёты ИНП РАН.

использование междисциплинарного системного подхода и наличие соответствующего кадрового потенциала. Российская академия наук располагает необходимым для решения этой задачи методологическим и кадровым потенциалом, включая учёных-обществоведов (экономистов, социологов, юристов и т.д.), которые имеют немалый и в целом позитивный опыт разработки такого рода прогнозов в тесной кооперации с бизнес-структурами и государством, в первую очередь с Минэкономразвития России.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОТСТАВАНИЕ И ФОРСИРОВАННЫЙ СДВИГ В ОТРАСЛЕВОЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЕ

До недавних пор одной из излюбленных тем и общим местом политических и экономических дискуссий была проблема пресловутой нефтяной или нефтегазовой “иглы”, на которую подседа российская экономика, в первую очередь экспорт, в котором доминировали топливно-энергетические ресурсы. Долгие годы, в течение которых усиленно муссировалась эта тема, многие видные экономисты РАН настойчиво пытались доказать некорректность подобной оценки.

Так, академик В.В. Ивантер неоднократно отмечал, что одна из ключевых проблем экономики первых двух десятилетий XXI в. состоит не в экспорте углеводородов (производство которых, в отличие от расхожего мнения о его примитивности и низкой добавленной стоимости, является высокотехнологичным и доходным бизнесом, а сам товар — весьма востребованным на мировом рынке), но в техно-

логической зависимости. Последняя проявляется в низкой доле отечественных разработок и, соответственно, высокой доле машин и оборудования в импорте нефтегазового сектора экономики, а также в совокупном импорте страны. Зависимость усиливалось неэффективное использование значительной части валютной выручки, которую страна получала от сырьевого экспорта и которая шла на покупку потребительских товаров вместо современных технологий и оборудования. Таким образом, корень зла не в “сырьевом проклятии”, а в “импортной игле”: “Бороться нужно не с экспортом сырьевых ресурсов, а с избыточным импортом... Мы должны вернуть себе собственные рынки оборудования и сервисных услуг в топливно-энергетическом комплексе, фармацевтики и медтехники, продовольствия — там, где зависимость от импорта сложилась драматическая. Совершенно ясно, что страна, которая может создавать космические аппараты и строить атомные электростанции, способна это сделать. Не должно быть зависимости от импортных комплектующих и в оборонно-промышленном комплексе” [6].

Эта точка зрения более чем актуальна сегодня, в условиях наложения трендов ускоренной цифровой трансформации мировой экономики, с одной стороны, и ее “зелёной” трансформации — с другой, а также санкционной войны Запада против России. Она оказывает значительное давление на отечественную экономику, особенно на её промышленный сектор и научно-технологический комплекс, но одновременно даёт мощный импульс их развитию. Ответом на этот вызов закономерно должен был стать и уже становится форсированный рост обрабатывающей промышленности и “быстрое сползание с технологической иглы Запада” [7].

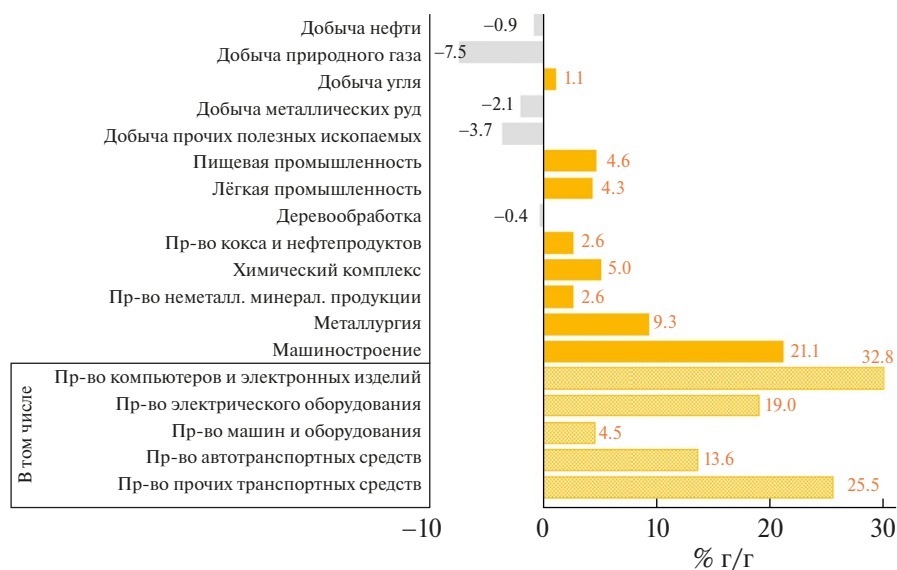


Рис. 4. Динамика роста промышленного производства в России в 2023 г. (предварительные данные)

Источник: ЦДУ ТЭК, Минэкономразвития России.

Так, в 2023 г. по предварительным данным, производство в сфере машиностроения в целом выросло на 21.1%, в том числе производство станков больше чем на 50%; электронной и вычислительной техники — на 32.8%; транспортных средств (кроме автомобилей) — на 25.5%, электрооборудования — на 23% (рис. 4). Именно эти важнейшие сегменты внесли решающий вклад в рынок обрабатывающей промышленности и в ускорение динамики всего народно-хозяйственного комплекса (рис. 5), благодаря чему в итоге в 2023 г. ВВП страны увеличился на 3.6%.

С макроэкономической точки зрения ключевой вклад обрабатывающей промышленности состоит в *росте эффективности использования первичных ресурсов*, включая нефтегазовые, через удлинение цепочек добавленной стоимости, увеличение производительности и усложнение (модернизацию) структуры экономики. При этом сектора экономики, производящие ресурсы, прежде всего топливно-энергетические, были и остаются материальной базой экономического роста и одной из приоритетных сфер приложения научно-технологических достижений. Это полностью соответствует Повестке ООН по устойчивому развитию до 2030 г., которая предусматривает обеспечение энергией всех субъектов экономики как одну из ключевых целей. Вместе с тем в России именно на энергетических предприятиях госкомпаний, играющих в этой отрасли ведущую роль, сохраняются, причём в большом количестве, технологии, не соответствующие мировому уровню [8, с. 91].

В качестве примера структурно-технологической трансформации экономики на основе роста эффективности расходования топливно-энергетических ресурсов можно привести использование природного газа в производстве кормового белка для отечественного животноводства и на экспорт. В 1960-х годах в СССР было развёрнуто широкомасштабное производство белка гаприна, но в 1990-е годы это успешное начинание, как и многие другие, было свёрнуто. Таким образом, в данном случае речь идёт о возможности своеобразного технологического ренессанса на основе современных научно-технических достижений. Реальность таковых была обоснована в докладах на сессии президиума РАН в декабре 2021 г., в том числе академика РАН В.О. Попова и авторов этих строк, представивших расчёты мультипликативных эффектов развития соответствующих производств. Представляется, что этот процесс может получить новый импульс в связи с ноябрьским 2023 г. указом Президента России о развитии природоподобных технологий [9]. Уже к апрелю 2024 г. предусматривается разработка Правительством РФ плана соответствующих мероприятий, в том числе в сфере биотехнологий.

Другой пример — использование природного газа для производства водорода, одного из лучших по экологическим и климатическим характеристикам источника энергии. Как известно, успешные разработки в этой области осуществляют ПАО «Газпром» и Госкорпорация «Росатом» совместно со специалистами РАН. В частности, учёные ИНП РАН рассчитали ёмкость мирового и отечественного рынков водорода, обосновали не только научно-технический



Рис. 5. Декомпозиция индекса роста промышленного производства в январе–октябре 2023 г.

Источник: расчёты ИНП РАН.

императив (с позиций технологического суверенитета), но и экономическую целесообразность развития водородных технологий. Кроме того, с точки зрения экономической эффективности доказана необходимость поэтапного перехода к их коммерциализации с учётом ограничения рынков сбыта и отказа от стремления следовать во всём за западными конкурентами, которые раскручивают весьма сомнительную с точки зрения экономики спираль “водородной гонки” [10].

Структурно-технологическая трансформация российской экономики как эффективный ответ на сохраняющееся технологическое отставание, как стратегия достижения технологического и национального суверенитета предполагает формирование системы, которая включает семь ключевых элементов, образующих управленческий цикл: производство — инвестиции в НИОКР — инновации — производительность труда — доходы — спрос — инвестиции в производство — производство. Эта система должна обеспечить научно-технологическую достройку производственных цепочек, берущих начало от ключевых природных ресурсов, включая топливно-сырьевые (контур или кластер ТЭК), минеральные (металлургический комплекс) и экологические — почвы, леса и экосистемные услуги (агропродовольственный, лесной, рекреационно-туристический кластеры). При этом всё возрастающую роль связующего звена играют большие инфраструктурные проекты, в том числе транспортные и строительные.

Как представляется, подобная система может быть выстроена только в рамках соответствующей стратегии или программы действий на основе фундаментального научно-технологического прогноза. В его разработке ключевая роль (если не лидерство) должна принадлежать Российской академии наук в тесной кооперации с экспертами бизнес-сообщества и отраслей экономики, при использовании в том числе возможностей Научно-координационного совета РАН по социально-экономическому прогнозированию, в котором, помимо академических специалистов, участвуют представители Минэкономразвития России, ряда других ведомств и, конечно, университетов³.

³ В связи с этим обращают на себя внимание недавние (2022–2023 гг.) инициативы Национальной академии наук США по разработке ключевых положений Национального плана развития “умной” обрабатывающей промышленности, что предусматривает использование технологий высокоскоростной связи, облачных и распределённых вычислительных сетей и сетей датчиков, современного человеко-машинного взаимодействия на основе сопряжения IT и операционных технологий в рамках формируемой “экосистемы компаний обрабатывающей промышленности”, а также качественного повышения уровня образования, подготовки и переподготовки кадров на всех уровнях этой экосистемы — от крупнейших корпораций до малых и средних предприятий [11].

СДВИГИ В НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОЛИТИКЕ И СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ НАУКОЙ

Будучи одним из драйверов структурно-технологической модернизации экономики научно-технологический прогресс и научно-технологическая политика в её нынешнем состоянии таят в себе риски устойчивому развитию и угрозу национальной безопасности России. Выделим три проблемы.

Одна из них связана с вкладом научно-технологического фактора, прежде всего высоко- и средне-технологического комплексов, в динамику ВВП за последние 10 лет, который, как и доля расходов на здравоохранение и образование, увеличился (табл. 1); но при этом доля расходов на научный сектор сократилась (с 1.7% в 2013 г. до 1.4% 2021 г.). В федеральном бюджете на 2023–2025 гг. (при рассмотрении структуры его расходов в динамике в постоянных ценах) прослеживается та же тенденция снижения затрат на науку. Анализ объёма и структуры финансирования госпрограммы “Научно-технологическое развитие Российской Федерации” до 2024 г., по которой в 2021–2023 гг. более 2/3 затрат приходилось на образовательный блок, свидетельствует об остаточном характере расходов на научную и научно-технологическую деятельность (подробнее см. [8]).

Другая проблема — это соотношение внутренних затрат на НИОКР в России с затратами на импорт научно-технологических знаний, воплощённых в высоко- и среднетехнологичных зарубежных товарах. Как видно на рисунке 6, это соотношение составляет примерно 1:3, причём, к сожалению, такая ситуация устойчиво сохраняется на протяжении длительного периода. В то же время, согласно расчётам, выполненным в ИНП РАН, отдача от внутренних затрат НИОКР — в терминах их мультипликативных эффектов на динамику развития различных секторов российской экономики — весьма значительна и достигает 1.43 (для роста ВВП) и 2.33 (для роста выпуска).

Наконец, ещё одна проблема связана с кризисом системы управления научно-технологическим комплексом страны, который проявляется как в выборе приоритетов целей и финансирования и их сопряжении (точнее, недостаточной увязки друг с другом), так и в схеме организации управления этим комплексом, в которой сохраняется немало несостыковок и ощущается дефицит координации между уровнями и субъектами принятия решений [8]. Это обстоятельство, как и упомянутые выше проблемы, означает необходимость качественных сдвигов в научно-технологической политике страны, включая систему управления наукой.

На наш взгляд, было бы весьма продуктивным вернуться к собственному опыту не столь давнего советского прошлого и критически, но конструктивно проанализировать и оценить его с позиций текущих и перспективных задач развития с учётом

Таблица 1. Экономические параметры научно-инновационного комплекса России

Сектора экономики	Добавленная стоимость, % ВВП				Доля сектора в общем объёме отгруженных инновационных товаров, %	
	2011	2015	2017	2021	2017	2021
Наукоёмкий, высоко- и среднетехнологичный	19.7	21.1	21.9	23.0	49.1	50.7
Высокотехнологичный	1.0	1.4	1.4	1.6	9.9	10.4
Среднетехнологичный	2.9	3.2	3.1	3.6	22.4	21.7
Наукоёмкий	15.8	16.5	17.4	17.8	16.8	18.6
Наука и технологии	8.9	9.9	9.8	10.8	49.0	50.3
Человеческий капитал	6.1	6.3	6.3	6.5	0.0	0.3

Источник: расчёты Института исследований и экспертизы ВЭБ.РФ.

современной мировой практики в рассматриваемой сфере. Заслуживает внимания опыт функционирования Государственного комитета СССР по науке и технике (ГКНТ), созданного вскоре после войны, в 1948 г. Как известно, благодаря активной его деятельности (безусловно, не только его) был получен целый ряд выдающихся достижений в области науки и техники, которые значительно продвинули общество и экономику страны, способствовали укреплению её безопасности и технологического суверенитета: первая в мире АЭС (1949), запуск первого в мире искусственного спутника Земли (1957) и человека в космос (1961) и т.д., вплоть до ликвидации комитета в 1991 г. Неудивительно, что буквально через год после запуска спутника в 1958 г. шокированные этим событием власти США объявили о создании собственного Агентства по передовым стратегическим разработкам (ARPA), позднее преобразованного в DARPA (добавлено “оборонного назначения”), под эгидой и/или при мощной поддержке которого были получены важнейшие научно-технологические результаты. В гражданском секторе экономики: от изобретения Интернета в конце 1960-х, GPS в начале 1970-х до разработки вакцин против коронавируса в конце 2010-х. В 2022 г. аналогичное агентство (ARIA)⁴ было сформировано в Великобритании, которая по ряду критериев⁵, является одним из мировых научно-технических лидеров. Цель агентства — поддержка оригинальных и рискованных проектов трансформационных технологий, которые могли бы опережать своё время на десятилетия

и оказывать мощное влияние на развитие широкого спектра видов экономической деятельности [12].

Отечественный и зарубежный опыт наглядно свидетельствует об актуальности предложения внимательно изучить предшествующий опыт и, может быть, на новом уровне сформировать, не копируя, структуру, аналогичную советскому ГКНТ⁶. Тем более следует вспомнить, что ликвидация комитета в 1991 г. была осуществлена на основании Постановления Госсовета СССР от 14 ноября 1991 г. № 13 в соответствии с Законом СССР от 5 сентября 1991 г. № 2391-I “Об органах государственной власти и управления Союза ССР в переходный период”. Как известно, политический переходный период давно закончился, и если всё же использовать это словосочетание, то оно, скорее, уместно в экономическом и научно-техническом контексте — как период или фаза перехода к технологическому рывку, императив которого неоднократно подчёркивал в своих выступлениях Президент России⁷.

Без серьёзных институциональных преобразований, с нашей точки зрения, простое наращивание финансирования НИОКР (которое, конечно же, необходимо) может оказаться недостаточным для *структурно-технологической модернизации* российской экономики. При этом необходимо уделять внимание не только организационной, но и кадровой стороне дела, в том числе не забывая, что из 43 лет деятельности ГКНТ почти 35 лет его возглавляли выдающиеся учёные — академики В.А. Кириллин, Г.И. Марчук и Н.П. Лавёров. И это закономерно, учитывая, что комплексный, междисциплинарный

⁴ Advanced Research and Invention Agency. Агентство возглавляют И. Гур, один из ведущих в Европе создателей стартапов в сфере IT, и Д. Макмиллан, Нобелевский лауреат по химии 2021 г.

⁵ В частности, по числу лучших университетов мира, количеству “единорогов” (частных высокотехнологичных компаний стоимостью более 1 млрд долл.) — более 40 в различных секторах экономики — от биотехнологий до полупроводников.

⁶ Один из вариантов — Бюро по науке и технологиям как постоянно действующий надминистерский орган — аппарат правительственной Комиссии по научно-технологическому развитию [13, с. 44].

⁷ См., в частности: Послание Президента Федеральному собранию 1 марта 2018 г. (<http://www.kremlin.ru/events/president/news/56957>), которое было охарактеризовано самим автором как чёткий, конкретный, подробный, а также реалистичный и обоснованный план действий.



Рис. 6. Динамика высокотехнологичного импорта и внутренних затрат на НИОКР
 Источник: расчёты Института исследований и экспертизы ВЭБ.РФ.

подход, без которого трудно представить эффективную работу системы управления наукой и технологическим развитием страны, в том числе реализацию масштабных программ и проектов, — это козырь РАН, располагающей уникальным корпусом учёных, специалистов, экспертов.

В связи с этим уместно привести два примера. Один из них — инициированные в 2022 г. Советом при Президенте Российской Федерации по науке и образованию три важнейших инновационных проекта государственного значения: научно-технологическая платформа оперативного реагирования на инфекционные заболевания, низкоуглеродная энергетика замкнутого цикла и единая национальная система мониторинга климатически активных веществ. В рамках последнего проекта, по солидарной оценке экспертов, удалось добиться наибольшего прогресса в реализации первого этапа (2022–2024)⁸. Проект объединил усилия более 60 организаций, подведомственных трём министерствам — генеральным заказчикам проекта (Минэкономразвития России, Минприроды России, Минобрнауки России), в том числе более 50 институтов семи отделений РАН. Только на выполнение первого этапа предусмотрено более 10 млрд руб., или более 3 млрд руб. в среднем в год, что беспрецедентно, имея в виду неблагоприятные тенденции финансирования российской науки. При этом следует принимать во внимание не только ожидаемые к 2030 г. научно-практические результаты важнейшего инновационного проекта, но и полученные к началу 2024 г.: они будут способствовать повышению качества проработки управленческих решений в сфере климатической политики страны и, главное, запуску ряда механизмов поддержки структурно-технологических сдвигов и модернизации российской экономики.

⁸ В целом проект рассчитан на перспективу до 2030 г. Подробнее см. [14].

Не меньшее значение имеет система организации важнейших инновационных проектов, которая, по мнению руководства Минэкономразвития России, оказывается эффективной и перспективной для тиражирования на другие крупные наукоёмкие междисциплинарные проекты.

Другой пример связан со Стратегией социально-экономического развития России с низким уровнем эмиссии парниковых газов до 2050 г.⁹ Она была разработана в рамках исполнения обязательств нашей страны по Парижскому соглашению по климату 2015 г. под эгидой Минэкономразвития России при активном участии экономистов ИМП РАН, которые внесли значительные коррективы в первоначальную версию документа. На основе модельных сценариев научно-технологического прогноза были рассчитаны перспективные спрос и предложение соответствующих технологий, выделены их категории по критериям удельной капиталоемкости затрат на снижение выбросов парниковых газов, доступности (наличия и степени локализации производства), а также дана оценка влияния этих технологий на динамику экономического роста. Важнейшим результатом стало обоснование целевого сценария стратегии, в рамках которого достижение так называемой углеродной нейтральности (баланс выбросов и поглощения CO₂), а эта цель зафиксирована в Климатической доктрине России (ноябрь 2023 г.), возможно к 2060 г. в рамках структурно-технологической модернизации экономики на основе использования главным образом уже имеющегося задела, а также новых отечественных разработок при сохранении приемлемых темпов долгосрочного экономического роста на уровне 3% в среднем в год [15].

⁹ Утверждена Распоряжением Правительства Российской Федерации от 29 октября 2021 г. № 3052-п. <http://static.government.ru/media/files/ADKkCzp3fWO32e2yA0BhtIpyzWfHaiUa.pdf>

ПРОСТРАНСТВЕННЫЙ ВЫЗОВ И “ВОСТОЧНЫЙ” ВЕКТОР НОВОЙ ПОЛИТИКИ ТЕРРИТОРИАЛЬНОГО РАЗВИТИЯ

Многие годы не затихает дискуссия относительно размеров территории России: богатство это или проклятие [16–18]. С нашей точки зрения, это, безусловно, богатство страны, её капитал, который нужно уметь использовать. В этом случае дискуссия переходит в другую плоскость в рамках дихотомии “большой вызов – эффективный ответ”. Российское государство, в том числе в последние десятилетия, искало и находило ответы на этот вопрос, но они не всегда оказывались успешными в долгосрочном плане, а значит, возникала необходимость в поиске новых решений, отвечающих требованиям модернизации хозяйственного комплекса, устойчивого социально-экономического развития и национальной безопасности страны [18].

Эта ситуация характерна и для нашего времени, когда правительством страны принята и реализуется Стратегия пространственного развития Российской Федерации на период до 2025 г. Двумя её приоритетами выступают развитие городских агломераций и восточных (Сибирского, Дальневосточного и Арктического) регионов страны. Второй приоритет соответствует общей установке поворота на Восток.

Учёные Российской академии наук, включая обществоведов, внесли и продолжают вносить в решение проблемы пространственного развития весомый вклад, в частности в рамках экспертизы (критический анализ и оценка) упомянутой стратегии, а также разработки конкретных рекомендаций по её качественному обновлению [19], в том числе в обоснование отказа от акцента на расширение крупнейших и крупных агломераций как на универсальный источник экономического роста [20], расширение, которое нарушает сбалансированное развитие поселенческой сети, установление межрегиональных связей, входит в противоречие с целями государственной программы Комплексного развития сельских территорий¹⁰.

Помимо экспертизы федеральных стратегий и программ в сфере пространственной политики, научно-практическая деятельность Академии наук охватывает как минимум два направления и механизма их реализации. Прежде всего речь идёт о деятельности региональных отделений РАН, включая новое Санкт-Петербургское отделение. Они могут обеспечить и реально обеспечивают разработку и сопровождение, а также экспертизу территориальных проектов развития, в том числе организацию этой работы непосредственно в регионах. Такая практика осуществляется практически всеми региональными

ми отделениями РАН. Второе направление – реализация масштабных исследовательских проектов (в первую очередь так называемых “100-миллионников” Минобрнауки России) в интересах регионов и всей России, когда внимание акцентируется на вопросах межрегионального взаимодействия и связывания пространства страны в единое целое.

Яркий пример – мегапроект социально-экономического развития Азиатской России¹¹, реализованный в 2020–2022 гг. группой академических институтов под эгидой Института экономики и организации промышленного производства СО РАН, с упором на совершенствование транспортных систем и укрепление межрегиональных связей. Один из важных результатов, полученных в рамках данного комплексного исследования, – оценка эффектов реализации больших инвестиционных проектов на территории Азиатской России: как оказалось, влияние подобных проектов на рост ВВП этого макрорегиона в 2–2.5 раза выше общероссийского (федерального) показателя, а для Сибирского федерального округа – в четыре и более раз. Есть серьёзные основания полагать (в частности, имея в виду поручения Президента России от октября 2023 г. по развитию Восточного полигона и строительству Северо-Сибирской железнодорожной магистрали, а также развитию международных транспортных коридоров в рамках мегапроекта КНР “Один пояс – один путь”), что это направление (меж)региональной политики и связанный с ним комплекс масштабных исследовательских работ получит продолжение уже в ближайшем будущем. А значит, усилится востребованность научного потенциала экономистов и других специалистов Российской академии наук.

ЛИТЕРАТУРА

1. Центральный банк России. Доклад “Региональная экономика: комментарии ГУ”. № 22. 6 сентября 2023 г. С. 24–31 (Врезка 1 “Ситуация на региональных рынках труда”). http://www.cbr.ru/Collection/Collection/File/46309/report_01092023.pdf [Central Bank of Russia. Report “Regional economy: comments of the GU”. № 22. 6 September 2023. С. 24–31 (Box 1 “The situation in the regional labour markets”)].
2. Подцераб М. Заводам мало кадров // Ведомости. 25.12.2023. С. 11. [Potserab, M. Plants are short of personnel // Vedomosti. 25.12.2023. P. 11].

¹¹ Полное название проекта “Социально-экономическое развитие Азиатской России на основе синергии транспортной доступности, системных знаний о природно-ресурсном потенциале, расширяющегося пространства межрегиональных взаимодействий” (грант на проведение крупных научных проектов по приоритетным направлениям научно-технологического развития Минобрнауки России № 075-15-2020-804 (№ 13.1902.21.0016) [21].

¹⁰ Утверждена постановлением Правительства Российской Федерации от 31 мая 2019 года № 696. <http://government.ru/rugovclassifier/878/events/>

3. Минэкономразвития призвало продлить нацпроект “Производительность труда”. <https://ria.ru/20231207/trud-1914328095.html> [The Ministry of economic development of Russia called for the extension of the national project “Labor productivity” <https://ria.ru/20231207/trud-1914328095.html>].
4. *Аганбегян А.Г.* Перспективы инновационного развития России (Часть I) // Российское конкурентное право и экономика. 2023. № 1. С. 8–21. <https://doi.org/10.47361/2542-0259-2023-1-33-8-21> [Aganbegian A.G. Prospects of Innovative Development of Russia (Part I) // Russian Competition Law and Economics. 2023. № 1. P. 8–21].
5. Расширенное заседание Президиума Государственного совета по вопросу “О развитии рынка труда в Российской Федерации”. Великий Новгород, 21 сентября 2023 года. <http://special.kremlin.ru/events/president/transcripts/72319> [Extended meeting of the Presidium of the State Council on the issue “On the development of the labor market in the Russian Federation”. V. Novgorod, 21 September 2023 <http://special.kremlin.ru/events/president/transcripts/72319>].
6. *Ивантер В.В.* Кто сказал, что нефть — это проклятье? // Российская газета. Федеральный выпуск № 42(6910). 28 февраля 2016 [Ivanter V. Who said oil is a curse...? // Rossiiskaia Gazeta. Federal Issue No. 42 (6910). 28 February 2016].
7. Путин заявил, что РФ довольно быстро слезает с “технологической иглы” Запада (встреча Президента России с молодыми учёными на федеральной территории “Сириус” 29 ноября 2023 г.). <https://tass.ru/politika/19413649> [Putin claimed the Russian Federation quite quickly getting off the “technological needle” of the West (the meeting of the President of Russia with young scientists on the “Sirius” federal territory on November 29, 2023)].
8. *Klepach, A., Vodovatov, L. and E. Dmitrieva.* Russian Science and Technology: Rise or Progressive Lag (Part I) // Studies on Russian Economic Development. 2022. Vol. 33. No. 6. Pp. 630–643].
9. Указ Президента Российской Федерации от 02.11.2023 № 818 “О развитии природоподобных технологий в Российской Федерации”. <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202311020021> [Decree of the President of the Russian Federation of 02.11.2023 No. 818 On the development of nature-like technologies in the Russian Federation <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202311020021>].
10. *Акаев А.А., Рудской А.И., Кораблёв В.В., Сарыгулов А.И.* Технологические и экономические барьеры роста водородной энергетики // Вестник РАН. 2022. № 12. С. 1133–1144 [A.A. Akaev, A.I. Rudskoy, V.V. Korablev, A.I. Sarygulov Technological and economic barriers to the growth of hydrogen energy // Herald of the Russian Academy of Sciences. 2022. № 6. P. 691–701].
11. National Academies of Sciences, Engineering and Medicine. 2023. Options for National Plan for Smart Manufacturing. Washington, DC. The National Academies Press.
12. The bosses of Britain’s new research agency explain its innovations. <https://www.economist.com/by-invitation/2022/08/11/the-bosses-of-britains-new-research-agency-explain-its-innovations>
13. Экономика научно-технологического прорыва и суверенитета / Науч. ред. А.Н. Клепач / Межведомственная рабочая группа по технологическому развитию при Правительственной комиссии по модернизации экономики и инновационному развитию, Институт исследований и экспертизы ВЭБ РФ. М., 2023. [The Economics of Scientific and Technological Breakthrough and Sovereignty. Science / Ed. A.N. Klepach. Interdepartmental Working Group on Technological Development under the Government Commission for Economic Modernization and Innovative Development, Institute for Research and Expertise of VEB RF. M., 2023].
14. *Shirov A.* Development of a System for Monitoring and Forecasting Emissions of Climatically Active Substances in the Interests of Modernization and Development of the Russian Economy // Studies on Russian Economic Development. 2023. V. 34. № 6. P. 728–737.
15. *Shirov A., Kolpakov A.* Target Scenario of Low Greenhouse Gas Emissions Socio-Economic Development of Russia for the Period until 2060 // Studies on Russian Economic Development. 2023. V. 34. № 6. P. 758–768.
16. *Гранберг А.Г.* Основы региональной экономики. М.: ГУ ВШЭ, 2000 [Granberg A.G. Basics of the regional economy. M.: GU HSE].
17. *Смирнягин Л.В.* Судьба географического пространства в социальных науках // Известия РАН. Серия географическая. 2016. № 4. С. 7–19 [Smirnyagin L. The fate of geographical space in social sciences // Izvestia RAS. Geographical series. 2016. № 4. С. 7–19].
18. *Швецов А.Н.* Российское пространство в процессе исторических переходов к разработке и реализации теории постсоветских системных преобразований организации socioeconomic пространства // Российский экономический журнал. 2021. № 6. С. 66–100. [Shvetsov A.N. Russian space in the process of historical transitions (towards the development and implementation of the theory of post-Soviet system transformations of the organization of the socio-economic space // Russian Economic Journal. 2021. (6):66–100. (In Russ.)].
19. *Кузнецова О.В., Дружинин А.Г.* К новой стратегии пространственного развития России // Проблемы прогнозирования. 2024. № 3 (в печати) [Kuznetsova O., Druzhinin A. Towards a New Strategy for Spatial Development of Russia // Studies on Russian Economic Development. 2024. № 3 (in press) (In Russ.)].

20. Постановление Правительства Российской Федерации от 31.05.2022 № 996 “Об утверждении Правил согласования, утверждения и мониторинга реализации долгосрочных планов социально-экономического развития крупных и крупнейших городских агломераций” https://economy.gov.ru/material/dokumenty/postanovlenie_pravitelstva_rf_ot_31052022_996.html [Decree of the Government of the Russian Federation of 31.05.2022 No. 996 “On approval of the Rules of coordination, approval and monitoring of the implementation of long-term plans for the socio-economic development of large and the largest urban agglomerations https://economy.gov.ru/material/dokumenty/postanovlenie_pravitelstva_rf_ot_31052022_996.html].
21. Новый импульс Азиатской России: источники и средства развития: в 2-х т. / Под ред. В.А. Крюкова, Н.И. Суслова. Институт экономики и организации промышленного производства Сибирского отделения РАН. Новосибирск: Изд-во ИЭОПП СО РАН, 2023. [New impetus for the Asian Russia: sources and means of development: in two volumes / Eds. Kryukov, V and Suslov, N. Novosibirsk: Institute of Economics and Organization of Industrial Production of the RAS Siberian Branch Publishers, 2023].

STRUCTURAL AND TECHNOLOGICAL SHIFTS AND MODERNIZATION OF THE RUSSIAN ECONOMY: MID-TERM AND LONG-TERM PROSPECTS

B.N. Porfiriev^{a,*}, A.A. Shirov^{a,}**

^aInstitute for Economic Forecasting of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

**E-mail: b_porfiriev@mail.ru*

***E-mail: schirov-mse@yandex.ru*

Structural and technological shifts and trends of the Russia economy modernization are considered within the context and as a strategic response to the four major challenges to the national security and sustainable development. The challenges above include: demographic (population shrinking and ageing) issues, technological lagging and dependence on imports; shortage of funding and loopholes in R&D organization and policy; and spatial development issues. “Mirrored” and counterbalanced to these the four major policy improvements currently implemented by the national government or nascent within research programs and projects carried out by the Russian Academy of Sciences’ institutions are introduced and contemplated. These involve (1) qualitative changes in the labor market structure and employment and imperatives of labor productivity growth as a damper to demographic burden on the economy; (2) shifts in the sectoral (industries), production and technological structure of the economy led by the accelerated development of manufacturing in late 2022-2023; (3) qualitative improvements in the R&D and science policy using the valuable past domestic and modern foreign experience in organization and management of disruptive (ambitious) research projects; and (4) balanced spatial development policy and its current and future major turn to eastwards.

Keywords: major challenges to development, labor and employment market, shifts in the sectoral structure of the economy, production and technological policy change, R&D policy improvements, spatial development shifts.

СТРУКТУРА БУДУЩЕГО МИРОВОГО ПОРЯДКА: ДИСКУССИОННЫЕ ВОПРОСЫ¹

© 2024 г. А.А. Дынкин^{а,*}

^аНациональный исследовательский институт мировой экономики и международных отношений
им. Е.М. Примакова РАН, Москва, Россия

*E-mail: dynkin@imemo.ru

Поступила в редакцию 26.04.2024 г.

После доработки 07.05.2024 г.

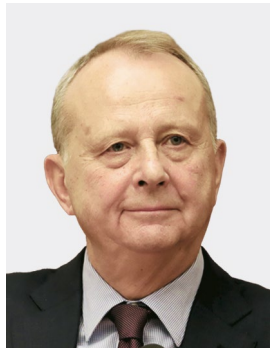
Принята к публикации 10.05.2024 г.

В докладе рассматриваются длинные макротренды и краткосрочные тенденции трансформации мирового порядка. Вводится авторская классификация систем международных отношений и предлагается интерпретация закономерностей их смены. Автор оценивает историческую динамику балансов экономической и военной мощи государств, влияние технологического прогресса, демографических процессов, идеологий на архитектуру будущего постоднопольного мирового порядка. Её контуры определяются противоречивым набором факторов, действующих как в сторону многополярности, так и в направлении новой биполярности.

Ключевые слова: мировой порядок, системы международных отношений, технологический прогресс, демографические тенденции, идеология, совокупный фактор производительности, полицентризм (многополярность), новая биполярность.

DOI: 10.31857/S0869587324030093, EDN: GGADRJ

Концепция *многополярного (многополюсного или полицентричного) мирового порядка*² впервые была сформулирована академиком Е.М. Примаковым в 1996 г. [1]. Как и всё новое, она не сразу была принята, однако явилась существенным вкладом в отечественную и мировую теорию международных отношений, стала мощной альтернативой западным подходам, прежде всего выдвинутому в работе С. Хантингтона “Столкновение цивилизаций” [2]. Она легла в основу реализованной Е.М. Примаковым идеи трёхстороннего сотрудничества России, Китая и Индии, которая затем получила практическое воплощение в форме группы стран БРИКС.



ДЫНКИН Александр Александрович — академик РАН, академик-секретарь Отделения глобальных проблем и международных отношений РАН, президент ИМЭМО им. Е.М. Примакова РАН.

Сегодня идея многополярности признана в мировой политологии, вошла в систему понятий и язык международной дипломатии, используется в доктринальных документах РФ. В 2015 г. мы предложили сценарий *новой биполярности* [3] как один из вариантов мирового развития. Сегодня многие и китайские, и американские исследователи говорят о формировании китаецентричного и американоцентричного полюсов [4, 5].

Обсуждению дихотомии “многополярность — новая биполярность” посвящён данный доклад.

Длинные макротренды. Мировая история свидетельствует, что новый мировой порядок возникает, как правило, *после завершения очередной*

¹ Полная версия доклада опубликована в журнале “Полис. Политические исследования”. 2024. № 5.

² Мировой порядок, или система международных отношений, — устойчивый набор институтов и норм военно-политических и экономических отношений, оформленный институционально и легитимный в международно-правовом смысле. Мировой порядок стабилен на протяжении активной жизни как минимум одного поколения — универсальной величины измерения социального времени. В результате геополитических макрокризисов возникают и нелегитимные системы, силовым образом навязанные победителем. Таким был однопольный мировой порядок.

войны (табл. 1). “Кухней”, где готовился мировой порядок, обычно выступала Европа. Возьмём последние 200 лет. После окончания наполеоновских войн возникла Венская система, которая просуществовала 100 лет. Вековая устойчивость этой системы связана с однородностью политической организации её стран-гарантов. Все члены “европейского концерта” были монархиями. После Первой мировой войны возникла Версальская система, которая продержалась недолго, всего 20 лет. Одна из причин её короткой жизни — исключение из неё СССР, Германии и Китая. Ялтинско-Потсдамская система формировалась победителями во Второй мировой войне. Её гарантами выступали державы “большой тройки” — СССР, США, Великобритания, а также Франция и Китай. Три проигравшие державы — Германия, Япония и Италия, были дискриминированы. Эта система просуществовала 45 лет и мыслилась как полицентричная, но быстро выродилась в биполярную. Началась холодная война. С роспуском Варшавского Договора и СССР она превратилась в однополярную, с доминированием Запада, прежде всего США, и, конечно, не учитывала интересы России, а с 2018 г. началась дискриминация и Китая. Февраль 2022 г. можно считать формальной датой ухода в прошлое однополярного мира.

Сегодня можно прогнозировать, что до обретения устойчивости новой постоднополярной системой пройдет не менее 10 лет.

Экономисты традиционно измеряют темпы технологического прогресса (ТП) с помощью показателя совокупной факторной производительности (СФП), то есть динамикой эффективности использования факторов производства — труда и капитала, а не их экстенсивным наращиванием. В такой интерпретации генерация новых научных и технологических идей недостаточна. Обязательно их массовое тиражирование.

Динамика прироста индикатора СФП в развитых странах на протяжении многих лет устойчиво снижается, это особенно заметно с середины 2000-х годов. Сегодня он ниже 1.5% и даже 1% (рис. 1). Сходная картина резкого замедления СФП наблюдалась и в Китае. Консенсусная интерпретация этой статистики сводится к тому, что основные эффекты третьей промышленной революции (то есть компьютерной революции) оказались по большей части исчерпаны, а новых прорывных технологий всеобщего назначения (таких как электричество, двигатели внутреннего сгорания или компьютеры и мобильная связь) не появилось.

Однако растут масштабы знаний, происходит формирование новых специальностей, возрастает роль эмоционального интеллекта, когнитивных функций. Всё это драматически меняет структуру капитальных активов (рис. 2). С начала XXI в. и до кризиса 2008 г. (2000–2007) больше 50% увеличения вклада капитала (инвестиций) в рост выпуска продукции приходилось на оборудование, а в 2019–2021 гг. почти 63% такого

Таблица 1. Система международных отношений (мировой порядок)

Система международных отношений	Период	Гаранты	Особенности
Венская, после Наполеоновских войн	1815–1914 99 лет	Россия, Австрия, Пруссия, Франция, Великобритания	Принцип сохранения баланса сил. Сформировано понятие “великая держава”. Оформление многосторонней дипломатии. Однородность участников — все члены “европейского концерта” — монархии
Версальская, после Первой мировой войны	1918–1939 21 год	Франция, Великобритания, США	Впервые к великим державам присоединились неевропейские государства — США и Япония. Создание наднациональной организации — Лиги Наций. Дискриминация побеждённых государств
Ялтинско-Потсдамская, после Второй мировой войны	1945–1991 46 лет	СССР, США, Великобритания, Франция, Китай	Биполярность, ядерное сдерживание, идеологическая и политическая конфронтация. Создание международных институтов: ООН, МВФ, Всемирного банка и проч.
Однополярная (Вашингтонский консенсус), после холодной войны	1992–2022 30 лет	США — единолично	Сформировалась без мирного договора после окончания холодной войны. Отсутствует концептуальная, институциональная и юридическая основа

Источник: систематизация А.А. Дынкина, ИМЭМО РАН

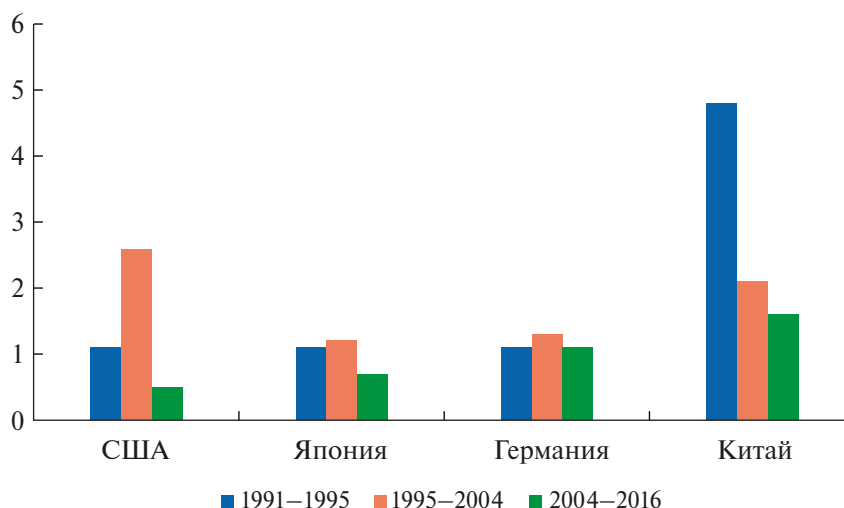


Рис. 1. Среднегодовые темпы прироста общей факторной производительности, %

Источник: расчёт ИМЭМО РАН по данным International Productivity Monitor. <http://www.csls.ca/ipm/ipm38.asp#:~:text=Martin%20Neil%20Baily%2C%20Barry%20P.%20Bosworth%20and%20Siddhi%20Doshi%0ALessons%20from%20Productivity%20Comparisons%20of%20Germany%2C%20Japan%2C%20and%20the%20United%20States%2%A0> (accessed 1.12.2023); World Bank Group, and the Development Research Center of the State Council, P.R. China. 2019. Innovative China: New Drivers of Growth. Washington, DC: World Bank. DOI: 10.1596/978-1-4648-1335-1. License: Creative Commons Attribution CC BY 3.0. <https://documents1.worldbank.org/curated/en/833871568732137448/pdf/Innovative-China-New-Drivers-of-Growth.pdf> (accessed 1.12.2023)

увеличения давали уже активы с интеллектуальной собственностью. Этот результат наших исследований говорит о перефокусировке технологического прогресса с конечной продукции на интеллектуальные технологии, что позволяет производить спектр инновационных продуктов и услуг, ориентированных на высокосегментированный спрос.

На ближайшую перспективу темпы технологического прогресса могут ускориться под влиянием разработки технологий искусственного интеллекта (ИИ), которые дадут старт новой промышленной революции. Отмеченная выше интеллектуализа-

ция основного капитала, в использовании которого будет применяться доверенный искусственный интеллект, придаёт реалистичность этим надеждам. Кроме того, ИИ — одна из критических областей технологического суверенитета. Неслучайно В.В. Путин назвал ИИ “сквозной, универсальной и, по сути, революционной технологией” [6]. Президент России объявил о подготовке новой редакции Национальной стратегии развития ИИ и соответствующего указа.

Американская стратегия сдерживания технологического развития России (по всем направлениям)

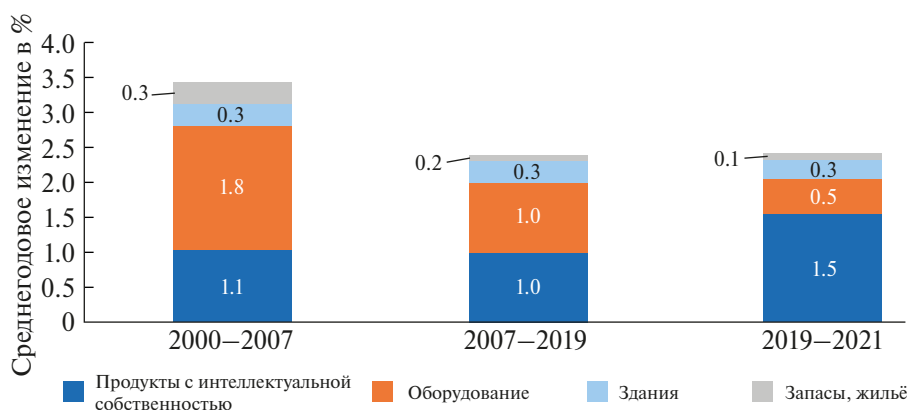


Рис. 2. Трансформация структуры капитала в частном секторе США

Источник: Total Factor Productivity for Major Industries – 2022. U.S. Bureau of Labor Statistics. https://www.bls.gov/news.release/archives/prod3_03232023.htm (accessed 02.12.2023).

и Китая (в сфере полупроводников, искусственного интеллекта, квантовых вычислений) ведёт к ожесточённой конкуренции в сфере высоких технологий, чреватой фрагментацией, различием технических стандартов, юридических норм и правил. И это аргумент в пользу новой биполярности.

Демографические процессы. Серьёзный риск, связанный с проблемой старения населения, — торможение инновационной активности, так как именно люди в возрасте до 40 лет, доля которых, будет падать в течение всего XXI в., — основные генераторы и потребители инноваций. Пока этот риск смягчается многочисленностью молодёжных когорт в Китае и Индии. Именно поэтому в этих двух странах фиксируется почти экспоненциальный рост патентования, массированного реинжиниринга и соответственно среднего класса.

Считаю, что Российской академии наук следует резко усилить научные и образовательные связи с Индией и с её динамично развивающимися соседями по Юго-Восточной Азии — Вьетнамом, Малайзией, Индонезией. Ожидаемая напряжённость на мировом рынке новых поколений инноваторов обостряет межстрановую конкуренцию за этот самый дефицитный ресурс. Думаю, мировой авторитет РАН — мощный инструмент по привлечению и удержанию молодёжи, формированию её творческой мотивации. Мы должны ещё раз заявить об этом в преддверии 300-летия Академии наук.

Идеология. Дирижизм³, или этатизм, — основной тренд и в экономической теории, и в экономической политике на Западе. Разворот в сторону огосударствления экономики начался с разочаровывающих результатов Вашингтонского консенсуса по переходу от плана к рынку в постсоциалистических странах. Финансовый кризис 2008–2009 гг. закрепил тренд на огосударствление, а пандемия коронавируса придала ему невиданные масштабы.

Растёт популярность установок так называемого культурного марксизма [7]. Суть этой стратегии в том, что направление социальных перемен задают обладающие личностным ресурсом интеллектуалы, с одной стороны, и стремящиеся утвердить своё “право на идентичность” маргиналы, с другой.

Подобные установки проталкиваются и в общественный дискурс. В нём уже доминируют идеи радикального феминизма, культуры отмены, анти-системного расизма и постколониализма, борьбы с глобальным потеплением и вообще “зелёной” повестки. *Пересмотр культурной нормы* сам по себе стал культурной нормой, и это способствует углублению размежевания в современных разделённых обществах, в первую очередь в США, но также и в странах Старой Европы [8].

Такие противоречивые внутрисполитические процессы деформируют и общественное сознание, и принятие внутрисполитических и внешнеполитических решений. Новые элиты крайне идеологизированы. Политическая система США всё менее эффективно регулирует экономику. Два рейтинговых агентства — Standard & Poor's и Fitch Ratings — понизили кредитный рейтинг США с высшего уровня AAA до AA+. В ноябре 2023 г. рейтинговое агентство Moody's понизило прогноз кредитного рейтинга США со “стабильного” на “негативный”. Все три агентства едины в определении главной причины такого понижения — нарастающей дисфункциональности политической системы. Во внешней сфере с начала века США разрушили 16 важнейших международных договоров и соглашений по контролю над вооружениями, по мировой торговле, климату, Арктике [9]. Другими словами, однополярный мировой порядок с его неограниченными аппетитами к экспансии привёл мир в зону сверхвысоких рисков. А доминирующие на Западе идеологемы несовместимы ни с российскими, ни с китайскими ценностно-политическими проектами. Поэтому в сфере идеологий будет нарастать жёсткая конфронтация, а это ещё один шаг к биполярности.

Учёные ИМЭМО РАН не раз предупреждали о стратегических просчётах Запада относительно надежд: во-первых, на экономическую катастрофу в России в результате беспрецедентной в новейшей истории санкционной войны; во-вторых, на неизбежность однополярного мироустройства; в-третьих, на возможность глобальной блокады нашей экспортно ориентированной экономики. Предупреждали не мы одни. В ответ — пропагандистские шаблоны: “страна-бензоколонка”, “региональная держава”, “порвём экономику в клочья”. Такая “экспертиза” заставила истеблишмент Вашингтона поверить в то, что Россия — нисходящая держава (declining power), стратегическими интересами которой можно безопасно пренебрегать. Подобная стратегическая невнимательность — следствие универсалистского мышления, продукт культуры политического Запада, возведение в абсолют англо-саксонской и европейской исторической традиции и политического опыта, непонимания сдвигов в распределении балансов сил в XXI в.

Сегодня Россия — четвёртая экономика мира по ППС, а в топ-5 мировых экономических держав входят три страны БРИКС и ни одной — из “цветущего сада” недавно уволенного Бореля. Теперь на пропагандистскую орбиту запущен новый нарратив: Россия вот-вот нападёт на Восточную Европу. На логическую нестыковку образов declining power и одновременно “агрессивного медведя” закрывают глаза. Такое примитивное, линейное восприятие сложных, нелинейных процессов ведёт к разочарованиям. Так уже было. Было, когда Запад убаюкивал себя сказками о том, что китайские реформы ведут к политическому плюрализму. Поэтому всё

³ Дирижизм — политика активного вмешательства в управление экономикой со стороны государства в середине 40-х годов XX в. во Франции и Великобритании.

время возникают сюрпризы! Складывается ощущение, что эксперты на Западе всё меньше понимают российские реалии. Они смотрят, образно говоря, в искажающее реальность зеркало заднего вида собственной риторике и пропаганды.

Главным сюрпризом стала фантастическая устойчивость экономики РФ. Возьму на себя смелость утверждать, что сегодня ни одна экономка мира, даже китайская, не выдержала бы такого агрессивного давления.

Высокая сопротивляемость экономики РФ внешним шокам объясняется тремя фундаментальными причинами.

Во-первых, это результат тяжёлых, иногда мучительных институциональных и структурных реформ. Но сегодня мы имеем самодостаточную, адаптивную и высоко диверсифицированную рыночную экономику.

Во-вторых, кризис 2022 г. был уже пятым в истории Новой России. Правительство, федеральные регуляторы, ЦБ накопили нелёгкий профессиональный опыт антикризисных и контрциклических стратегий. То же самое можно сказать и о бизнесе. Наши экономические субъекты раз за разом демонстрируют, что результативных решений всегда больше, чем проблем.

Наконец, в-третьих, Запад просчитался в способности изолировать нашу экономику. Двойное сдерживание России и Китая укрепляет связи между странами БРИКС.

Трансформации 2020-х годов. 2023 год показал, что мировая система не может ждать, пока Запад придёт

к осознанию бесперспективности не только эскалации, но и продолжения украинского конфликта. На встрече стран G20 в Нью-Дели мировое сообщество сделало первый шаг к постглобальному, постукраинскому миру. Имеется в виду, что глобализация по-американски, глобальное управление на основе западных правил (rules based order) остаётся в прошлом. Авторитет премьер-министра Индии Нарендра Моди не позволил Западу провести на саммите G20 конфронтационную резолюцию. В Сан-Франциско, на саммите стран АТЭС, ситуация на Украине также выпала и из обсуждения, и из заключительной резолюции. Как заявил недавно Др. Джайшанкар, министр иностранных дел Индии, долгосрочные последствия конфликтов в Ираке и Афганистане и относительное снижение экономического веса США — симптомы наступления полицентричного мира [10].

Важное событие 2024 г. из этого ряда — расширение объединения БРИКС (рис. 3). Потенциально его совокупная экономическая мощь достигает 67 трлн долл., что превышает суммарный ВВП стран “семёрки”. А ведь ещё 28 стран находятся в “листе ожидания”. БРИКС по ряду важнейших рынков (металлы, автомобилестроение, нефть, минеральные удобрения и др.) превосходит или не уступает потенциалу стран G7. Перед Россией, к которой переходит председательство в БРИКС в 2024 г., стоит задача активизации согласованной экономической и технологической политики стран-членов. Такая политика — институциональный блок будущего полицентричного мира.

Каким будет грядущий миропорядок? Какая из двух тенденций — к биполярности или полицентриз-

БРИКС ВВП по ППС, млрд долл., 2023 г.		Страны, вступившие в БРИКС в 2024 г.	В листе ожидания
Россия	5 056.5	Египет	Алжир, Бангладеш, Бахрейн, Белоруссия, Боливия, Венесуэла, Вьетнам, Куба, Гондурас, Индонезия, Казахстан, Кувейт, Марокко, Нигерия, Государство Палестина, Сенегал, Таиланд
Китай	32 897.9	Иран	
Индия	13 119.6	ОАЭ	
Бразилия	4 101	Саудовская Аравия	
ЮАР	997.4	Эфиопия	

Потенциал БРИКС+ в 2024 г. 67 трлн долл.; G7 — 54 трлн долл. (Прогноз МВФ 2024 г. по ППС)

Рынки	БРИКС+ в 2024		G7	
	Доля в мировом производстве, %	Доля в мировом производстве, %	Доля в мировом производстве, %	Доля в мировом производстве, %
Металлургия	70	65	14	14
Нефть	44	36	24	31
Минеральные удобрения	51	53	19	17
Продовольствие	57	58	15	16

Рис. 3. Экономический потенциал стран БРИКС
Источник: Расчёты ИМЭМО РАН по данным IMF, Food and Agriculture Organization, World Steel Association, Energy Transition Institute. Statistical Review of World Energy 2023, International Energy Agency.

му — возьмёт верх, сегодня сказать сложно. Скорее возможно их сопряжение: скажем, на глобальном Севере — жёсткая биполярность, а на глобальном Юге — полицентризм. На Севере биполярность — военная, экономическая и технологическая — уже просматривается. Любопытно, что в Нью-Дели принято относить КНР к странам Севера [11]. Такая точка зрения имеет под собой основания, поскольку Китай по показателю ВВП на душу населения (12 541 долл.) далеко опережает страны глобального Юга. Например, в Индии этот показатель равен 2 612 долл. [12]. За последние 10 лет Китай в ШОС, а США в Евроатлантике заметно вырвались вперёд. В совокупности на КНР и США приходится 42% номинального мирового ВВП, 56% мировых затрат на НИОКР, 53% мировых оборонных расходов. Разъединение экономик США и Китая идёт пока не в области торговли, а по каналу технологий и инвестиций. В первой половине 2023 г. приток прямых иностранных инвестиций в КНР упал до исторического минимума (рис. 4). Одновременно макрорегион АТР приобретает большую внутреннюю динамику, которая отличает его от Европы и Северной Америки (рис. 5).

Думаю, не стоит надеяться, что будущий мировой порядок окажется бесконфликтным. Мир сохранил многообразие, различие потенциалов стран и их конкуренцию. Важно, чтобы, несмотря на это, уважались интересы больших и малых стран, а проблемы решались путём конструктивного диалога.

Россия первая бросила вызов пресловутому однопольному мировому порядку. Сегодня можно констатировать, что большинство стран глобального Юга поддержали этот вызов, не согласились с западной трактовкой конфликта на Украине. Будущий мировой порядок формируется на наших глазах. Уверен, что многополярный мир предпочтительнее для России как развитой, самодостаточной и суверенной страны. Но такой мир требует и новой системы глобального управления. Её институты сегодня укрепляются: это БРИКС, G20, ШОС, ЕАЭС. Скажем, у стран-членов ЕАЭС (Россия, Белоруссия, Казахстан, Армения, Кыргызстан) дела идут гораздо лучше, чем у пяти других постсоветских стран. В 2022 г. ВВП на душу населения в странах Евразийского Союза в 3.5 раза превышал средний аналогичный показатель для пяти других стран СНГ, но не членов ЕАЭС (Азербайджан).

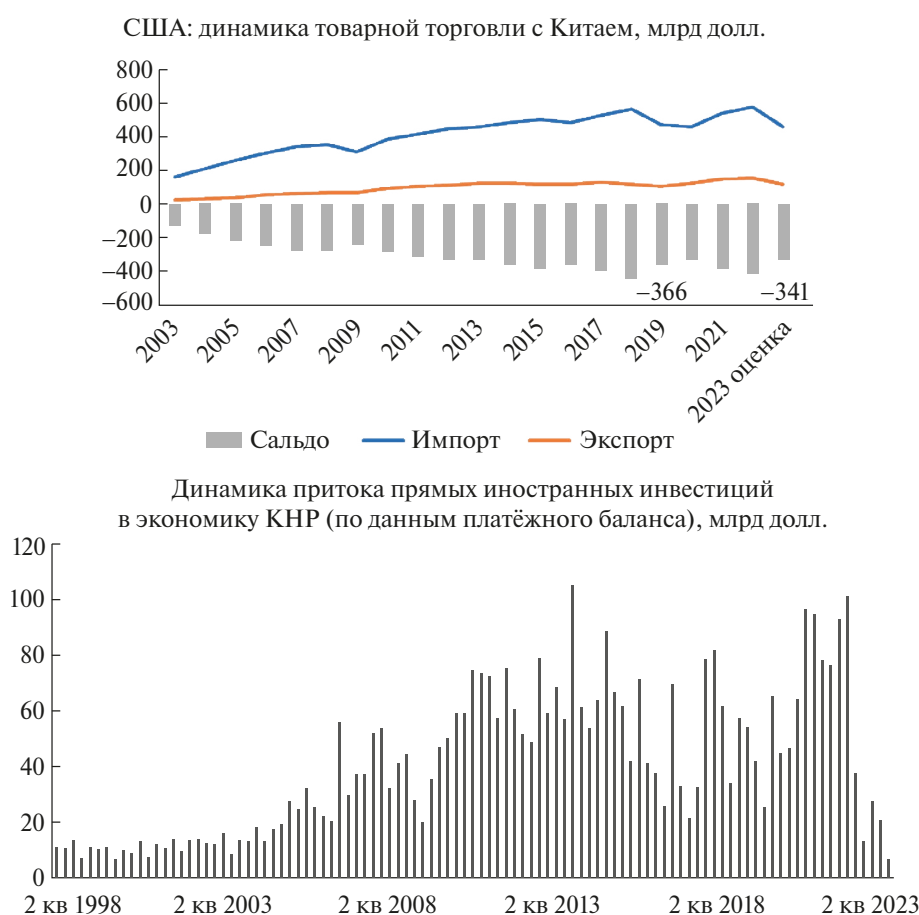
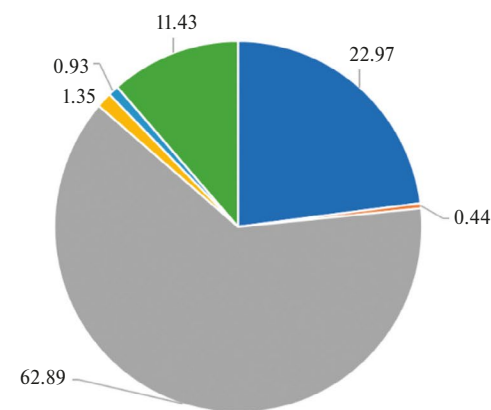


Рис. 4. Разъединение экономик Китая и США

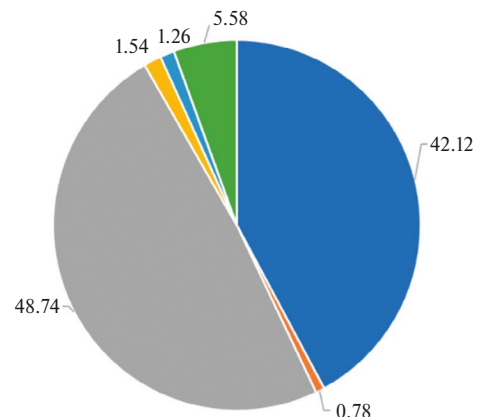
Источник: UN Comtrade Database. <https://comtradeplus.un.org/> (accessed 1.12.2023); State Administration of Foreign Exchange (SAFE) of the People's Republic of China. <https://www.safe.gov.cn/en/> (accessed 01.12.2023)

Удельный вес региона в совокупной внутрирегиональной торговле, %, 1990 г.



■ АТР
■ Европа
■ Ближний Восток
■ Африка
■ ЛАМик
■ Северная Америка

Удельный вес региона в совокупной внутрирегиональной торговле, %, 2021 г.



■ АТР
■ Европа
■ Ближний Восток
■ Африка
■ ЛАМик
■ Северная Америка

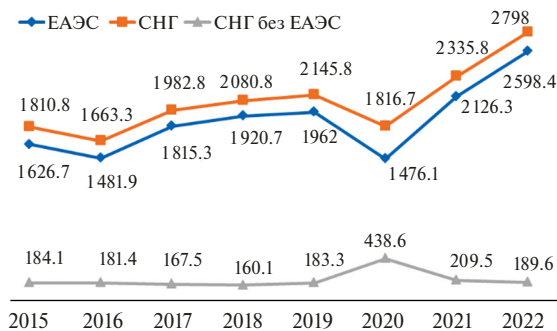
Рис. 5. Внутрирегиональная торговля: сдвиг в АТР

Источник: Asia Regional Integration Center. Integration Indicators Database. <https://aric.adb.org/database/integration> (accessed 01.12.2023).

жан, Молдавия, Таджикистан, Туркмения, Узбекистан) (рис. 6). Наша стратегия в этих организациях требует обоснованного подхода и видения с социально-экономической, научно-технологической и политической точек зрения. И здесь большая роль должна принадлежать РАН как лидеру научного и экспертного сообщества.

Подводя итоги, скажу, что есть весомые аргументы как в пользу *многополярности*, так и *новой биполярности*. Окончательные выводы относительно архитектуры будущего мирового порядка пока преждевременны. В условиях столь высокой неопределённости следует быть готовыми к любому сценарию развития событий. Основой такой готовности является стра-

ВВП, млрд долл.



Рост в текущих ценах в 2015–2022 гг.

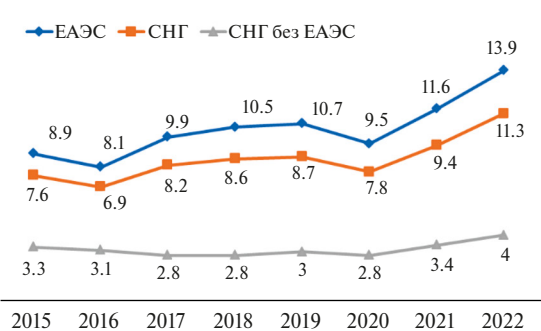
+59.7% +54.5% +8.4%

Реальный рост в 2015–2022 гг.

+7.3% +6%

СНГ без ЕАЭС:
Азербайджан
Молдавия
Таджикистан
Туркменистан
Узбекистан

ВВП на душу населения, тыс долл.



Рост в 2015–2022 гг.

+56,2% +48,6% +17,6%

Рис. 6. Экономическая динамика стран ЕАЭС и СНГ

Источник: ЕЭК. <https://eec.eaeunion.org/?ysclid=lr7rtdg7np631919243>; IMF. <https://www.imf.org/>; Всемирный банк. <https://www.worldbank.org/> (accessed 01.12.2023).

тегическая автономия России, опирающаяся на наш оборонно-промышленный комплекс, который позволяет сохранять военно-стратегический паритет с Соединёнными Штатами.

Фундаментальный вопрос, на который у меня сегодня нет ответа: насколько вероятно *установление нового мирового порядка без большой войны?* В 2024 г. в 50 странах мира, на которые приходится более 45% мирового ВВП и населения, пройдут президентские или парламентские выборы. Возможно, их результаты прояснят наше видение ближайшего будущего.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает благодарность коллегам по ИМЭМО РАН Р.И. Капелюшникову, В.Д. Миловидову, И.С. Семенову, И.В. Данилину, С.В. Жукову, К.В. Богданову, А.П. Гучановой за консультации и помощь в подготовке статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Примаков Е.М.* Международные отношения накануне XXI века: проблемы, перспективы // *Международная жизнь*. 1996. № 10. С. 3–13.
Primakov E.M. Mezhdunarodnye otnosheniya nakanune XXI veka: problemy, perspektivy [International Relations on the eve of 21st century: problems, prospects] // *Mezhdunarodnaya zhizn'*. 1996. № 10. S. 3–13.
2. *Huntington S.* The Clash of Civilization? // *Foreign Affairs*. 1993. Summer. V. 72. № 3. P. 22–49.
3. *Dynkin A., Burrows M.* Here's the Playbook for Getting U.S.–Russian Cooperation Back on Track // *The National Interest*. 2015. <https://nationalinterest.org/feature/heres-the-playbook-getting-us-russian-cooperation-back-track-14527> (accessed 30.11.2023).
4. *Yan Xuetong.* Political Leadership and Power Redistribution // *The Chinese Journal of International Politics*. 2016. V. 9. № 1. P. 1–26.
5. *Kupchan C.* Bipolarity is Back: Why It Matters // *The Washington Quarterly*. 2021. 44:4, 123–139. DOI: 10.1080/0163660X.2021.2020457
6. Конференция “Путешествие в мир искусственного интеллекта”. Ноябрь 2023 г. <http://www.kremlin.ru/events/president/transcripts/72811> (accessed 1.12.2023).
Konferencia “Puteshestvie v mir iskusstvennogo intellekta”. Noyabr' 2023. [Conference “Artificial Intelligence Journey” November 2023.]
7. *Mendenhall A.* Cultural Marxism is Real // *The James G. Martin Center for Academic Renewal*. 2019. Jan 4. <https://www.jamesgmartin.center/2019/01/cultural-marxism-is-real/> (accessed 2.12.2023).
8. *Семенов И.С.* Разделённые общества // *Идентичность: личность, общество, политика. Новые контуры исследовательского поля* / Отв. ред. И.С. Семенов. М.: Весь мир, 2023. С. 27–35.
Semenenko I.S. Razdelyonnye obshchestva // *Identichnost': lichnost', obshchestvo, politika. Novye kontury issledovatel'skogo polya* [Identity: The Individual, Society, and Politics. New Outlines of the Research Field] / Отв. ред. I.S. Semenenko. М.: Ves' mir, 2023. S. 27–35.
9. *Дынкин А.А.* Международная турбулентность и Россия // *Вестник РАН*. 2020. № 3. С. 208–219. DOI 10.31857/S0869587320030032
Dynkin A.A. Mezhdunarodnaya tubulentnost' i Rossiya [International Turbulence and Russia] // *Vestnik RAN*. 2020. № 3. С. 208–219. DOI 10.31857/S0869587320030032
10. Dominance of US is changing... Washington is adjusting to multipolar world': Jaishankar // *Hindustan Times*. September 2023. <https://www.hindustantimes.com/india-news/dominance-of-us-is-changing-washington-is-adjusting-to-multipolar-world-jaishankar-101695821761148.html> (accessed 4.12.2023).
11. *Jaishankar S.* The India Way: Strategies for an Uncertain World. Harper Collins, 2020. P. 240.
12. World Economic Outlook Database. International Monetary Fund. October 2023. <https://www.imf.org/en/Publications/WEO/weo-database/2023/October> (accessed 4.12.2023).

THE STRUCTURE OF THE FUTURE WORLD ORDER: CONTROVERSIAL ISSUES

A.A. Dynkin^{a,*}

^aPrimakov National Research Institute of World Economy and International Relations, Russian Academy of Sciences (IMEMO)

**E-mail: dynkin@imemo.ru*

The article considers macro-trends and short-term trends in the transformation of the world order. The author introduces the classification of international relations systems and proposes an interpretation of their change patterns. The author evaluates the historical dynamics of the balance of economic and military power of states, the influence of technological progress, demographic trends, and ideologies on the architecture of the future, post-unipolar world order. Its contours are determined by a contradictory set of factors acting both towards multipolarity and towards a new bipolarity.

Keywords: world order, systems of international relations, technological progress, demographic trends, ideology, aggregate productivity factor, polycentrism (multipolarity), new bipolarity.

НАУЧНАЯ СЕССИЯ ОБЩЕГО СОБРАНИЯ ЧЛЕНОВ РАН

НАУЧНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРИОРИТЕТНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

© 2024 г. Я.П. Лобачевский^{a,*}

^aОтделение сельскохозяйственных наук РАН, Москва, Россия

*E-mail: lobachevsky@yandex.ru

Поступила в редакцию 26.02.2024 г.

После доработки 26.02.2024 г.

Принята к публикации 05.03.2024 г.

В статье, подготовленной в рамках доклада на общем собрании членов РАН, рассматривается научное обеспечение приоритетных технологий и технических средств, которые необходимы для развития агропромышленного комплекса Российской Федерации. Основные усилия учёных Отделения сельскохозяйственных наук РАН направлены на повышение плодородия почвы, предотвращение опустынивания и деградации земель, получение продуктивных сортов растений и пород животных на базе новейших генетических технологий, создание эффективных вакцин и средств защиты растений, разработку автоматизированных и роботизированных технических средств для растениеводства и животноводства, производство функциональных безопасных продуктов питания, формирование экономических моделей развития сельского хозяйства.

Ключевые слова: агропромышленный комплекс, приоритетные технологии, плодородие почв, мелиорация, генетические технологии, селекция, сорта, породы, системы машин и технологий, машины и агрегаты, продукты питания.

DOI: 10.31857/S0869587324030102, EDN: GFXGCD

Доктрина продовольственной безопасности. Россия обладает огромным природным потенциалом, который включает около 200 млн га сельхозугодий, 120 млн га продуктивной пашни, более 50% мировых чернозёмов, 20% пресной воды. На каждого жителя страны приходится 1.5 га сельскохозяйственных угодий, что почти в 3 раза превышает мировые показатели. Имея такие ресурсы, можно не только снабдить качественным продовольствием собственное население, но и занять большой сегмент мирового продовольственного рынка [1]. Одна из главных ролей в достижении этой цели отводится сельскохозяйственной науке.



ЛОБАЧЕВСКИЙ Яков Петрович — академик РАН, академик-секретарь Отделения сельскохозяйственных наук РАН.

В соответствии с Доктриной продовольственной безопасности Российской Федерации наука и производство должны обеспечить граждан качественными отечественными продуктами на 90–95% [2]. Достичь продовольственного суверенитета можно путём внедрения в производство приоритетных инновационных технологий и технических средств.

Разнообразие почвенно-климатических условий обуславливает потребность в регионально-ориентированных, адаптивных технологиях, которые создаются в результате комплексных фундаментальных и поисковых научных исследований Отделения сельскохозяйственных наук РАН (ОСХН РАН). Федеральная научно-техническая программа (ФНТП) развития сельского хозяйства на 2017–2030 гг. направлена именно на самообеспечение важнейшими продуктами питания. Её подпрограммы реализуются при активном участии учёных отделения. Это селекция и семеноводство картофеля и сахарной свёклы, получение отечественных кроссов птицы. Кроме того, на завершающем этапе подготовки находятся ещё несколько актуальных подпрограмм. Результаты проведённых исследований создают предпосылки для научно-технологического развития агропромышленного комплекса (АПК) страны.

Показатели состояния сельского хозяйства России. По данным Росстата, в 2022 г. индекс физического объёма сельскохозяйственной продукции составил 110%, в том числе продукции растениеводства — 116%, животноводства — 103%. Это очень весомый результат, достигнутый за последние 10 лет, в течение которых среднегодовой прирост этого показателя составил 3.5%. Валовый годовой сбор зерна стабильно высок — 130–140 млн т. Значительно повысился уровень рентабельности сельскохозяйственных организаций — 25% в 2022 г. Доля прибыльных хозяйств увеличилась до 86% [3].

Наша страна существенно продвинулась в импортозамещении и достижении технологической независимости на внутреннем рынке продовольствия. Однако эта проблема ещё не решена в полной мере, особенно в плане обеспечения отечественным семенным материалом некоторых важных культур, породами скота и птицы, средствами защиты растений, ветеринарными препаратами, пищевыми ингредиентами, сельскохозяйственной техникой и оборудованием. Всё это требует огромного внимания и усилий.

Главной составляющей технологического развития страны и основой применения инновационных технологий служат сохранение и эффективное использование земельных ресурсов, особенно пашни, поскольку именно она определяет показатели производства продукции и экологическую ситуацию.

Сохранение плодородия почв и охрана агроландшафтов. В последние десятилетия почвы во всём мире подвергаются интенсивной деградации, в основном из-за колебания климата, экстремальных природных явлений, несоблюдения норм землепользования и агротехнологий. Эти факторы запускают такие каскадные процессы в агроэкосистемах, как эрозия почв, нарушение агрохимического и водного баланса. Несвоевременные меры по стабилизации экологической обстановки не могут компенсировать стремительную деградацию. В связи с этим необходимы более активное внедрение восстановительных технологий и создание устойчивых агроэкосистем.

Снижение плодородия почв ввиду крайне недостаточных объёмов внесения органических и минеральных удобрений до сих пор остаётся системной проблемой. В частности, вносится в среднем около 1 т/га органических удобрений при рекомендуемой норме 20–25 т/га [4].

Технологический суверенитет в АПК. Развитие АПК России происходит в условиях острых геополитических и социально-экономических противоречий, поэтому был установлен курс на импортозамещение и технологический суверенитет. Продовольствие становится конвертируемым активом и альтернативой энергоносителям, обеспечивая стабильность внутри страны и мощное влияние на внешние рынки.

Россия экспортирует продовольствие в более чем 140 стран, а валютная выручка достигает 50 млрд долл. в год [5]. Однако, несмотря на рекорды последних лет, в которых велика заслуга учёных РАН и работников сельского хозяйства, современный уровень производства не вполне соответствует потенциалу наших почвенно-земельных ресурсов и устойчивости агроландшафтов, а научные достижения не реализуются должным образом.

Мелиоративный комплекс. Из 120 млн га потенциальных посевных площадей 37 млн выведены из землепользования, частично деградированы и практически не используются. В связи с этим в 2021 г. была утверждена Государственная программа эффективного вовлечения в оборот земель сельскохозяйственного назначения и развития мелиоративного комплекса Российской Федерации. Она рассчитана на 10 лет, за которые планируется повторно ввести в оборот более 13 млн га. На реализацию этого проекта из бюджета будет направлено свыше 530 млрд руб. [6]. В рамках программы в Почвенном институте им. В.В. Докучаева разработаны государственный стандарт качества почв России, государственный реестр почвенных ресурсов, методология формирования адаптивно-ландшафтных систем земледелия, мониторинга состояния почв, картографирования угодий.

Поскольку огромная роль в защите и улучшении почв принадлежит мелиорации, важно на современной основе возродить мелиоративные технологии и все их компоненты, включая установку гидротехнических сооружений, орошение сухих почв, осушение переувлажнённых, рекультивацию, борьбу с эрозией. Необходимо системно укреплять технологическую базу, используя новейшие научные достижения.

Природоподобные технологии. 2 ноября 2023 г. вышел Указ Президента РФ о развитии природоподобных технологий, согласно которому оценка, прогнозирование и регулирование антропогенного воздействия на окружающую среду становятся одной из задач научно-технологического развития страны.

Серьёзная экологическая проблема — утилизация отходов животноводства, которые в последнее время позиционируются как побочная продукция отрасли. На базе отечественного оборудования разработаны инновационные технологии для получения и использования органических удобрений из побочных продуктов, а также мобильные технические средства для их внесения в почву (рис. 1). Таким образом, открывается перспектива производства до 400 млн т органических удобрений в год [7].

Генетические технологии и селекционный процесс в растениеводстве. В настоящее время генетические ресурсы, составляющие основу селекции, становятся стратегической базой продовольственной безопасности страны. Ведущая генетическая коллекция растений сосредоточена во Всероссийском институте

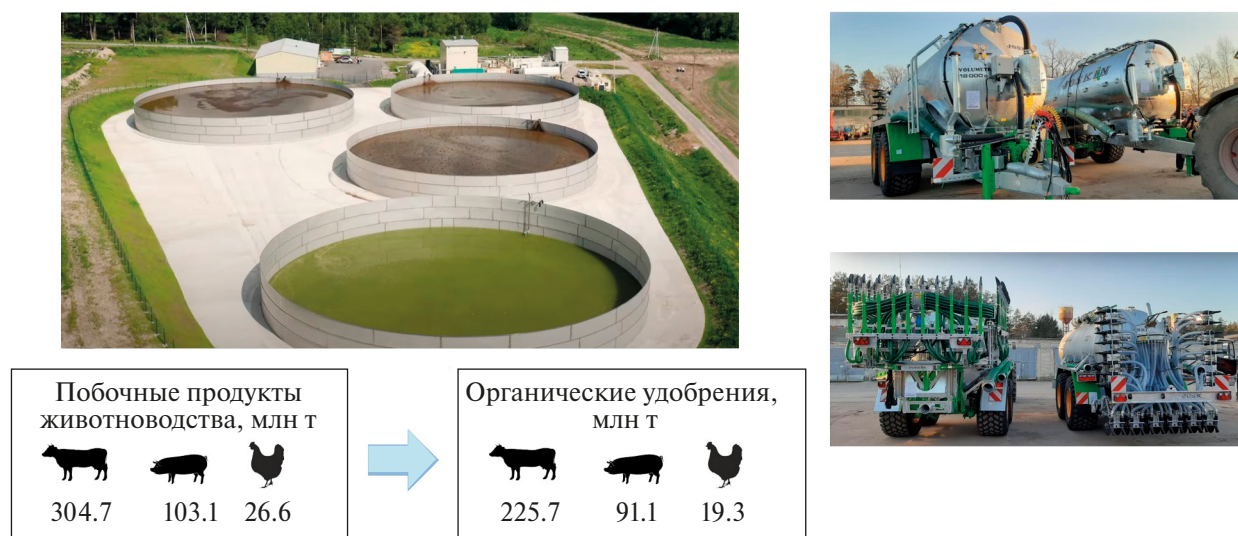


Рис. 1. Научно-производственный центр переработки побочных продуктов животноводства

генетических ресурсов им. Н.И. Вавилова, объём которой — более 320 тыс. уникальных образцов [8]. Благодаря отечественному генофонду учёными ОСХН РАН создано более 10 тыс. сортов и гибридов сельскохозяйственных культур. Все они внесены в Государственный реестр селекционных достижений [9].

Реализация генетического потенциала животных. Важная составляющая технологического развития АПК — научное обеспечение животноводства, включая получение пород и кроссов животных, птиц, аквакультуры, а также современных технологий их разведения и содержания.

Сельскохозяйственные животные играют одну из ключевых ролей в полноценном питании человека. По данным Продовольственной и сельскохозяйственной организации ООН, они покрывают 40% потребляемого белка и 20% общего количества калорий. Задача учёных — ускорить появление новейших генетических технологий, повысить степень реализации генетического потенциала, вывести новые породы, обеспечить здоровье животных и их репродукцию. К настоящему времени во ВНИИ животноводства им. Л.К. Эрнста (ВИЖ им. Л.К. Эрнста) и его филиалах сформирована сетевая биоресурсная коллекция животных:

- генофондное хранилище криоконсервированной спермы овец и коз (ВНИИ овцеводства и козоводства — филиал Северо-Кавказского федерального научного аграрного центра);
- криобанк генетических ресурсов лошадей (ВНИИ коневодства);
- криобанк спермы медоносной пчелы (Федеральный научный центр пчеловодства);
- коллекция спермы крупного рогатого скота (ВНИИ генетики и разведения сельскохозяйственных животных — филиал ВИЖ им. Л.К. Эрнста);

- банк домашних и диких видов животных и птицы (Федеральный исследовательский центр ВИЖ им. Л.К. Эрнста);

- генетическая коллекция редких и исчезающих пород кур (ВНИИ генетики и разведения сельскохозяйственных животных — филиал ВИЖ им. Л.К. Эрнста).

Использование этого уникального генетического потенциала в племенной работе позволило получить и апробировать свыше 40 новых высокопродуктивных пород, типов, линий и кроссов животных и птицы [10]. Дальнейшее повышение конкурентоспособности отрасли животноводства может быть достигнуто путём развития генетических и репродуктивных технологий, современных методов лечения, создания тест-систем и вакцин, внедрения роботизированных систем содержания и кормления животных [11].

Системы машин нового поколения. Реальной технико-технологической самодостаточности удалось добиться ещё в 1950—1980-х годах благодаря системе машин и технологий для комплексной механизации и автоматизации сельскохозяйственного производства (Всесоюзный институт механизации, ВИМ), которые развивались и дополнялись параллельно с развитием АПК. В настоящее время для обеспечения технологического суверенитета необходимо внедрять современные технические средства, машины и оборудование нового поколения для всех отраслей АПК. Важна активная научная и научно-техническая работа, нужно возродить систему машин для растениеводства и животноводства, безусловно, на новой научной и технологической основе.

Система машин представляет собой научно-обоснованную совокупность технических средств (или типажей) с множеством гармонизированных технических, технологических, экологических,

экономических, эксплуатационных параметров [12]. Структурной основой системы машин для растениеводства служат мобильные энергетические средства, или же, по-простому, тракторы, на базе которых формируются комплексы агрегатов. В Федеральном научном агроинженерном центре ВИМ разработана концепция современного трактора – энергонасыщенное, автоматизированное и роботизированное мобильное энергосредство многофункционального назначения, оснащённое электроприводом или гибридным приводом, мехатронными узлами и агрегатами, системой автоматического вождения на основе технического зрения [13]. С помощью искусственного интеллекта осуществляются управление рабочими процессами и контроль технического состояния как самого энергосредства, так и операционных машин (рис. 2).

Приоритетные группы технических средств. Поскольку невозможно одновременно сформировать всю совокупность технических средств, разработку системы машин и технологий, на наш взгляд, целесообразно начинать с приоритетных групп техники. В первую очередь это машины и оборудование для селекции, производства картофеля и других овощей, садоводства, а также реабилитации деградированных угодий и рекультивации земель. Безусловно, новая система должна строиться на современной технологической основе. Эта работа уже проводится совместно с ведущими институтами Российской академии наук. Особое внимание уделяется автоматизированным и роботизированным машинам и агрегатам, интеллектуальной технике, цифровым технологиям, биомашинным устройствам, электронной элементной базе, применению новых материалов в конструкциях машин.

Беспилотные наземные и летательные аппараты стремительно внедрились во многие сферы деятельности, в том числе в сельское хозяйство (рис. 3). Ведётся поиск различных платформенных решений, создаются конструктивно-технологические схемы, методы мониторинга, технические средства для оценки состояния полей, почвы, растений, урожайности, картографирования, контроля качества различных технологических операций [14]. Кроме того, пристальное внимание уделяется технологиям, техническим средствам и программному обеспечению выполнения точных операций с целью, например, оперативного подавления очага заболеваний или вредителей, локального внесения химических средств и минеральных удобрений [15].

Получение функциональных продуктов питания. Другая важная проблема, которой занимаются учёные ОСХН РАН, – производство функциональных продуктов питания, хлебобулочных, мясных, молочных продуктов, безалкогольных и спиртных напитков [16].

Коллективом Секции хранения и переработки сельскохозяйственной продукции совместно с Отделением медицинских наук РАН предложена парадигма “единого здоровья” на основе качественного безопасного питания [17]. Идея заключается в тесной взаимосвязи элементов биосферы при формировании состава и свойств сырья, внедрении экологически чистых технологий производства продуктов путём сквозного контроля технологической дисциплины и загрязнений на всех этапах: обработка почвы, возделывание растений, внесение удобрений и химикатов, уборка, послеуборочная обработка, пищевые производства [18]. Реализация парадигмы зависит от слаженного участия в ней учёных нескольких отделений Академии наук.

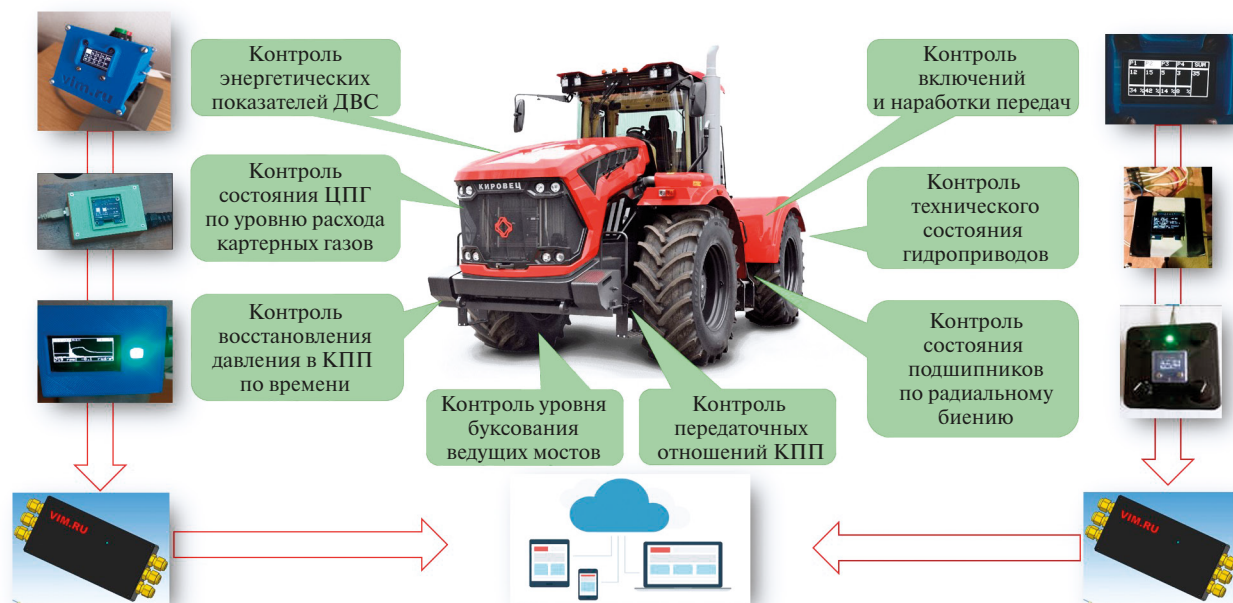


Рис. 2. Система контроля технического состояния мобильных энергосредств

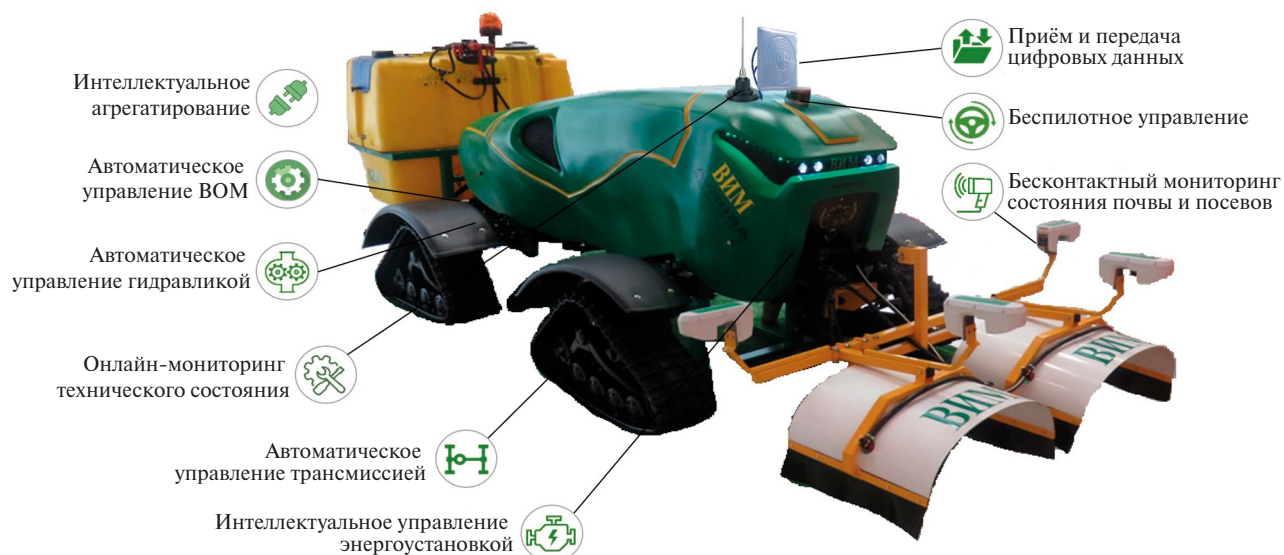


Рис. 3. Беспилотное мобильное роботехническое средство

Один из проблемных вопросов – оборудование пищевых производств. В последние годы предпринимаются попытки создания отечественного инновационного оборудования. На рисунке 4 показаны опытно-промышленные агрегаты для производства

соков и молочных продуктов, сконструированные учёными ОСХН РАН.

Экономические модели АПК и социального развития села. Отделение сельскохозяйственных наук РАН также занимается решением важного бло-



Рис. 4. Передвижной цех по производству молочных продуктов

ка научных проблем, связанных с разработкой эффективных экономических моделей развития АПК, рационального землепользования и землеустройства, методов и механизмов регулирования земельных отношений, социального развития села [19].

Научные кадры высшей квалификации. Без хорошо подготовленных специалистов невозможно осуществлять научные исследования, достичь научно-технического прогресса, формировать научную среду в целом. Возвращать молодое поколение следует всем научным организациям, если они хотят остаться на плаву и успешно развиваться. Конечно, можно сожалеть об отсутствии мотивации у молодёжи и ссылаться на существующие проблемы: маленькие аспирантские стипендии, недостаточность контрольных цифр приёма, неясные перспективы и т.д. Однако в первую очередь нужно формировать привлекательную молодёжную научную среду, хотя это непростая задача. В Федеральном научном агроинженерном центре ВИМ этим прицельно занимаются уже более 10 лет.

Благоприятная научная среда включает множество компонентов. Это магистратура, в которой сочетаются образовательные программы и работа в лабораториях, набор перспективных специальностей в аспирантуре и докторантуре, диссертационные советы, научные журналы, современные приборы и оборудование, хорошо оснащённые рабочие места. Огромную роль играют социальная поддержка молодёжи, обеспечение жильём, содействие в получении субсидий на приобретение жилья, научные гранты, участие в конкурсах на получение именных стипендий. Не стоит забывать и об организации активной внутренней жизни, спортивных и общественных мероприятий, поддержании своеобразного соперничества между коллективами.

Труд наставников, свободная творческая атмосфера, мотивация и чёткая перспектива, пример старших товарищей — вчерашних аспирантов, а ныне докторов наук, выросших в руководителей научных подразделений, общая атмосфера — всё это генерирует новое поколение молодых учёных. Кроме того, научная среда несёт воспитательную функцию, формирует сплочённость и патриотизм [20].

В 2023 г. конкурс в магистратуру и аспирантуру ВИМ составил 5 человек на место. Молодёжный научный коллектив за последние 5 лет увеличился втрое и сейчас насчитывает около 300 человек. Стремятся привлекать молодых учёных и Почвенный институт им. В.В. Докучаева, Федеральный исследовательский центр животноводства им. Л.К. Эрнста, Всероссийский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова, Федеральный научный центр пищевых систем им. В.М. Горбатова, Федеральный исследовательский центр “Фундаментальные основы биотехнологии” РАН и другие учреждения [21]. Мы должны продолжать двигаться

в этом направлении, чтобы вырастить достойную и надёжную смену, сохранить преемственность научных школ и богатых научных и духовных традиций Российской академии наук.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Алтухов А.И.* (2024) Агропромышленный комплекс страны: состояние и возможности развития // Экономика, труд, управление в сельском хозяйстве. № 1 (107). С. 7–24.
Altukhov A.I. (2024) Agro-industrial complex of the country: state and development opportunities. Economics, labor, management in agriculture, no. 1 (107), pp. 7–24. (In Russ.)
2. *Алтухов А.И.* (2023) Особенности обеспечения продовольственной безопасности России в условиях санкционного давления // Экономика, труд, управление в сельском хозяйстве. № 4 (98). С. 5–17.
Altukhov A.I. (2023) Features of ensuring Russia's food security under the conditions of sanctions pressure. Economics, labor, management in agriculture, no. 4 (98), pp. 5–17. (In Russ.)
3. *Ушаев И.Г., Папцов А.Г., Алтухов А.И.* (2022) Развитие экспортной инфраструктуры продукции АПК. М.
Ushachev I.G., Paptsov A.G., Altukhov A.I. (2022) Development of the export infrastructure of agricultural products. Moscow. (In Russ.)
4. *Иванов А.Л.* (2019) Научно-технологическое развитие землепользования с использованием цифровых технологий в земледелии // Вестник РАН. № 5. С. 522–524.
Ivanov A.L. (2019) Scientific–Technological Development of Land Use on the Basis of Digital Technologies in Agriculture. Herald of the Russian Academy of Sciences, no. 2, pp. 199–200.
5. *Белобров В.П., Юдин С.А., Ермолаев Н.Р. и др.* (2021) Структура почвенного покрова и технологии возделывания сельскохозяйственных культур // Вестник российской сельскохозяйственной науки. № 4. С. 53–57.
Belobrov V.P., Yudin S.A., Ermolaev N.R. et al. (2021) The structure of soil cover and technologies of cultivation of agricultural crops. Bulletin of the Russian agricultural science, no. 4, pp. 53–57. (In Russ.)
6. *Дубенок Н.Н.* (2023) Водно-энергосберегающие режимы на мелиорированных землях — основа повышения конкурентоспособности сельскохозяйственного производства // Известия Международной академии аграрного образования. № 65. С. 35–40.
Dubenok N.N. (2023) Water-saving regimes on reclaimed lands are the basis for increasing the competitiveness of agricultural production.

- Proceedings of the International Academy of Agricultural Education, no. 65, pp. 35–40. (In Russ.)
7. Брюханов А.Ю., Васильев Э.В., Шалавина Е.В. и др. (2023) Инструмент для мониторинга экологического состояния и устойчивого развития сельскохозяйственного производства // Техника и технологии в животноводстве. № 1 (49). С. 78–84.
Bryukhanov A.Yu., Vasiliev E.V., Shalavina E.V. et al. (2023) A tool for monitoring the ecological state and sustainable development of agricultural production. Machinery and technologies in animal husbandry, no. 1 (49), pp. 78–84. (In Russ.)
8. Лоскутов И.Г., Супрун И.И., Цой М.Ф. и др. (2023) Перспективы развития национальной сетевой коллекции генетических ресурсов растений // Генетические ресурсы растений для генетических технологий. Тезисы докладов Всероссийской научной конференции, проходящей в рамках Второго научного Форума “Генетические ресурсы России”. Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н.И. Вавилова. С. 193–194.
Loskutov I.G., Suprun I.I., Tsoi M.F. et al. (2023) Prospects for the development of the national network collection of plant genetic resources. Plant genetic resources for genetic technologies. Abstracts of the All-Russian Scientific Conference, held within the framework of the Second Scientific Forum “Genetic Resources of Russia”. Federal Research Center All-Russian Institute of Plant Genetic Resources named after N.I. Vavilov, pp. 193–194. (In Russ.)
9. Лукомец В.М., Трунова М.В., Демури Я.Н. (2021) Современные тренды селекционно-генетического улучшения сортов и гибридов подсолнечника во ВНИИМК // Вавиловский журнал генетики и селекции. № 4. С. 388–393.
Lukomets V.M., Trunova M.V., Demurin Ya.N. (2021) Modern trends in breeding and genetic improvement of sunflower varieties and hybrids in VNIIMK. Vavilovsky Journal of Genetics and Breeding, no. 4, pp. 388–393. (In Russ.)
10. Зиновьева Н.А. (2022) Биоресурсные коллекции сельскохозяйственных животных: типы коллекций и области применения // Генетические ресурсы России. Сборник тезисов пленарных докладов I Научного форума. М. С. 16.
Zinovieva N.A. (2022) Bioresource collections of farm animals: types of collections and applications. Genetic resources of Russia. Collection of abstracts of the plenary reports of the I Scientific Forum. Moscow. P. 16. (In Russ.)
11. Морозов Н.М., Кирсанов В.В., Ценч Ю.С. (2023) Историко-аналитическая оценка развития процессов автоматизации и роботизации в молочном животноводстве // Сельскохозяйственные машины и технологии. № 1. С. 11–18.
Morozov N.M., Kirsanov V.V., Tsench Yu.S. (2023) Historical and analytical assessment of the development of automation and robotization processes in dairy farming. Agricultural machines and technologies, no. 1, pp. 11–18. (In Russ.)
12. Лобачевский Я.П., Ценч Ю.С. (2022) Принципы формирования систем машин и технологий для комплексной механизации и автоматизации технологических процессов в растениеводстве // Сельскохозяйственные машины и технологии. № 4. С. 4–12.
Lobachevsky Ya.P., Tsench Yu.S. (2022) Principles of formation of machine systems and technologies for complex mechanization and automation of technological processes in crop production. Agricultural machines and technologies, no. 4, pp. 4–12. (In Russ.)
13. Лачуга Ю.Ф., Стребков Д.С., Годжаев З.А., Редько И.Я. (2020) Электрификация сельскохозяйственных мобильных энергосредств на основе тягово-энергетической концепции развития техники // Вестник РУДН. Серия “Инженерные исследования”. № 4. С. 260–270.
Lachuga Yu.F., Strebkov D.S., Gojaev Z.A., Redko I.Ya. (2020) Electrification of agricultural mobile power facilities based on the traction and energy concept of technology development. Bulletin of the RUDN. The series “Engineering Research”, no. 4, pp. 260–270. (In Russ.)
14. Ценч Ю.С., Курбанов Р.К. (2023) История развития систем управления беспилотных воздушных судов // Сельскохозяйственные машины и технологии. № 3. С. 4–15.
Tsench Yu.S., Kurbanov R.K. (2023) The history of the development of unmanned aircraft control systems. Agricultural machines and technologies, no. 3, pp. 4–15. (In Russ.)
15. Лобачевский Я.П., Дорохов А.С. (2021) Цифровые технологии и роботизированные технические средства для сельского хозяйства // Сельскохозяйственные машины и технологии. № 4. С. 6–10.
Lobachevsky Ya.P., Dorokhov A.S. (2021) Digital technologies and robotic technical means for agriculture. Agricultural machinery and technology, no. 4, pp. 6–10. (In Russ.)
16. Петров А.Н., Галстян А.Г., Радаева И.А. и др. (2017) Indicators of quality of canned milk: russian and international priorities. Foods and Raw Materials, no. 2, pp. 151–161.
17. Галстян А.Г., Аксёнова Л.М., Лисицын А.Б. и др. (2019) Современные подходы к хранению и эффективной переработке сельскохозяйственной продукции для получения высококачественных пищевых продуктов // Вестник РАН. № 5. С. 539–542.
Galstyan A.G., Aksyonova L.M., Lisitsyn A.B. et al. (2019) Modern Approaches to Storage and Effective Processing of Agricultural Products for Obtaining High Quality Food Products. Herald of the Russian Academy of Sciences, no. 2, pp. 211–213.

18. Лисицын А.Б., Чернуха И.М., Никитина М.А. (2023) Формирование персонализированного рациона питания с использованием структурной оптимизации // Пищевые системы. № 1. С. 64–71.
Lisitsyn A.B., Chernukha I.M., Nikitina M.A. (2023) Formation of a personalized diet using structural optimization. Food systems, no. 1, pp. 64–71. (In Russ.)
19. Хлыстун В.Н. (2023) Состояние земельной политики России и направления её совершенствования // Имущественные отношения в Российской Федерации. № 8 (263). С. 38–48.
Khlystun V.N. (2023) The state of Russia's land policy and directions for its improvement. Property relations in the Russian Federation, no. 8 (263), pp. 38–48. (In Russ.)
20. Ценч Ю.С. (2023) Подготовка новой генерации молодых исследователей в научных учреждениях // Российская сельскохозяйственная наука. № 3. С. 3–8.
Tsench Yu.S. (2023) Training of a new generation of young researchers in scientific institutions. Russian Agricultural Science, no. 3, pp. 3–8. (In Russ.)
21. Измайлов А.Ю., Лобачевский Я.П., Смирнов И.Г., Ценч Ю.С. (2015) Аспирантура в структуре научно-исследовательского института в новых условиях // Интеллектуальные машинные технологии и техника для реализации Государственной программы развития сельского хозяйства. Сборник научных докладов Международной научно-технической конференции. ВНИИ механизации сельского хозяйства. С. 41–44.
Izmailov A.Yu., Lobachevsky Ya.P., Smirnov I.G., Tsench Yu.S. (2015) Postgraduate Studies in the Structure of the Research Institute in New Conditions. Intelligent machine technologies and equipment for the implementation of the State Program for the development of agriculture. Collection of scientific reports of the International Scientific and Technical Conference. All-Russian Scientific Research Institute of Agricultural Mechanization, pp. 41–44. (In Russ.)

SCIENTIFIC SUPPORT OF PRIORITY TECHNOLOGIES AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX OF THE RUSSIAN FEDERATION

Ya.P. Lobachevsky^{a,*}

^a*Russian Academy of Sciences, Department of Agricultural Sciences,
Moscow, Russia*

^{*}*E-mail: lobachevsky@yandex.ru*

The article, based on the materials of the report at the general meeting of RAS members, examines the scientific provision of priority technologies and technical means that are necessary for the development of the agro-industrial complex of the Russian Federation. The main efforts of scientists of the Department of Agricultural Sciences of the Russian Academy of Sciences are aimed at increasing soil fertility, preventing desertification and land degradation, obtaining productive plant varieties and animal breeds based on the latest genetic technologies, creating effective vaccines and plant protection products, developing automated and robotic technical means for crop production and animal husbandry, producing functional safe food products, forming economic models development of agriculture.

Keywords: agro-industrial complex, priority technologies, soil fertility, land protection, genetic technologies, breeding, varieties, breeds, systems of machines and technologies, machines and aggregates, food.

ОНКОЛОГИЯ КАК ПЕРСПЕКТИВНОЕ НАПРАВЛЕНИЕ В ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ И ПРИКЛАДНЫХ МЕТОДАХ ЛЕЧЕНИЯ НЕИНФЕКЦИОННЫХ ЗАБОЛЕВАНИЙ

© 2024 г. А.Д. Каприн^{а,*}

^аНациональный медицинский исследовательский центр радиологии
Минздрава России, Москва, Россия

*E-mail: kaprin@mail.ru

Поступила в редакцию 16.01.2024 г.

После доработки 10.02.2024 г.

Принята к публикации 11.03.2024 г.

Профилактика и своевременное выявление онкологических заболеваний — одно из важнейших направлений в современной медицине, нацеленное на обеспечение здоровья и увеличение продолжительности жизни населения России. Этому способствуют активное внедрение персонифицированного подхода к лечению пациентов, совершенствование радиофармпрепаратов и лучевой терапии. Кроме того, в настоящее время усилия учёных направлены на развитие клеточной, генной, вирусной терапии, а также вакцинотерапии рака.

Ключевые слова: диагностика онкологических заболеваний, скрининг, радиофармпрепараты, молекулярно-генетические технологии.

DOI: 10.31857/S0869587324030111, **EDN:** GFXCEW

В 2023 г. в соответствии с распоряжением Президента РФ в онкологии прочно закрепился междисциплинарный подход для достижения средней продолжительности жизни в 78 лет. Поскольку этот показатель растёт, а также снижается смертность от рака, ключевыми вызовами на ближайшие годы станут старение населения и рост нагрузки на систему здравоохранения, значительная территориальная и гендерная дифференциация, интенсивные научные разработки и необходимость их внедрения в практическое здравоохранение по всей стране. В данном контексте на первый план выходят профилактика и раннее выявление онкологических за-

болеваний, в связи с чем особое внимание уделяется созданию современных систем диагностики рака в сотрудничестве с химиками, биоинформатиками, физиками и математиками. Речь идёт о привлечении технологий искусственного интеллекта в системы скрининга, развитии новейших подходов молекулярно-генетической диагностики, производстве отечественных радиофармацевтических препаратов для диагностики и лечения рака.

При лечении онкологических заболеваний всё чаще используется персонифицированный подход. Наблюдается рост количества биотехнологических разработок в онкологии: CAR-T- и НК-клеточная терапия, мРНК-вакцинотерапия, онколитическая терапия. Ведутся исследования в области редактирования генов и генной терапии. Отдельного внимания заслуживают биоинформатика и технологии машинного обучения, анализ больших «озёр данных» (Data Lake), создание платформы для поддержки принятия персонализированных врачебных решений и нейросетевого алгоритма на основе искусственного интеллекта.

Среди перспективных направлений в ядерной медицине — разработка и внедрение новейших радиофармацевтических препаратов (РФЛП) для диагностики и лечения рака. Важно отметить, что



КАПРИН Андрей Дмитриевич — академик РАН, генеральный директор НМИЦ радиологии Минздрава России.

применение технологий ядерной медицины в комбинированном лечении (совместно с химиотерапией, хирургией, лучевой терапией) даёт значительные преимущества в лечении даже запущенных форм злокачественных новообразований. В результате последовательной законодательской деятельности и при поддержке Министерства здравоохранения РФ под эгидой Национального медицинского исследовательского центра радиологии Минздрава России (НМИЦ радиологии Минздрава России) создана первая аптека РФЛП, а также принят план развития сети ядерных аптек по всей стране.

Приведём перечень перспективных радиофармацевтических лекарственных препаратов, работа над которыми ведётся на базе ядерных аптек:

- РФЛП ^{64}Cu -DOTATATE для ПЭТ/КТ¹ пациентов с нейроэндокринными злокачественными новообразованиями;
- ^{68}Ga -NOTA (^{68}Ga -NGUL) вместо ^{68}Ga -PSMA-11, который был утверждён Управлением по санитарному надзору за качеством пищевых продуктов и медикаментов США (FDA) в 2020 г. для радионуклидной диагностики метастатического кастрационно-резистентного рака предстательной железы (мКРРПЖ);
- $^{99\text{mTc}}$ -PSMA I&S для однофотонной эмиссионной компьютерной томографии пациентов с мКРРПЖ;
- РФЛП с радионуклидом ^{89}Zr при ПЭТ в радиоиммунодиагностике (^{89}Zr -DFO-NCS-трастузумаб);
- рецепторно-направленные радиоактивно меченые пептиды для визуализации и лечения меланомы (^{177}Lu / ^{68}Ga -DOTA-PEG4-LLP2A);
- ^{211}At -трастузумаб для лечения вторичных метастазов от рака желудка в печени;
- пептид-рецепторная радионуклидная терапия на основе соматостатиновых рецепторов (ПРРТ) при лечении рефрактерной менингиомы;
- Pb -214-TCMC-трастузумаб в доклинической модели лечения HER2-положительного рака яичников;
- таргетная терапия множественной миеломы альфа- и бета-меченым вектором, имеющим сходство к CD38 (^{177}Lu -DOTA-Dara и ^{225}Ac -DOTA-Dara);
- TAG-72 — таргетная α -радионуклидная диагностика и терапия рака яичников с использованием антитела, меченого ^{64}Cu или ^{225}Ac (^{64}Cu -DOTAylated-huCC49 и ^{225}Ac -DOTAylated-huCC49);
- ^{67}Cu -CuSar-bisPSMA для терапии КРРПЖ.

¹ ПЭТ/КТ (PET/CT) — эффективный метод диагностики онкологических заболеваний, сочетающий возможности позитронно-эмиссионной (ПЭТ) и компьютерной (КТ) томографии и позволяющий с большой вероятностью установить наличие злокачественного образования.

Клиническим прорывом в лечении гормонорезистентного рака предстательной железы стал синтез РФЛП ^{177}Lu -ДОТА-PSMA. Доклинические исследования доказали его безопасность и эффективность. Препарат образует устойчивое соединение в теле пациента, обладает высокой тропностью к опухолевой ткани и хорошими клинико-дозиметрическими показателями. Его изготавливают в аптеке РФЛП на базе НМИЦ радиологии Минздрава России.

К настоящему времени разработаны РФЛП на основе рениевой платформы (Гепаторен-МРНЦ и Артрорен-МРНЦ) для лечения первичной гепатоцеллюлярной карциномы и метастатического поражения печени, а также экссудативных синовитов. Эти препараты позволили совершить качественный прорыв в терапии, дали шанс перевести неоперабельные процессы в печени в операбельные.

В Российском научном центре радиологии и хирургических технологий им. академика А.М. Гранова в Санкт-Петербурге создан инновационный меченый лютецием-177 радиофармпрепарат Нанолут на основе *биспецифического наноантитела* к поверхностным рецепторам Т-регуляторных клеток против широкого спектра генерализованных форм опухолей (меланомы, рак лёгкого, почки, мочевого пузыря). Препарат показал эффективность в клинических испытаниях.

Институты Томского национального исследовательского медицинского центра РАН на протяжении 30 лет плодотворно сотрудничают с Национальным исследовательским Томским политехническим университетом в области получения радиофармацевтических лекарственных препаратов для ядерной медицины. Об успехе совместной работы свидетельствуют регистрация и организация производства генераторов технеция, а также ряда радиофармацевтических лекарственных препаратов для диагностики и лечения злокачественных новообразований. Несколько оригинальных тераностических соединений находятся на стадии доклинических и клинических испытаний.

Имеющиеся источники различной мощности дозы излучения (I -125, Ir -192, Co -60, Ra -224) позволяют с помощью *брахитерапии* (введение источника внутрь поражённого органа) успешно лечить злокачественные новообразования разной локализации, в том числе таких сложных, как опухоли поджелудочной или молочной желёз. При аппликационной брахитерапии меланом и ретинобластом применяются офтальмоаппликаторы с произведёнными в России рутением-106 и стронцием-90. Метод показал высокую эффективность: позволяет сохранить глаз пациента, в 70% случаев сохранить зрение, пятилетняя выживаемость достигает 90%.

Что касается отечественных разработок в области *лучевой терапии*, то с 2016 г. в Медицинском радиологическом научном центре им. А.Ф. Цыба —

филиале НМИЦ радиологии Минздрава России функционирует протонный терапевтический комплекс “Прометеус” — первая и пока единственная российская установка, размещённая в медицинском учреждении, что естественным образом способствует повышению доступности для пациентов онкологической помощи методами протонной терапии.

Развитие технологий лучевой терапии с применением ионов — системообразующая задача в современной клинической радиологии. Предполагается, что экспериментально-клинический комплекс на основе синхротрона У-70 в НИЦ “Курчатовский институт” Протвино с периметром орбиты 1.5 км станет ключом к внедрению ионной лучевой терапии в России. В настоящее время реализуется проект первого в мире комплекса нейтронной терапии на базе компактного нейтронного генератора НГ-24 в НМИЦ радиологии Минздрава России. В результате будет создана медицинская установка нейтронной терапии, которая подарит надежду на выздоровление пациентам с резистентными и рецидивными опухолями различных локализаций.

В области препаратов онкологического профиля сложилось несколько ключевых тенденций, которые будут развиваться в ближайшие годы:

- клеточная терапия;
- РНК- и ДНК-вакцины;
- технологии редактирования генов и геновая терапия;
- онколитическая вирусная терапия;
- би- и триспецифические антитела.

В Национальном медицинском исследовательском центре гематологии Минздрава России создан первый отечественный анти-CD19 CAR-T-клеточный лекарственный препарат для терапии острого В-лимфобластного лейкоза. В Российском научном центре рентгенорадиологии Минздрава России налаживается технология получения CAR-T-продуктов, которые отличаются более коротким сроком производства и более низкой стоимостью по сравнению с зарубежными аналогами. В Научно-технологическом университете “Сириус” отработаны методы *in vitro* синтеза, выделения и очистки мРНК, эксперименты продемонстрировали высокую эффективность её доставки. В Национальном исследовательском центре эпидемиологии и микробиологии им. Н.Ф. Гамалеи Минздрава России создана универсальная мРНК-платформа, уже зарекомендовавшая себя в экспериментах с различными вирусами.

Ещё одно направление — доклинические исследования лекарственных средств на основе непатогенных штаммов энтеровирусов, обладающих выраженным онколитическим потенциалом (Центр высокоточного редактирования и генетических технологий для биомедицины). Новые технологии позволяют получать биспецифические антитела,

способные нацеливаться сразу на два антигена. Этой области уделяется повышенное внимание во всём мире. В России на разных этапах разработки находятся несколько биспецифических антител (компания BIOCAD), которые предполагается использовать как в лечении онкогематологических заболеваний, так и солидных опухолей.

Сотрудники Национального медицинского исследовательского центра онкологии им. Н.Н. Петрова Минздрава России активно трудятся над аутологичной дендритно-клеточной вакциной на основе раково-тестикулярных антигенов. Уже готов прототип клеточного продукта, который содержит аутологичные дендритные клетки, активированные раково-тестикулярными антигенами. Собственная научно-исследовательская инфраструктура НМИЦ радиологии Минздрава России, созданная благодаря массиву аннотированных геномных и метаданных, а также технологии машинного обучения способствовали появлению новой отечественной фармакогеномной системы поддержки принятия врачебных решений. Биоинформатическая система проходит успешную апробацию на клинической базе НМИЦ радиологии Минздрава России. Коллектив Национального медицинского исследовательского центра им. В.А. Алмазова Минздрава России разработал прототип нейросетевого алгоритма на основе искусственного интеллекта с целью повышения точности диагностики рака шейки матки.

Молекулярно-генетическими технологиями на основе микроРНК² занимаются крупные российские центры и консорциумы. В НМИЦ онкологии Минздрава России (Ростов-на-Дону) с помощью биоинформатических и молекулярно-генетических подходов продолжается работа над малоинвазивной диагностической панелью опухолей головного мозга на базе микроРНК, циркулирующих в плазме крови. Научным консорциумом под руководством академика РАН Е.Л. Чойнзонова получен генотерапевтический микроРНК-препарат, таргетированный к генам стволовости, которые инкапсулированы в липосомы. Он показал высокую противометастатическую активность на модели спонтанного метастазирования у мышей и образования опухолевых узлов у ксенографтов³. Препарат в настоящее время проходит доклинические токсикологические исследования. На базе НМИЦ онкологии Минздрава России с использованием биоинформатических и молекулярно-генетических подходов в изучении внутриопухолевой гетерогенности ведётся поиск путей гомологичной рекомбинации ДНК, разра-

² МикроРНК (miRNA) — класс малых некодирующих молекул РНК длиной 18–25 нуклеотидов, обнаруженных у животных, растений и некоторых вирусов и принимающих участие в транскрипционной и посттранскрипционной регуляции экспрессии генов.

³ Ксенографты — экспериментальные онкологические модели, использующие привитые мышам опухоли человека.

батуется молекулярная прогностическая классификация рака желудка. Синтезирован 17-членный мишенный пептид, способный специфически связываться с белком теплового шока на поверхности плазматической мембраны опухолевых клеток. Пептид может преодолевать гематоэнцефалический барьер, накапливаясь в клетках глиобластомы. Это позволяет перейти к исследованиям *in vivo* на релевантных моделях внутричерепных опухолей.

Научные коллективы Федерального исследовательского центра проблем химической физики и медицинской химии РАН показали, что донор оксида азота обладает уникальной противоглиомной активностью на культурах клеток глиом: он в 1000 раз более цитотоксичен для клеток глиом, чем для неопухолевых клеток, а соединение более активно, чем Темодал (цитотоксичность выше в 10–2500 раз в зависимости глиомы).

Новые возможности онкохирургии — огромный научный пласт, в котором достижения смежных с онкологией дисциплин постоянно внедряются в практику биотехнологов, химиков и других специалистов. Так, учёные из Томского национального исследовательского медицинского центра РАН разработали методику получения оригинальных отечественных индивидуальных имплантатов из фторполимеров с целью устранения дефектов челюстно-лицевой области.

Московский клинический научный центр им. А.С. Логинова — ведущий центр по замещению хирургических методов лечения неинвазивными. Здесь сокращаются объёмы операций при ранних формах рака, внедряются малоинвазивные технологии. Успешное применение лекарственных технологий позволяет в последующем осуществлять хирургическое лечение.

ONCOLOGY AS A PROMISING FIELD IN DOMESTIC RESEARCH AND APPLIED METHODS OF TREATMENT OF NON-COMMUNICABLE DISEASES

A.D. Kaprin^{a,*}

^a*National Medical Research Radiological Center of the Ministry of Health
of the Russian Federation, Moscow, Russia*

^{*}*E-mail: kaprin@mail.ru*

Prevention and timely detection of oncological diseases is one of the most important directions in modern medicine aimed at ensuring the health and increasing the life expectancy of the Russian population. This is facilitated by the active introduction of a personalized approach to the treatment of patients, the improvement of radiopharmaceuticals and radiation therapy. In addition, the efforts of scientists are currently focused on the development of cellular, gene, viral therapy, as well as cancer vaccine therapy.

Keywords: diagnosis of oncological diseases, screening, radiopharmaceuticals, molecular genetic technologies.

НАУЧНАЯ СЕССИЯ ОБЩЕГО СОБРАНИЯ ЧЛЕНОВ РАН

ЭПИДЕМИОЛОГИЧЕСКИЕ, КЛЕТОЧНЫЕ, ГЕНЕТИЧЕСКИЕ
И ЭПИГЕНЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ БИОБЕЗОПАСНОСТИ

© 2024 г. В.Г. Акимкин^{a,*}, В.В. Зверев^{b,c,**}, М.П. Кирпичников^{d,e,***},
Е.Д. Свердлов^{f,****}, В.И. Стародубов^{e,g,*****}, Н.К. Янковский^{d,h,*****}

^aЦентральный научно-исследовательский институт эпидемиологии Роспотребнадзора, Москва, Россия

^bНаучно-исследовательский институт вакцин и сывороток
им. И.И. Мечникова, Москва, Россия

^cПервый Московский государственный медицинский университет
им. И.М. Сеченова Минздрава России, Москва, Россия

^dМосковский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

^eРоссийская академия наук, Москва, Россия

^fНИЦ “Курчатовский Институт”, Москва, Россия

^gЦентральный научно-исследовательский институт организации и информатизации здравоохранения
Минздрава России, Москва, Россия

^hИнститут общей генетики им. Н.И. Вавилова РАН, Москва, Россия

*E-mail: vgakimkin@yandex.ru

**E-mail: vitalyzverev@outlook.com

***E-mail: kirpichnikov@inbox.ru

****E-mail: edsverd@gmail.com

*****E-mail: starodubov@presidium.ras.ru

*****E-mail: yankovsky@vigg.ru

Поступила в редакцию 15.01.2024 г.

После доработки 19.01.2024 г.

Принята к публикации 22.01.2024 г.

Проблема биологической безопасности чрезвычайно актуальна для всех стран в связи с расширением спектра реальных и потенциальных угроз со стороны опасных агентов биологической природы. Весь мир оказался уязвим перед пандемией новой коронавирусной инфекции. Несомненно, человечество ещё столкнётся с эпидемиями, поэтому необходимо создавать и совершенствовать методы амплификации нуклеиновых кислот, идентификации патогенов с помощью секвенирования нового поколения, технологии редактирования генома. Нужно изучать реакции иммунной системы на рекомбинантные микроорганизмы, содержащие гены стимуляторов врождённого иммунного ответа, с целью разработки платформ для создания универсальных вакцин. На основе анализа геномов и транскриптомов можно идентифицировать мишени, наиболее перспективные для терапии и профилактики инфекционных болезней. Комплексный подход к реализации системы геномного и эпигеномного эпидемиологического надзора позволит внести существенный вклад в обеспечение биологической безопасности Российской Федерации.

Ключевые слова: биобезопасность, эпидемиология, иммунология, современные технологии диагностики, тренированный иммунитет, геномика, эпигенетика.

DOI: 10.31857/S0869587324030127, **EDN:** GFVWQC

АКИМКИН Василий Геннадьевич — академик РАН, директор ЦНИИЭ Роспотребнадзора. ЗВЕРЕВ Виталий Васильевич — академик РАН, научный руководитель НИИВС им. И.И. Мечникова. КИРПИЧНИКОВ Михаил Петрович — академик РАН, заведующий кафедрой биоинженерии биологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова. СВЕРДЛОВ Евгений Давидович — академик РАН, руководитель ЦГИМУ НИЦ “Курчатовский институт”. СТАРОДУБОВ Владимир Иванович — академик РАН, научный руководитель ЦНИИОИЗ Минздрава России. ЯНКОВСКИЙ Николай Казимирович — академик РАН, научный руководитель ИОГЕН РАН.

XXI век ознаменовал собой эпоху глобальных перемен, однако, несмотря на все научные и практические достижения, проблемы инфекционной патологии до сих пор не утрачивают своей актуальности. По данным ВОЗ, инфекционные болезни занимают третье место в структуре общей смертности в мире [1]. До пандемии COVID-19 в России ежегодно регистрировалось 32–37 млн случаев инфицирования, в 2021–2022 гг. — более 50 млн. В 2022 г. прямой и косвенный ущерб составил более 1.6 трлн руб. В целом в период пандемии в мире зарегистрировано более 770 млн случаев заражения и 7 млн смертей, в России — более 23 млн и 400 тыс. соответственно [2]. Сохраняется неблагоприятная международная эпидемиологическая ситуация по ряду болезней, в том числе с чрезвычайно высоким риском распространения и тяжёлыми последствиями для общественного здравоохранения.

Наряду с ростом заболеваемости серьёзную угрозу национальной биологической безопасности представляют эпидемические и эпизоотические вспышки новых и вновь возникающих инфекций, таких как лихорадка Эбола, Денге и Зика, тяжёлый острый респираторный синдром (SARS), ближневосточный респираторный синдром (MERS) и др. Большинство из них характеризуются внезапностью, высокой смертностью, отсутствием специфических методов диагностики и лечения, а также значительным уровнем затрат на проведение противоэпидемических мероприятий. В настоящее время проблема биобезопасности чрезвычайно актуальна для всех стран в связи с расширением спектра реальных и потенциальных угроз для здоровья и благополучия человека, общества и окружающей среды со стороны опасных агентов биологической природы [3–6].

Пандемия новой коронавирусной инфекции наглядно продемонстрировала миру его уязвимость. Очевидно, что своевременная и точная диагностика — важнейшее условие эпидемиологического благополучия населения. С учётом этого в целях реализации “Концепции технологического развития Российской Федерации до 2030 года” (распоряжение Правительства РФ № 1315-р от 20.05.2023 г.) нужно наладить систему биобезопасности, основанную на быстром внедрении инноваций в медицинские, биотехнологические, химические и информационные области, которые играют главную роль в обеспечении технологического и экономического суверенитета России.

Стремительное развитие ряда смежных с эпидемиологией фундаментальных наук (в первую очередь иммунологии, вирусологии и генетики) привело, с одной стороны, к расширению представлений о биологии возбудителей и факторах их патогенного воздействия, с другой — к пониманию механизмов резистентности потенциального хозяина. Таким образом, пришло осознание, что взаимодействие возбудителей инфекционных заболеваний и вовлекаемых в эпидемический процесс людей и живот-

ных в действительности значительно более сложное, нежели это представлялось ранее.

Анализ показал, что основные эпидемические проявления COVID-19 соответствуют положениям теории саморегуляции паразитарных систем В.Д. Белякова и обусловлены наличием фазовой внутренней перестройки популяции SARS-CoV-2 на фоне лабильных социальных и природных условий [7]. Подтверждением ключевого положения теории о фазности развития эпидемического процесса служит динамика заболеваемости COVID-19. Первые случаи в России зафиксированы в феврале-марте 2020 г. и ознаменовали начало предэпидемического периода, когда присутствовали лишь единичные инфицированные лица, численность возбудителя была невелика, а её гетерогенность имела минимальную выраженность за счёт абсолютного преобладания в ней маловирулентных особей. Начиная с мая 2020 г., вследствие пассажа через восприимчивых людей, началось повышение вирулентности и численности популяции нового коронавируса, которые предшествовали росту заболеваемости среди населения, то есть процесс перешёл в фазу эпидемического преобразования, а затем — эпидемического распространения. Всё это сопровождалось более тяжёлыми случаями болезни и высокой летальностью. Первый этап развития пандемии на территории России (март 2020 г. — январь 2021 г.) обусловлен неоднородностью (гетерогенностью) взаимодействующих популяций возбудителя и человека, а также введением мер неспецифической профилактики и ограничительных противоэпидемических мероприятий. В это период были отмечены два подъёма и два спада заболеваемости, регулируемые социальными и природными факторами [3].

Второй этап пандемии COVID-19 (с января 2021 г. по настоящее время) обусловлен изменением биологических свойств вируса SARS-CoV-2 с последующей сменой преобладающих геновариантов (альфа-, бета-, гамма-, дельта- и омикрон) и стартом массовой специфической иммунопрофилактики [8]. Уже зафиксировано пять подъёмов и спадов заболеваемости, что, вероятно, связано с эволюцией вируса и становлением его эпидемического варианта при закономерном изменении иммунологической структуры популяции человека в цепи циркуляции возбудителя. Фазовая самоперестройка вируса привела к снижению его вирулентности и численности, что сопровождалось уменьшением тяжести протекания болезни, числа госпитализированных и умерших и может свидетельствовать о наступлении фазы резервационного преобразования.

Грядущая фаза резервации коронавируса угрожает ему исчезновением, поэтому сохранение возбудителя как биологического вида невозможно без эволюционного развития. Этому способствуют нестабильность генома и мутации, а также расширение диапазона гетерогенности популяции SARS-CoV-2 за счёт циркуляции мало- и высоковирулентных

вариантов с последующим стабилизирующим отбором и преобладанием эпидемического характера возбудителя. Поэтому резервация всегда балансирует на грани с фазой эпидемического преобразования, когда в естественном отборе появляются и получают преимущество новые штаммы, которые могут обходить ранее сформированную человеческую защиту, ускользая от вакцин и постинфекционного иммунитета [7].

Неизбежность будущих пандемий обуславливает потребность в технологиях снижения их негативного воздействия на население путём разработки специфических вакцин и организации их массового производства. Наряду с исследованиями, нацеленными на совершенствование традиционных вакцин (РНК- и ДНК-вакцины, клеточные вакцины), которые основаны на индукции адаптивного иммунитета, перспективным представляется создание универсальных вакцин, механизм действия которых использует неспецифический врождённый иммунитет. При появлении неидентифицированного патогена они позволили бы защищать население и снижать тяжесть заболевания до момента выпуска специфических к данному возбудителю вакцин.

Врождённый иммунитет служит первой линией защиты от патогенов (рис. 1), а затем присоединяется основная, адаптивная ветвь иммунной системы. Врождённый иммунитет включает в себя несколько уровней защиты, один из которых — клеточный компонент — представляет собой быстрый (от минут до часов и дней) иммунный ответ хозяина, характеризующийся неспецифическим распознаванием различных высококонсервативных микробных молекулярных структур клеточными рецепторами распознавания образов иммунных (моноциты/макро-

фаги и дендритные клетки [9–12]) и неиммунных клеток (эпителий). Напротив, адаптивный иммунитет отличается высокой специфичностью к определённым микробным инфекциям, и требуется от нескольких дней до двух недель для эффективного гуморального и клеточного ответа. Он распознаёт и атакует патогены по специфическим антигенам, формирует иммунологическую память, что позволяет в следующий раз быстрее инициировать иммунный ответ на данный антиген.

Имеются убедительные доказательства того, что живые бактериальные или вирусные вакцины (БЦЖ, вакцины против кори и полиомиелита) оказывают гетерологичное защитное действие против неродственных патогенов. Это связано со способностью врождённого иммунитета хранить память о прошлых инфекциях и использовать её для выработки иммунной защиты против новых. Данный эффект получил название “обученного” или “тренированного” иммунитета, характеризующегося усилением врождённых иммунных ответов после первоначального контакта с патогенами на последующие воздействия и представляющего собой форму врождённой иммунологической памяти [13].

Индукция тренированного иммунитета была продемонстрирована в таких миелоидных клетках, как моноциты, макрофаги, дендритные клетки и нейтрофилы, а также в лимфоидных клетках — естественных клетках-киллерах и врождённых лимфоидных клетках. Для объяснения долговременной защиты, вызванной таким иммунитетом, рассматриваются два механизма: перепрограммирование клеток-предшественников костного мозга (центральный тренированный иммунитет) и функциональные изменения популяций тканевых клеток (периферический иммунитет) [14].

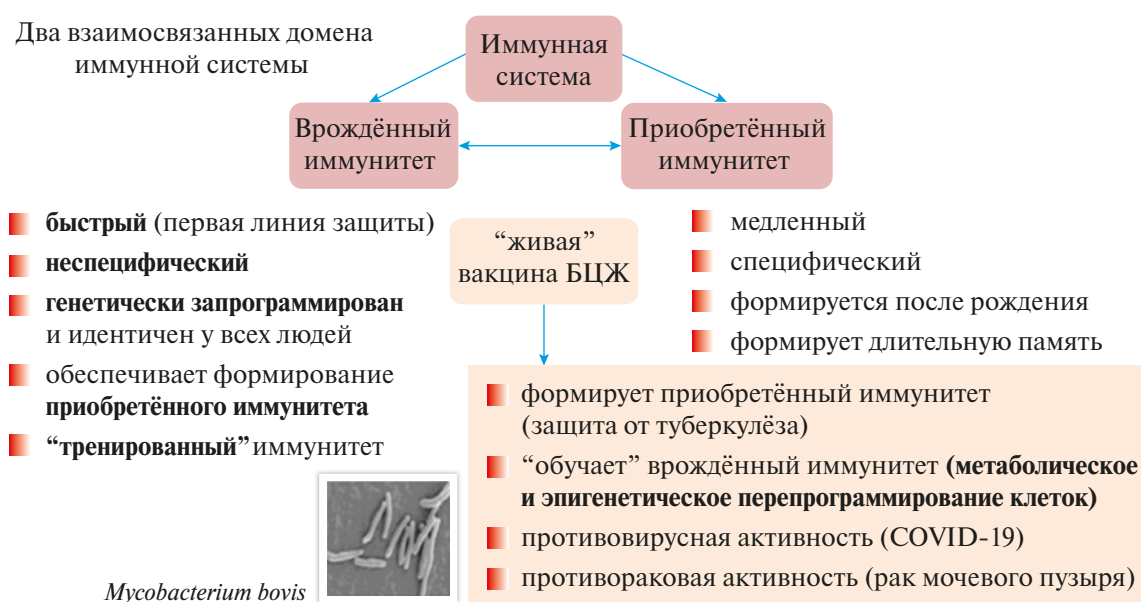


Рис. 1. Характеристика врождённого и приобретённого иммунитета на примере реакции на БЦЖ

Показано, что живые аттенуированные вакцины (БЦЖ, вакцины против кори, пероральная вакцина против полиомиелита) снижают смертность не только от перечисленных заболеваний, но и от других, гетерологичных, инфекций, что может быть связано с неспецифическим врождённым иммунитетом. Этот эффект наблюдался в странах с низким доходом [15–17], хотя исследования, проведённые в более обеспеченных странах, дали противоречивые результаты. Тем не менее вакцинация БЦЖ была предложена для защиты от *Staphylococcus aureus* — инфекции, возникающей при хирургических вмешательствах, а также *Leishmania*. Таким образом, можно рассчитывать на то, что уже известные вакцины против различных патогенов могут оказаться полезными против новых, включая COVID-19 [18–20].

Взаимодействие врождённой и адаптивной иммунных систем играет главную роль в защитных реакциях организма. Миелоидные клетки врождённой иммунной системы способны воспринимать микробные лиганды, нарушения клеточного гомеостаза и факторы вирулентности, передавая специфическую информацию наивным Т-клеткам в форме продуктов патогенного происхождения и цитокинов.

Функциональные изменения, связанные с индукцией тренированного иммунитета, сохраняются не менее года, хотя эпидемиологические исследования показали и более долгосрочные воздействия (до 5 лет) в случае неспецифической защиты вследствие вакцинации [14, 21–23]. Вакцины, основанные на тренировке иммунитета, могли бы служить мощ-

ными иммунными стимуляторами, содействовать уничтожению возбудителей в организме за счёт гетерологичных эффектов и обеспечивать защиту от специфических и неспецифических патогенов [19, 20, 24] (рис. 2).

Современный уровень иммунологии и молекулярной биологии позволяет получать рекомбинантные вакцины, в частности БЦЖ [25, 26], модифицированные генами, продукты которых способствуют лучшей активации клеток врождённого иммунитета. Рекомбинантные варианты, экспрессирующие различные антигены, могут оказаться полезными как для введения антигенов SARS-CoV-2 (rBCG-SARS-CoV-2) для индукции длительного иммунитета [27], так и для предварительной профилактики против неизвестного патогена до создания конкретной вакцины. С помощью явления тренированного иммунитета можно найти подход к улучшению существующих или разработке новых вакцин, сочетающих индукцию классической адаптивной и врождённой иммунной памяти. Эти методы могут быть усилены с помощью генетических технологий. Соответствующие работы ведутся в России и за рубежом [28–30]. Генетика и эпигенетика биобезопасности должны быть выделены в новое междисциплинарное направление фундаментальных наук и ориентироваться на решение задач, критически важных не только для обеспечения национальной безопасности, но и в целом для достижения независимости и конкурентоспособности технологических разработок в гражданском и оборонном секторах экономики.

В настоящее время наряду с выявлением ДНК возбудителя ведётся поиск методов оценки измене-

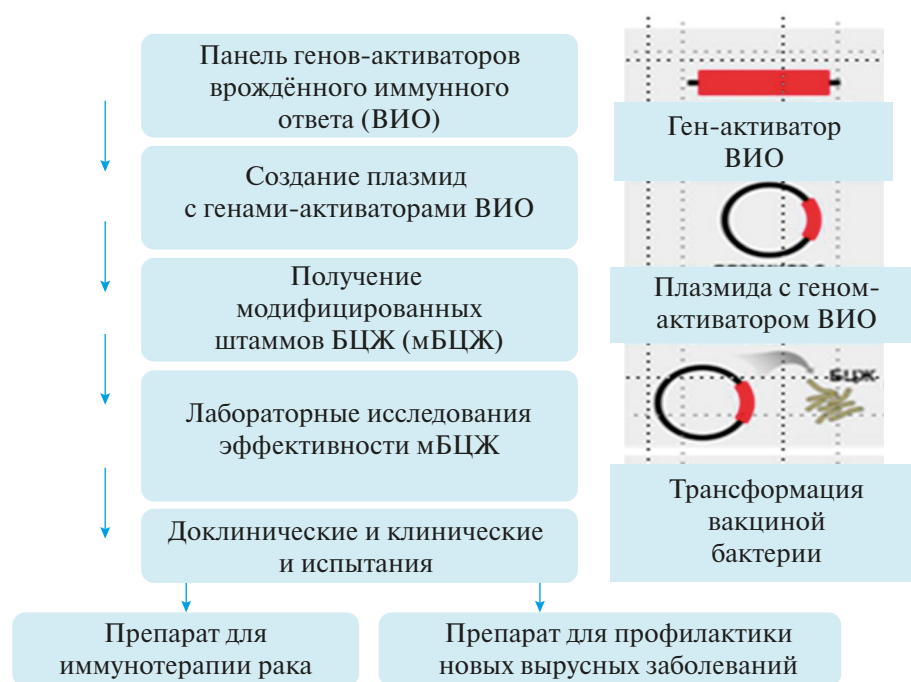


Рис. 2. Схема создания рекомбинантных вакцин, нацеленных на клетки врождённого иммунитета

ния активности генов человека в ответ на вирусную инфекцию. Генный ответ организма-хозяина включает специфичные и неспецифичные изменения активности генов для конкретного вида возбудителя, указывающие на инфицирование, что позволяет установить заражение в том числе и не изученными ранее агентами. Изменение активности генов может быть обнаружено по смене профиля метилирования избранных участков ДНК, а именно, CpG-сайтов в регуляторных участках генов. В геноме человека почти 20 тыс. генов, их набор во всех клетках одинаков, однако сами клетки различаются, так как в каждой работает свой набор генов, в то время как остальные “молчат”.

Как и прочие вирусы, SARS-Cov-2 меняет активность генов человека, чтобы гарантировать своё размножение. Одновременно клетка отвечает на инфицирование, активируя соответствующие гены защиты [31–33]. Развитие вирусной инфекции начинается с процесса модификации генома человека (немутационное и ненаследуемое изменение ДНК) после попадания вируса в клетку. Модификация заключается в присоединении метильной группы (метилирование), либо её удалении (деметилирование) из динуклеотидов CpG в молекуле ДНК генома человека. В результате специфической смены профиля метилирования ДНК меняется и профиль активности генов, продукты которых нужны для образования частиц вирусного потомства. При выздоровлении профили метилирования и активности генов хозяина возвращаются к норме.

По анализу профиля модификации ДНК в клетках крови можно диагностировать любое заболевание, установить тип возбудителя и его вариант, вероятный исход болезни как природного, так и лабораторного происхождения. Для этого нужно определить и сравнить направление и уровень метилирования каждого гена у здоровых и инфицированных индивидов. Профиль метилирования специфичен для вируса одного вида (например, SARS-Cov-2) у разных заражённых, но отличается от профиля другого вируса (например, вируса гриппа). Таким образом, это открыло новый способ диагностики конкретного возбудителя по регистрируемому профилю изменений в геноме заражённого им человека. Положение сайтов CpG в геноме, уровень метилирования которых меняется после возникновения инфекции, можно определить с помощью разработанной в России технологии анализа метилирования на оригинальной ферментной базе (фермент *GlaI*). Рестриктаза *GlaI* расщепляет только те участки ДНК, которые содержат метилированный цитозин в составе нуклеотидной последовательности RCGY (пурин-динуклеотид CpG — пиримидин). Поскольку рестриктаза *GlaI* произведена в России, у нас сохраняются все интеллектуальные права на неё [34–36]. Схема метода полногеномного анализа метилирования генома человека представлена на рисунке 3.

Сравнение профилей метилирования ДНК в геноме человека до и после инфекции выявляет каждый дифференциально метилированный цитозин и его координаты путём маркировки прилежащих

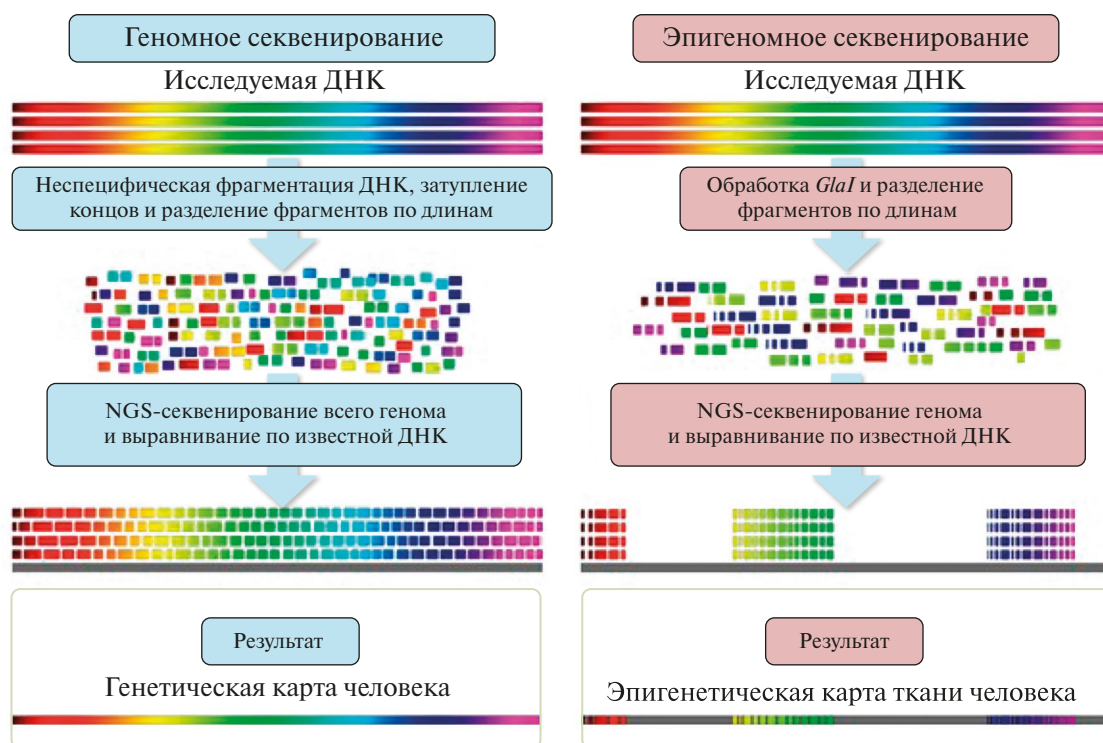


Рис. 3. Отличия эпигеномного секвенирования от геномного (разработка С.Х. Дегтярёва)

генов с возможно изменённым уровнем активности в данной хромосоме-гомологе, которые могут оказывать жизненно важными для вируса. Транскрипты таких генов представляют собой потенциальные терапевтические мишени, разрушение которых блокирует образование дочерних вирусных частиц и тормозит развитие инфекции, что даёт время иммунной системе наработать специфические антитела и обеспечить облегчённое течение заболевания или более быстрое выздоровление.

Изменение состава набора мРНК в клетках человека (редактирование транскриптома) позволит разработать новые средства терапии и профилактики инфекционных заболеваний. Для этого в транскриптоме необходимо найти именно ту часть транскриптов-мишеней, которая необходима вирусу для его развития, формирования дочерних частиц и их передачи следующему хозяину, при этом избежать поражения тех молекул мРНК, которые активированы организмом для самозащиты и последующего выздоровления.

Диагностика и прогноз течения инфекционного заболевания включают анализ метилирования ДНК, установление различий между здоровыми и больными, выбор мишеней для терапии и профилактики:

- идентификация генов человека, активность которых необходима вирусу, но не самому человеку, и генов, обеспечивающих защиту;
- разрушение мРНК-мишеней (транскриптов генов человека) за счёт РНК-интерференции текст-специфическими синтетическими молекулами РНК.

Показано, что при поражении вирусом гриппа одновременное подавление в инфицированной клетке экспрессии двух и более генов (*FLT4*, *Nip98* и *Nip205*) значительно снижает число образованных в ней дочерних вирусных частиц [37].

Один из основных инструментов борьбы с инфекционными болезнями — точная и своевременная диагностика. Современные технологии диагностики включают: поиск нуклеиновых кислот возбудителя с помощью различных методов их амплификации (полимеразная цепная реакция (ПЦР) или изотермическая амплификация); выявление антигенов или антител к возбудителю с помощью серологической диагностики путём иммуноферментного или иммунохроматографического анализа; технологии с использованием биочипов; различные методы секвенирования, в том числе секвенирование нового поколения (NGS); технологии редактирования генома — современное направление в производстве диагностических наборов.

Важным результатом борьбы с пандемией стало создание новой платформы для молекулярной диагностики с помощью одного из методов изотермической амплификации — петлевой изотермической амплификации LAMP (ЦНИИ эпидемиологии Роспотребнадзора) [38]. В данном подходе 4–6 прайме-

ров обеспечивают высокую специфичность системы и лавинообразное накопление продуктов реакции. Полимераза с вытесняющей активностью допускает проведение реакции при одинаковой температуре. Время анализа при этом составляет всего 25–30 мин.

Секвенирование нового поколения — безусловно одна из прорывных технологий идентификации патогенов. Активное развитие подходов и технологий NGS-секвенирования привело к кардинальному снижению стоимости прочтения геномов, повышению производительности платформ и уменьшению числа ошибок. Сфера применения данной технологии в биологии и медицине включает диагностику наследственных и онкологических заболеваний, генетические исследования, поиск возбудителей инфекционных заболеваний, генотипирование бактериальных и вирусных патогенов, наблюдения за их изменчивостью, кроме того, она внедрена в криминалистику и множество других областей.

При изучении патогенов вирусной природы секвенирование нового поколения позволяет выявлять этиологический фактор заболевания, проводить мониторинг изменчивости патогена, обнаруживать филогенетические связи, устанавливать пути передачи возбудителя, проводить расследование причин вспышек заболеваемости. Основное его преимущество — возможность обнаружения и идентификации неизвестных ранее патогенов. В технологии NGS для работы с полными геномами вирусных патогенов используют два основных подхода: метагеномный — универсальный метод исследования тотальных ДНК/РНК, выделенных из биологического материала, с целью детектирования неизвестных патогенов и изучение уже известных с помощью обогащения образцов путём амплификации целевых нуклеиновых кислот с набором специфических праймеров. Это повышает чувствительность системы и одновременно существенно снижает стоимость проведения опытов [39, 40].

В ЦНИИ эпидемиологии Роспотребнадзора разработана собственная панель для амплификации генома коронавируса SARS-Cov-2. Модифицированные праймеры позволяют создавать полногеномные библиотеки для секвенирования в два этапа ПЦР, минуя дорогостоящие и трудоёмкие стадии. Панель обеспечивает оптимальный охват и качество данных NGS на платформах Illumina™, что обуславливает невысокую себестоимость секвенирования полного генома. В случае с COVID-19 молекулярно-генетический мониторинг изменчивости генома вируса стал важным направлением эпидемиологических исследований, так как это помогло установить связи между циркулирующими геновариантами вируса и особенностями проявления эпидемического процесса. В рамках исполнения постановлений Правительства РФ (№ 448 от 23.03.2021 г., № 2178 от 02.12.2021 г., № 2395 от 23.12.2022 г.) специалисты Роспотребнадзора развернули масштабные работы по секвенированию и биоинформатическому ана-

лизу геномов коронавируса SARS-CoV-2 и выявлению как известных, так и новых его вариантов.

В 2021 г. на базе ЦНИИ эпидемиологии Роспотребнадзора в соответствии с постановлением Правительства РФ от 23.03.2021 № 448 “Об утверждении Временного порядка предоставления данных расщепления генома возбудителя новой коронавирусной инфекции (COVID-19)” была создана национальная платформа VGARus (Virus Genome Aggregator of Russia, свидетельство о государственной регистрации № 2021621178 от 02.06.2021 г.) с целью агрегирования и анализа данных о геномах вирусов SARS-CoV-2, обнаруженных в России. Платформа позволяет осуществлять централизованный сбор и анализ данных о структуре и динамике установленных вариантов вируса и, соответственно, оперативно оценивать эпидемическую ситуацию в стране и принимать эффективные меры по её контролю (genome.crie.ru) [8, 41–44].

В настоящее время продолжается депонирование данных секвенирования на платформе, включая соответствующие метаданные, активно расширяется спектр анализируемых геномов возбудителей других инфекционных болезней. К платформе подключены более 150 организаций, 60 секвенирующих лабораторий. В проекте участвуют Россия, Республика Беларусь и Республика Армения. Передача информации осуществляется по защищённым каналам связи. Всего загружено 318 388 геномных последовательностей (195 944 — полные), в том числе SARS-CoV-2 — 299 404 (194 242 — полные).

В апреле 2021 г. Президент РФ В.В. Путин в своём послании к Федеральному собранию обозначил основные направления в построении современной системы управления санитарными и биологическими рисками в стране. Один из ключевых тезисов — формирование мощного и надёжного щита в области санитарной и биологической безопасности с максимально возможным использованием отечественных компонентов и оборудования. Особо отмечена потребность в технологиях, которые позволяют производить тест-системы для выявления патогенов за четыре дня. Срок исполнения поручения — к 2030 г. Для быстрой разработки тест-систем необходимо прежде всего развивать научный и производственный потенциал следующих ключевых компонентов наборов для ПЦР: ферменты, олигонуклеотиды, контрольные образцы и наборы для выделения и очистки ДНК/РНК из различных биоматериалов. Следует отметить, что эти компоненты входят в состав всех наборов реагентов, основанных на методах амплификации нуклеиновых кислот (МАНК).

Стратегию создания тест-систем на основе МАНК, в том числе за четыре дня, можно разбить на несколько этапов. Для начала необходимы сведения о геноме возбудителя. Это может быть как информация из базы данных геномов, например, платформы VGARus, так и геномная последовательность, по-

лученная различными методами секвенирования. Далее следует моделирование олигонуклеотидных последовательностей (праймеров и флуоресцентных зондов) для будущего набора. Затем осуществляется подбор оптимального эффективного метода выделения и очистки ДНК/РНК и ферментов с целью создания высокочувствительного теста. На завершающем этапе после сбора всех необходимых компонентов проводится тестирование набора на клинических образцах и определяются его аналитические характеристики.

Олигонуклеотиды (праймеры и флуоресцентные зонды) — одни из ключевых компонентов любого ПЦР-набора. Пандемия коронавирусной инфекции показала, что препятствием для быстрого масштабного выпуска тестов в формате ПЦР и изотермической амплификации служат недостаточно быстрые разработка и синтез олигонуклеотидов. Причём проблемы возникали как с синтезом в малых количествах, так и в больших объёмах для промышленного выпуска наборов. Кроме того, олигонуклеотиды используются при секвенировании нуклеиновых кислот, сборке генов, клонировании в качестве аптамеров и т.д. Поскольку ЦНИИ эпидемиологии Роспотребнадзора обладает ресурсами для олигосинтеза, ферментами собственного производства, а также возможностями для выпуска целого ряда наборов для выделения и очистки нуклеиновых кислот, под его эгидой можно за минимальный срок создать полноценную платформу для внедрения в производство ПЦР-наборов и протоколов для секвенирования.

В настоящее время при производстве наборов реагентов для молекулярной биологии активно используются самые разнообразные ферменты: ДНК-зависимые ДНК-полимеразы (полимераза Taq, полимеразы для горячего старта TaqF, полимеразы Bst); ДНК-зависимая РНК-полимераза бактериофага T7; РНК-зависимые ДНК-полимеразы или обратные транскриптазы/ревертазы (ревертаза MMLV, ревертаза AMV); рибонуклеаза H, урацил-ДНК-гликозилаза (УДГ), протеиназа K. Отметим, что институт ведёт работу по увеличению эффективности ферментов, повышению их устойчивости к всевозможным ингибиторам, получению новых ферментов для быстро развивающихся методов амплификации нуклеиновых кислот [45, 46].

Ферменты ЦНИИ эпидемиологии Роспотребнадзора не уступают по своим свойствам зарубежным аналогам, соответствуют критериям качества продукции, обеспечивают необходимый уровень каталитической активности, обладают устойчивостью к основным ингибиторам. Они служат основой наборов реагентов для выделения нуклеиновых кислот и широкого спектра тест-систем для диагностики заболеваний человека и животных как в формате ПЦР в режиме реального времени, так и LAMP и NASBA. Помимо самих ферментов, производятся соответствующие буферные растворы, формирую-

шие оптимальные условия для их работы. Благодаря собственному производству стоимость ферментов практически в 50 раз ниже зарубежных.

Наборы реагентов для диагностики *in vitro* надёжны, не уступают зарубежным аналогам и остаются экономически выгодными для потребителей. Более 3 тыс. клинично-диагностических лабораторий, медицинских центров и государственных учреждений используют результаты научных разработок института в своей повседневной работе. В ЦНИИ эпидемиологии Роспотребнадзора уже зарегистрировано/задекларировано более 200 наборов реагентов, обеспечивающих диагностику свыше 120 инфекционных болезней человека, а также более 40 ветеринарных тест-систем. Ежегодный выпуск продукции достигает 1 млн единиц. В период пандемии COVID-19 объём производства был увеличен в 6 раз, а по отдельным наборам реагентов — в 40 раз! Поставка продукции осуществляется более чем в 40 стран.

Редактирование генома за короткое время лидирует среди технологий модификации генома и широко применяется в различных областях биотехнологии. Системы направленного редактирования генома CRISPR/Cas могут быть адаптированы для терапии таких социально значимых инфекций, как ВИЧ, наследственных и приобретённых заболеваний, в частности, рака, аутоиммунных и орфанных (редких) заболеваний. Кроме того, применение белков CRISPR/Cas поможет решить задачу своевременной диагностики.

Внедрены технологии получения белков направленного редактирования генома CRISPR/Cas. Более того, разработан и оптимизирован протокол лиофилизации белков CRISPR/Cas, позволяющий изготавливать активные препараты, пригодные для транспортировки и хранения при комнатной температуре. Уже к марту 2024 г. на территории института запланирован запуск полупромышленного цикла производства препаратов белков CRISPR/Cas для научно-исследовательских целей, создания терапевтических и диагностических препаратов. Первая очередь производства будет включать восемь лиофильно высушенных ферментов CRISPR/Cas, в том числе высокоочищенных с низким содержанием бактериальных эндотоксинов. Такая линейка продукции белков полностью обеспечит потребность российских учёных, облегчит бремя импорта и будет способствовать технологической независимости России в области редактирования генома.

Для производства диагностических наборов нового поколения создан метод выявления единичных копий нуклеиновых кислот возбудителей инфекционных заболеваний, основанный на CRISPR/Cas-детекции, которая позволяет с высокой чувствительностью находить единичные копии нуклеиновых кислот в образцах после предварительной амплификации. Институт готовится к внедрению в производство платформенных решений по под-

готовке диагностических систем на основе амплификации, совмещённой с CRISPR/Cas-детекцией. Это даст возможность использовать уникальные тест-системы, не требующие высокотехнологичного оборудования (которые можно применять в том числе в полевых условиях, а также у постели больного). Налажены разработка современных тест-систем, новых технологий диагностики инфекционных болезней, производство высокотехнологичной продукции замкнутого цикла, включающее основные критически важные компоненты диагностических наборов (олигонуклеотиды, ферменты, контрольные образцы).

В России нужно осуществлять геномный и эпигеномный эпидемиологический надзор, реализовать научные проекты в области создания и совершенствования молекулярно-биологических методов диагностики возбудителей новых и возвращающихся инфекционных болезней, в том числе на основе современных технологий редактирования генома. Формирование платформ для конструирования универсальных рекомбинантных вакцин, активных против широкого спектра патогенов, требует расширения научных исследований реакций иммунной системы на рекомбинантные микроорганизмы, содержащие гены стимуляторов врождённого иммунного ответа. Благодаря анализу геномов и транскриптомов, а также эпигенетической информации открывается возможность идентифицировать мишени, наиболее перспективные для терапии и профилактики заболеваний, в том числе РНК-мишени, разрушающиеся вследствие РНК-интерференции. Развитие комплексного подхода к реализации системы геномного эпидемиологического надзора с учётом последних достижений фундаментальных исследований в вирусологии, иммунологии, биотехнологии позволит внести существенный вклад в обеспечение биологической безопасности Российской Федерации.

ЛИТЕРАТУРА

1. WHO Fact sheets. The top 10 causes of death. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/the-top-10-causes-of-death> (дата обращения 10.12.2023).
2. Государственный доклад “О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской Федерации в 2022 году”. М.: Роспотребнадзор, 2023.
Gosudarstvennyj doklad “O sostoyanii sanitarno-epidemiologicheskogo blagopoluchiya naseleniya v Rossijskoj Federacii v 2022 godu” [On the state of sanitary and epidemiological welfare of the population in the Russian Federation in 2022: State Report]. Moscow: Rospotrebnadzor, 2023. (In Russ.)
3. Акимкин В.Г., Попова А.Ю., Плоскирева А.А. и др. (2022) COVID-19: эволюция пандемии в России. Сообщение I: проявления эпидемического

- процесса COVID-19 // Журнал микробиологии, эпидемиологии и иммунобиологии. № 3. С. 269–286.
- Akimkin V.G., Popova A.Yu., Ploskireva A.A. et al.* (2022) COVID-19: evolyuciya pandemii v Rossii. Soobshchenie I: proyavleniya epidemicheskogo processa COVID-19 [COVID-19: the evolution of the pandemic in Russia. Report I: Manifestations of the COVID-19 epidemic process]. Zhurnal mikrobiologii, epidemiologii i immunobiologii, no. 3, pp. 269–286. (In Russ.)
4. *Онищенко Г.Г., Смоленский В.Ю., Ежлова Е.Б. и др.* (2013) Актуальные проблемы биологической безопасности в современных условиях. Часть 1. Концептуальные основы биологической безопасности // Вестник РАМН. № 10. С. 4–13.
Onishchenko G.G., Smolensky V.Yu., Ezhlova E.B. et al. (2013) Aktual'nye problemy biologicheskoy bezopasnosti v sovremennykh usloviyakh. Chast' 1. Konceptual'nye osnovy biologicheskoy bezopasnosti [Current problems of biological safety in modern conditions. Part 1. Conceptual basis of biological safety]. Vestnik RAMN, no. 10, pp. 4–13. (In Russ.)
 5. *Семенов Т.А.* (2010) Роль банка сывороток крови в системе биологической безопасности страны // Вестник Росздравнадзора. № 3. С. 55–58.
Semenenko T.A. (2010) Rol' banka syvorotok krvi v sisteme biologicheskoy bezopasnosti strany [The role of the blood serum bank in the biological safety system of the country]. Vestnik Roszdravnadzora, no. 3, pp. 55–58. (In Russ.)
 6. *Меринова О.А., Топорков А.В., Меринова Л.К. и др.* (2018) Биологическая безопасность: анализ современного состояния системы подготовки специалистов в Российской Федерации // Журнал микробиологии, эпидемиологии и иммунобиологии. № 3. С. 87–96.
Merinova O.A., Toporkov A.V., Merinova L.K. et al. (2018) Biologicheskaya bezopasnost': analiz sovremennogo sostoyaniya sistemy podgotovki specialistov v Rossijskoj Federacii [Biological safety: analysis the contemporary state of the system of training specialists in Russian Federation]. Zhurnal mikrobiologii, epidemiologii i immunobiologii, no. 3, pp. 87–96. (In Russ.)
 7. *Акимкин В.Г., Семенов Т.А., Дубоделов Д.В. и др.* (2023) Теория саморегуляции паразитарных систем и COVID-19 // Вестник РАМН. <https://doi.org/10.15690/vramn11607>
Akimkin V.G., Semenenko T.A., Dubodelov D.V. et al. (2023) Teoriya samoregulyacii parazitarnykh sistem i COVID-19 [The theory of self-regulation of parasitic systems and COVID-19]. Vestnik RAMN. <https://doi.org/10.15690/vramn11607> (In Russ.)
 8. *Акимкин В.Г., Попова А.Ю., Хафизов К.Ф. и др.* (2022) COVID-19: эволюция пандемии в России. Сообщение II: динамика циркуляции генотипов вируса SARS-CoV-2 // Журнал микробиологии, эпидемиологии и иммунобиологии. № 4. С. 381–396.
Akimkin V.G., Popova A.Yu., Khafizov K.F. et al. (2022) COVID-19: evolyuciya pandemii v Rossii. Soobshchenie II: dinamika cirkulyacii genovariantov virusa SARS-CoV-2 [COVID-19: evolution of the pandemic in Russia. Report II: dynamics of the circulation of SARS-CoV-2 genetic variants]. Zhurnal mikrobiologii, epidemiologii i immunobiologii, no. 4, pp. 381–396. (In Russ)
 9. *Anaiegoudari A., Mollaei H.R., Arababadi M.K., Nosratabadi R.* (2021) Severe Acute Respiratory Syndrome Coronavirus 2: The Role of the Main Components of the Innate Immune System // Inflammation. № 6. P. 2151–2169.
 10. *Fraschilla I., Amatullah H., Jeffrey K.L.* (2022) One genome, many cell states: epigenetic control of innate immunity // Curr. Opin. Immunol. V. 75. 102173.
 11. *Ong G.H., Lian B.S.X., Kawasaki T., Kawai T.* (2021) Exploration of Pattern Recognition Receptor Agonists as Candidate Adjuvants // Front. Cell. Infect. Microbiol. V. 11. 745016.
 12. *Labarrere C.A., Kassab G.S.* (2021) Pattern Recognition Proteins: First Line of Defense Against Coronaviruses // Front. Immunol. V. 12. 652252.
 13. *Mulder W.J.M., Ochando J., Joosten L.A.B. et al.* (2019) Therapeutic targeting of trained immunity // Nat. Rev. Drug Discov. № 7. P. 553–566.
 14. *Geckin B., Konstantin Fohse F., Dominguez-Andres J., Netea M.G.* (2022) Trained immunity: implications for vaccination // Curr. Opin. Immunol. V. 77. 102190.
 15. *Goodridge H.S., Ahmed S.S., Curtis N. et al.* (2016) Harnessing the beneficial heterologous effects of vaccination // Nat. Rev. Immunol. № 6. P. 392–400.
 16. *Shann F.* (2010) The non-specific effects of vaccines // Arch. Dis. Child. № 9. P. 662–667.
 17. *Aaby P., Roth A., Ravn H. et al.* (2011) Randomized trial of BCG vaccination at birth to low-birth-weight children: beneficial nonspecific effects in the neonatal period? // J. Infect. Dis. № 2. P. 245–252.
 18. *Tercan H., Riksen N.P., Joosten L.A.B. et al.* (2021) Trained Immunity: Long-Term Adaptation in Innate Immune Responses // Arterioscler. Thromb. Vasc. Biol. № 1. P. 55–61.
 19. *Bindu S., Dandapat S., Manikandan R. et al.* (2022) Prophylactic and therapeutic insights into trained immunity: A renewed concept of innate immune memory // Hum. Vaccin. Immunother. № 1. 2040238.
 20. *Sherwood E.R., Burelbach K.R., McBride M.A. et al.* (2022) Innate Immune Memory and the Host Response to Infection // J. Immunol. № 4. P. 785–792.
 21. *Arico E., Bracci L., Castiello L. et al.* (2022) Exploiting natural antiviral immunity for the control of pandemics: Lessons from Covid-19 // Cytokine Growth Factor Rev. V. 63. P. 23–33.

22. Netea M.G., Dominguez-Andres J., Barreiro L.B. *et al.* (2020) Defining trained immunity and its role in health and disease // *Nat. Rev. Immunol.* V. 20. P. 375–388.
23. Bekkering S., Dominguez-Andres J., Joosten L.A.B. *et al.* (2021) Trained Immunity: Reprogramming Innate Immunity in Health and Disease // *Annu. Rev. Immunol.* V. 39. P. 667–693.
24. Fanucchi S., Dominguez-Andres J., Joosten L.A.B. *et al.* (2021) The Intersection of Epigenetics and Metabolism in Trained Immunity // *Immunity.* № 1. P. 32–43.
25. Nieuwenhuizen N.E., Kulkarni P.S., Shaligram U. *et al.* (2017) The Recombinant Bacille Calmette-Guerin Vaccine VPM1002: Ready for Clinical Efficacy Testing // *Front. Immunol.* V. 8. 1147.
26. Nieuwenhuizen N.E., Kaufmann S.H.E. (2018) Next-Generation Vaccines Based on Bacille Calmette-Guerin // *Front. Immunol.* V. 9. 121.
27. Moulson A.J., Av-Gay Y. (2021) BCG immunomodulation: From the ‘hygiene hypothesis’ to COVID-19 // *Immunobiology.* № 1. 152052.
28. Escobar L.E. Molina-Cruz A., Barillas-Mury C. (2020) BCG vaccine protection from severe coronavirus disease 2019 (COVID-19) // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* № 30. P. 17720–17726.
29. Gong W., An H., Wang J. *et al.* (2022) The Natural Effect of BCG Vaccination on COVID-19: The Debate Continues // *Front. Immunol.* V. 13. 953228.
30. Алексеенко И.В., Васильев Р.Г., Кондратьева Л.Г. и др. (2023) Клеточные и эпигенетические аспекты программирования тренированного иммунитета и перспективы создания универсальных вакцин в преддверии учащающихся пандемий // *Генетика.* № 9. С. 981–1001.
Alekseenko I.V., Vasilov R.G., Kondrateva L.G. et al. (2023) Kletochnye i epigeneticheskie aspekty programmirovaniya trenirovannogo immuniteta i perspektivy sozdaniya universal'nyh vakcin v preddverii uchashchayushchihsyas pandemij [Cellular and epigenetic aspects of the programming of trained immunity and prospects for the creation of universal vaccines in anticipation of increasing pandemics]. *Genetika*, no. 9, pp. 981–1001. (In Russ.)
31. Balnis J., Madrid A., Hogan K.J. *et al.* (2021) Blood DNA methylation and COVID-19 outcomes // *Clin. Epigenet.* V. 13. 118.
32. Wang G., Xiong Z., Yang F. *et al.* (2022) Identification of COVID-19-Associated DNA Methylation Variations by Integrating Methylation Array and scRNA-Seq Data at Cell-Type Resolution // *Genes (Basel).* V. 13 (7). 1109.
33. Kaneko S., Takasawa K., Asada K. *et al.* (2021) Epigenetic Mechanisms Underlying COVID-19 Pathogenesis // *Biomedicines.* V. 9 (9). 1142.
34. Чернухин В.А., Наякшина Т.Н., Мезенцева Н.В. и др. (2005) Штамм бактерий Glacial ice bacterium I — продуцент эндонуклеазы рестрикции Gla I // Патент на изобретение RU 2287012 C1.
Chernuhin V.A., Nayakshina T.N., Mezenceva N.V. et al. (2005) Shtamm bakterij Glacial ice bacterium I — producent endonukleazy restrikcii Gla I [Bacterial strain Glacial ice bacterium I is a producer of Gla I restriction endonuclease]. Patent na izobretenie RU 2287012 S1. (In Russ.)
35. Гончар Д.А., Акишев А.Г., Дегтярёв С.Х. (2009) Способ определения гиперметилированных CpG островков в области генов-супрессоров опухолевого роста в ДНК человека // Патент на изобретение RU 2413773 C1.
Gonchar D.A., Akishev A.G., Degtyaryov S.H. (2009) Sposob opredeleniya gipermetilirovannyh CpG ostrovkov v oblasti genov-supressorov opuholevogo rosta v DNK cheloveka [A method for determining hypermethylated CpG islets in the region of tumor suppressor genes in human DNA]. Patent na izobretenie RU 2413773 S1. (In Russ.)
36. Кузнецов В.В., Абдурашитов М.А., Акишев А.Г., Дегтярёв С.Х. (2014) Способ определения нуклеотидной последовательности Pu(5mC)GPy в заданном положении протяжённой ДНК // Патент на изобретение RU 2525710 C1.
Kuznecov V.V., Abdurashitov M.A., Akishev A.G., Degtyaryov S.H. (2014) Sposob opredeleniya nukleotidnoj posledovatel'nosti Pu(5mC)GPY v zadannom polozhenii protyazhyonnoj DNK [A method for determining the nucleotide sequence of Pu(5mC)GPY in a given position of extended DNA]. Patent na izobretenie RU 2525710 S1. (In Russ.)
37. Pashkov E., Korchevaya E., Faizuloev E. *et al.* (2022) Knockdown of FLT4, Nup98, and Nup205 Cellular Genes Effectively Suppresses the Reproduction of Influenza Virus Strain A/WSN/1933 (H1N1) *In vitro* // *Infect. Disord. Drug. Targets.* V. 22 (5). e250322202629.
38. Акимкин В.Г., Петров В.В., Красовитов К.В. и др. (2021) Молекулярные методы диагностики новой коронавирусной инфекции: сравнение петлевой изотермической амплификации и полимеразной цепной реакции // *Вопросы вирусологии.* № 6. С. 417–424.
Akimkin V.G., Petrov V.V., Krasovitev K.V. et al. (2021) Molekulyarnye metody diagnostiki novoy koronavirusnoj infekcii: sravnenie petlevoj izotermicheskoy amplifikacii i polimeraznoj cepnoj reakcii [Molecular methods for diagnosing a new coronavirus infection: comparison of loop isothermal amplification and polymerase chain reaction]. *Voprosy virusologii*, no. 6, pp. 417–424. (In Russ.)
39. Синуцын С.О., Котов И.А., Самойлов А.Е. и др. (2021) NGS-секвенирования // Молекулярная диагностика и биобезопасность — 2021. COVID-19: эпидемиология, диагностика, профилактика // Онлайн-конгресс с международным участием.

- 28–29 апреля 2021 г. Сб. тезисов. М.: ЦНИИ эпидемиологии Роспотребнадзора. С. 94–94.
- Sinitsyn S.O., Kotov I.A., Samoilov A.E. et al.* NGS-sekvenirovaniya [NGS sequencing]. Molekulyarnaya diagnostika i biobezopasnost' – 2021. COVID-19: epidemiologiya, diagnostika, profilaktika // Onlajn-kongress s mezhdunarodnym uchastiem. 28–29 aprelya 2021 g. Sb. tezisev. Moscow: FBUN Central Research Institute of Epidemiology of Rosпотребнадзор, pp. 94–94. (In Russ.)
40. *Esman A., Cherkashina A., Mironov K. et al.* (2022) SARS-CoV-2 Variants Monitoring Using Real-Time PCR // *Diagnostics*. MDPI. V. 12. 2388.
41. *Стародубов В.И., Береговых В.В., Акимкин В.Г. и др.* (2022) COVID-19 в России: эволюция взглядов на пандемию (часть 1) // *Вестник РАМН*. № 3. С. 199–207.
- Starodubov V.I., Beregovykh V.V., Akimkin V.G. et al.* (2022) COVID-19 v Rossii: evolyuciya vzglyadov na pandemiyu (chast' 1) [COVID-19 in Russia: the evolution of views on the pandemic. Message 1]. *Vestnik RAMN*, no. 3, pp. 199–207. (In Russ.)
42. *Акимкин В.Г., Семенов Т.А., Углева С.В. и др.* (2022) COVID-19 в России: эпидемиология и молекулярно-генетический мониторинг // *Вестник РАМН*. № 4. С. 254–260.
- Akimkin V.G., Semenenko T.A., Ugleva S.V. et al.* (2022) COVID-19 v Rossii: epidemiologiya i molekulyarno-geneticheskij monitoring [COVID-19 in Russia: epidemiology and molecular genetic monitoring]. *Vestnik RAMN*, no. 4, pp. 254–260. (In Russ.)
43. *Стародубов В.И., Береговых В.В., Акимкин В.Г. и др.* (2022) COVID-19 в России: эволюция взглядов на пандемию. Сообщение 2 // *Вестник РАМН*. № 4. С. 291–306.
- Starodubov V.I., Beregovykh V.V., Akimkin V.G. et al.* (2022) COVID-19 v Rossii: evolyuciya vzglyadov na pandemiyu. Soobshchenie 2 [COVID-19 in Russia: the evolution of views on the pandemic. Message 2]. *Vestnik RAMN*, no. 4, pp. 291–306. (In Russ.)
44. *Акимкин В.Г.* (2022) Эпидемиология и диагностика COVID-19. Мониторинг эволюционных изменений вируса SARS-CoV-2 // *Вестник РАН*. № 7. С. 647–653.
- Akimkin V.G.* (2022) COVID-19 Epidemiology and Diagnosis: Monitoring Evolutionary Changes in the SARS-COV-2 Virus // *Herald of the Russian Academy of Sciences*. № 4. P. 392–398.
45. *Пика М.И., Михеева О.О., Соловьёва Е.Д. и др.* (2023) Получение Bst-полимеразы для диагностики различных инфекций методом петлевой изотермической амплификации // *Журнал микробиологии, эпидемиологии и иммунобиологии*. № 3. С. 210–218.
- Pika M.I., Mikheeva O.O., Solovyova E.D. et al.* (2023) Poluchenie Bst-polimerazy dlya diagnostiki razlichnyh infekcij metodom petlevoj izotermicheskoy amplifikatsii [Preparation of Bst polymerase for the diagnosis of various infections using loop isothermal amplification]. *Zhurnal mikrobiologii, epidemiologii i immunobiologii*, no. 3, pp. 210–218. (In Russ.)
46. *Хафизов К.Ф., Петров В.В., Красовитов К.В. и др.* (2021) Экспресс-диагностика новой коронавирусной инфекции с помощью реакции петлевой изотермической амплификации // *Вопросы вирусологии*. № 1. С. 17–28.
- Khafizov K.F., Petrov V.V., Krasovitev K.V. et al.* (2021) Ekspress-diagnostika novej koronavirusnoj infekcii s pomoshch'yu reakcii petlevoj izotermicheskoy amplifikatsii [Express diagnosis of new coronavirus infection using loop isothermal amplification reaction]. *Voprosy virusologii*, no. 1, pp. 17–28. (In Russ.)

EPIDEMIOLOGICAL, CELLULAR, GENETIC AND EPIGENETIC ASPECTS OF BIOSAFETY

V.G. Akimkin^{a,*}, V.V. Zverev^{b,c,**}, M.P. Kirpichnikov^{d,e,***}, E.D. Sverdlov^{f,****},
V.I. Starodubov^{e,j,*****}, N.K. Yankovsky^{d,h,*****}

^aCentral Research Institute for Epidemiology, Moscow, Russia

^bI.I. Mechnikov Research Institute of Vaccines and Serums, Moscow, Russia

^cI.M. Sechenov First Moscow State Medical University of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russia

^dM.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

^eThe Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

^fResearch Center "Kurchatov Institute", Moscow, Russia

^jCentral Research Institute for Organization and Informatization of Healthcare of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russia

^hN.I. Vavilov Institute of General Genetics, Moscow, Russia

*E-mail: vgakimkin@yandex.ru

**E-mail: vitalyzverev@outlook.com

***E-mail: kirpichnikov@inbox.ru biology@ips.ras.ru

****E-mail: edsverd@gmail.com

*****E-mail: starodubov@presidium.ras.ru

*****E-mail: yankovsky@vigg.ru

Currently, the problem of biological safety is extremely relevant for all countries of the world due to the expansion of the spectrum of real and potential threats caused by exposure to dangerous agents of biological nature. The pandemic of the new coronavirus infection has clearly demonstrated its vulnerability to the world. The inevitability of the occurrence of future epidemics necessitates the introduction of scientific developments in the field of creation and improvement of methods for amplification of nucleic acids, identification of pathogens using next-generation sequencing, genome editing technologies, etc. It seems advisable to study the reactions of the immune system to recombinant microorganisms containing genes for stimulators of the innate immune response in order to develop platforms for the creation of universal vaccines active against a wide range of pathogens. Based on the analysis of genomes and transcriptomes, it is possible to identify targets (including RNA targets destroyed by RNA interference) that are most promising for the treatment and prevention of new and recurring infectious diseases. The development of an integrated approach to the implementation of the genomic and epigenomic epidemiological surveillance system, taking into account the latest achievements of fundamental research in the field of virology, immunology, and biotechnology, will make a significant contribution to ensuring the biological safety of the Russian Federation.

Keywords: biosafety, epidemiology, immunology, modern diagnostic technologies, trained immunity, genomics, epigenetics.

НАУЧНАЯ СЕССИЯ ОБЩЕГО СОБРАНИЯ ЧЛЕНОВ РАН

БИОМЕДИЦИНСКИЕ НЕЙРОТЕХНОЛОГИИ: ОТ ИЗУЧЕНИЯ ЖИВЫХ СИСТЕМ К КОРРЕКЦИИ ПАТОЛОГИИ НЕРВНОЙ СИСТЕМЫ

© 2024 г. В.И. Скворцова^{a,*}, В.В. Белоусов^{b,**}

^aФедеральное медико-биологическое агентство, Москва, Россия

^bФедеральный центр мозга и нейротехнологий ФМБА России, Москва, Россия

*E-mail: fmba@fmba.gov.ru

**E-mail: belousov@fccps.ru

Поступила в редакцию 14.03.2024 г.

После доработки 20.03.2024 г.

Принята к публикации 30.03.2024 г.

Статья подготовлена на основе доклада в рамках Научной сессии Общего собрания членов РАН и посвящена актуальным вопросам развития биомедицинских нейротехнологий в России. Авторы обращают внимание на направления работы, точки роста и уникальный опыт междисциплинарного и комплексного подхода Федерального медико-биологического агентства и ведомственных научно-исследовательских центров при решении фундаментальных и прикладных задач в области нейронаук, разработки инновационных лекарственных препаратов, технологий лечения заболеваний нервной системы и нейрореабилитации.

Ключевые слова: Федеральное медико-биологическое агентство, технологические платформы, нейротехнологии, заболевания нервной системы, синтетическая биология, термогенетика, омиксные технологии, регенеративная терапия, нейроинтерфейсы, нейрореабилитация.

DOI: 10.31857/S0869587324030131, EDN: GFVQDP

Нейронауки — одно из наиболее стремительно развивающихся современных направлений. Самая крупная конференция по нейронаукам (Society for Neuroscience) ежегодно собирает около 40 тыс. участников, что в 5–7 раз масштабнее любых других подобных мероприятий. Учёные активно работают

над решением таких важных вопросов, как механизмы функционирования мозга и развития нейродегенеративных нарушений, связь сознания и психики с молекулярно-биологическими процессами.

Среди приоритетных задач Федерального медико-биологического агентства (ФМБА России) — исследование мозга, разработка и внедрение биомедицинских нейротехнологий. Была принята ведомственная программа “Мозг и нейротехнологии”, функционирует соответствующая проблемная комиссия, координирующая изучение мозга в биомедицинском кластере, в который входят ведущие научные организации, подведомственные агентству. Головным центром является Федеральный центр мозга и нейротехнологий ФМБА России (ФЦМН ФМБА России).

Нейротехнологии — междисциплинарная и комплексная область, требующая привлечения специалистов точных, естественных, инженерных и гуманитарных наук. Стратегические партнёры ФМБА России в направлении нейротехнологий — ведущие институты Российской академии наук, передовые университеты, совместно с ними ведутся исследо-



СКВОРЦОВА Вероника Игоревна — член-корреспондент РАН, руководитель ФМБА России. БЕЛОУСОВ Всеволод Вадимович — член-корреспондент РАН, генеральный директор ФЦМН ФМБА России.

вания и готовятся научные и инженерные кадры. Технологические партнёры — ООО “Лифт Центр” и Российский квантовый центр, промышленные — госкорпорации “Ростех” и “Росатом”.

Синтетические нейротехнологии. Важнейшую роль в изучении механизмов функционирования здорового мозга и патогенеза заболеваний нервной системы играют синтетические нейротехнологии, к которым относятся биосенсорика, хемо-, опто- и термогенетика.

Биосенсоры — генетически кодируемые флуоресцентные зонды, предназначенные для детекции сигнальных молекул и метаболитов в живых клетках, органах и тканях. Молекула биосенсора состоит из флуоресцентного белка, интегрированного с природным белковым сенсорным доменом. Изменения во внутриклеточной концентрации определённого вещества вызывают конформационные перестройки в сенсорной части молекулы, которые передаются на флуоресцентную часть, что приводит к изменению спектра флуоресценции белка.

Научными коллективами ФЦМН ФМБА России и Института биоорганической химии им. академиков М.М. Шемякина и Ю.А. Овчинникова РАН (ИБХ РАН) разработаны биосенсоры для детекции таких молекул, как пероксид водорода [1], глутатион, NADH, гипохлорит [2], что позволило обозначить их роль, например, в патогенезе ишемического инсульта [3]. Так, в мозг экспериментальных животных с фокальной ишемией путём стереотаксической инъекции аденоассоциированных вирусов были доставлены гены биосенсоров. Туда же имплантировали оптические волокна, через которые удалось наблюдать динамику метаболических параметров мозга в ядре инсульта, зоне пенумбры и более отдалённых областях. Впервые были зарегистрированы патологические волны ацидоза, изменений pH, распространяющиеся из ядра инсульта в кору ишемизированного полушария. Интенсивность этих осцилляций достоверно коррелировала с объёмом повреждения ткани.

В настоящее время ведётся поиск новых эффективных нейропротекторов, действующих в раннем периоде “терапевтического окна”, блокирующих патологические волны ацидоза и защищающих ткань мозга от запуска и распространения последующих каскадов отдалённых последствий ишемии, которые вызывают массивную гибель нейронов и глии (клеток нервной ткани, выполняющих важнейшие функции по поддержанию процессов жизнедеятельности нейронов).

Если с помощью биосенсоров можно мониторировать пространственную и временную динамику определённых молекул в клетках мозга, то *хемогенетика* позволяет управлять их концентрацией и таким образом изучать их роль в тех или иных процессах в клетках и тканях. Как и сенсоры, генетически кодируемая система доставляется в мозг

с помощью аденоассоциированных вирусов. Разработан хемогенетический генератор пероксида водорода на основе дрожжевой оксидазы D-аминокислот для установления роли окислительного стресса в развитии нейродегенеративных заболеваний (исследования проводятся при поддержке Российского научного фонда). Показано, что даже небольшой окислительный стресс, который никак не влияет на параметры синаптического выброса нейромедиатора, ингибирует такие базовые процессы нейрональной пластичности, как долговременная потенция и долговременная депрессия, а также нарушает сетевую активность нейронов гиппокампа [4]. Именно нарушения синаптической пластичности, обуславливающей запоминание и обучение, выступают ранними признаками многих нейродегенеративных заболеваний, например, болезни Альцгеймера. Под контролем хемогенетических систем проводится сравнительный анализ разрабатываемых препаратов, направленных на превентивную терапию деменции и других проявлений нейродегенерации.

Ещё одним примером синтетических нейротехнологий служит *оптогенетика* — управление активностью нейронов с помощью светозависимых белков-фоторецепторов из различных одноклеточных организмов. Следует отметить, что существенным ограничением данной технологии является иммунный ответ организма на чужеродный белок. В связи с этим сотрудниками ФЦМН ФМБА России, ИБХ РАН и Российского национального исследовательского медицинского университета им. Н.И. Пирогова была разработана альтернативная технология нейростимуляции — *термогенетика*, основанная на использовании термочувствительных ионных каналов человека [5]. Белки экспрессируются в сенсорных окончаниях нейронов в коже человека, благодаря им мы чувствуем тепло и холод. Встраивая эти ионные каналы в нейроны мозга, получаем возможность контролировать активность нейронов с помощью коротких импульсов инфракрасного лазера либо фокусированного ультразвука. Эксперименты на животных показали, что при активации терморецепторов в тормозных нейронах мозга, локализованных в зоне потенциальной эпилептоидной активности, можно купировать (в том числе превентивно) распространение волн патологического возбуждения нейронов. Таким образом, данная нейротехнология может потенциально рассматриваться как средство лечения пациентов, страдающих очаговыми формами эпилепсии.

Омиксные технологии предоставляют большой объём важной информации о патогенезе заболеваний нервной системы. Коллективы научных центров биомедицинского кластера ФМБА России проводят генетические, эпигенетические, мультиомиксные исследования людей с заболеваниями нервной системы разной природы, в том числе при нейродегенеративных “болезнях накопления” (болезнь Альцгеймера).

Внедрены передовые технологии полногеномного секвенирования с GWAS-анализом, изучаются транскриптомы в единичных клетках отдельных структур головного мозга. Цель учёных — достичь понимания генетических основ “болезней накопления”, поиск ранних предикторов и диагностически значимых биомаркеров патологического процесса в периферической крови и спинномозговой жидкости пациентов.

Исследования Центра стратегического планирования ФМБА России (ЦСП ФМБА России) показали, что в популяционной выборке населения России выявлены 39 полиморфизмов, ассоциированных с болезнью Альцгеймера. При этом достоверные отличия в гене PSEN2 выявлены для пяти вариантов и для двух — в гене APOE. Метильный анализ пациентов с болезнью Альцгеймера выявил отличия в уровне метилирования для 2 тыс. генов (по сравнению с популяционным уровнем). Для трёх из них (кодирующих важнейшие белки синапсов) они были статистически достоверными. На основе анализа данных генетических сигналов клеток периферической крови выполнено моделирование нейро- и иммуновоспалительных процессов в периферической крови при болезни Альцгеймера. Показано значительное повышение (в 3–4 раза) количества CD16+ NK (натуральные киллеры), что позволяет предположить существенную воспалительную компоненту в патогенезе заболевания.

Кластер научных центров ФМБА России работает над созданием протеомных диагностических систем, направленных на обнаружение ранних предикторов болезни Альцгеймера в крови, что поможет выявить риск развития заболевания за несколько лет до проявления первых клинических симптомов.

Платформы для разработки инновационных лекарственных препаратов. За последние десятилетия произошёл прорыв в ранней диагностике заболеваний мозга с применением методов *нейровизуализации* и *ядерной медицины*. В ФЦМН ФМБА России функционирует блок радионуклидной диагностики, оснащённый уникальным аппаратом ПЭТ-МРТ, который позволяет совмещать ПЭТ-изображения с любыми модалностями высокопольной 3-тесловой магнитно-резонансной томографии, что значительно расширяет возможности визуализации любых структур мозга и его кровоснабжения. В связи с этим на передний план выходят разработка и внедрение инновационных радиофармпрепаратов, технологий Иммуно-ПЭТ, Тау-Пэт на основе ультракороткоживущих радионуклидов (совместно с госкорпорацией “Росатом”). Их внедрение планируется осуществлять в Циклотронно-радиохимическом комплексе (создаваемом совместно с ЦСП ФМБА России), с помощью которого можно проводить исследования в течение первых 10–15 мин с момента получения препарата.

Для создания новых оригинальных радиофармпрепаратов, помимо радионуклидов, необходимо разрабатывать и сами молекулярные препараты — малые молекулы, белковые препараты, моноклональные антитела. ФМБА России внедрены соответствующие платформенные принципы. Благодаря универсальному оборудованию и отработанным алгоритмам взаимодействия технологические платформы позволяют быстро ориентировать площадку на производство конкретного препарата. В системе ФМБА России созданы технологические платформы для разработки и производства рекомбинантных белков, препаратов на основе пептидного и олигонуклеотидного синтеза, РНК-интерференции, векторных и конъюгированных вакцин и др.

В 2021 г. в рамках Года науки и технологий был организован Научно-производственный комплекс ФЦМН ФМБА России. Здесь функционируют технологические платформы для разработки, масштабирования и GMP-производства генотерапевтических, иммунобиологических и клеточных препаратов. Проводятся доклинические испытания собственного препарата для лечения спинальной мышечной атрофии. Исследуются возможности других генотерапевтических средств в терапии нейродегенеративных заболеваний, обусловленных гибелью клеток по механизму ферроптоза. В рамках программы Правительства РФ по импортозамещению лекарств, подверженных риску дефектуры, производственным партнёрам переданы продуценты и технологии очистки ряда иммунологических препаратов на основе моноклональных антител. Кроме того, создан первый препарат для регенеративной терапии спинальной травмы на основе мезенхимальных стволовых клеток в фибриновом гидрогеле.

В настоящее время единственным подходом, подтвердившим свою клиническую эффективность в плане восстановления двигательных и висцеральных функций при тяжёлой спинальной травме, является *нейромодуляция*. В эпидуральное пространство пациента имплантируется электродная матрица, затем проводится нейростимуляция спинного мозга по определённому алгоритму, активирующему центры ходьбы. Это приводит к перестройке нейронных связей в оставшихся структурах спинного мозга и постепенному восстановлению функции. Однако эффективность данного метода резко снижается из-за образования зоны воспаления и глиального рубца в области травмы, что мешает формированию новых нервных волокон и связей. Мезенхимальные стволовые клетки секретируют противовоспалительные и трофические факторы, в то же время их секрет помогает соседним тканям приобрести или сохранить пластичность.

Завершены доклинические исследования комбинированного регенеративного препарата, в ходе которых зафиксировано значительное увеличение эффективности нейромодуляции у экспериментальных

животных со спинальной травмой. Показано, что восстановление животных достоверно возрастает и ускоряется. Началась подготовка к клиническим испытаниям.

Федеральный научно-клинический центр физико-химической медицины и ФМБА России ведут работы по клеточному перепрограммированию клеток кожи конкретного пациента в индуцируемые плюрипотентные клетки с последующей их дифференцировкой в нейрональную ткань и получением органоидов мозга — своего рода мини-мозга миллиметрового размера. Это позволяет изучать молекулярные и клеточные механизмы патогенеза различных заболеваний нервной системы, проводить скрининг персонализированных препаратов. С помощью данной технологии специалистам ФНКЦ ФХМ ФМБА России и Научного центра неврологии удалось выявить структурные аномалии при развитии мозга пациентов с некоторыми формами орфанных заболеваний, например, синдромом Насименто, а также полиглутаминовыми заболеваниями (атаксия 17-го типа и хорея Гентингтона) [6].

Можно ли использовать тканеинженерные конструкции в заместительной терапии при инсульте, черепно-мозговой травме или после нейрохирургического вмешательства, когда утрачивается область мозга, отвечающая за какую-либо функцию? Уже продемонстрирована возможность интеграции нейроорганов в мозг мыши или крысы с образованием синаптических связей между графтом и реципиентом [7]. Однако главный технологический вызов в настоящий момент — создание тканеинженерных конструкций мозга с заданной архитектурой. Аксоны и дендриты имеют определённую направленность и коннективность, характерные для конкретного участка мозга, тогда как традиционный нейрооргановид представляет собой клубок нейронов и глиальных клеток со случайной направленностью нейральных отростков и связями между ними.

Сложность моделирования клеточной, аксональной и синаптической архитектуры фрагмента мозга чрезвычайно, и для дальнейшего продвижения в этом направлении мы применяем следующие основные подходы:

- биопечать, позволяющая создавать послойные гидрогелевые каркасы, причём каждый слой может содержать клетки и факторы, которые определяют направленность роста отростков нейрона;
- вместе с Научно-исследовательским техническим университетом МИСИС мы используем биополимерные адгезивные биodeградируемые скаффолды с направленным расположением волокон; клетки на таком скаффолде также растут направленно, и это даёт надежду, что заместительная терапия мозга в перспективе выйдет из области научной фантастики.

Передовые инструментальные технологии для терапии заболеваний мозга, нейрореабилитация. Фоку-

сированный ультразвук — технология, которая ещё недавно казалась недостижимой, а сейчас уже внедрена в медицинскую практику [8]. В зависимости от частоты и интенсивности фокусированного ультразвука можно добиться двух типов воздействия на ткань: термального и механического.

Термальный эффект используется в нейрохирургии в сочетании с МРТ-визуализацией. Например, при треморе, ассоциированном с болезнью Паркинсона, в ФЦМН ФМБА России применяется термодеструкция субталамических ядер промежуточного мозга под контролем МРТ. Пациент находится в сознании, без анестезии, операция не доставляет сильного дискомфорта. Тремор уходит прямо во время процедуры, сразу после операции человек возвращается к нормальной жизни. Мы готовимся к применению фокусированного ультразвука для термодеструкции очагов эпилепсии, а также глубоких опухолей и метастазов в мозг.

Проектный офис по разработке медицинского оборудования ФЦМН ФМБА России в сотрудничестве с госкорпорацией “Ростех” занимается проектированием роботизированного комплекса фокусированного ультразвука, способного таргетировать не только глубокие, но и более поверхностные области мозга с помощью ультразвуковой навигации, что позволит использовать прибор в любой нейрохирургической операционной. В настоящее время завершаются доклинические испытания установки и подготовка к производству.

Другие параметры фокусированного ультразвука оказывают, скорее, механические эффекты с временным открытием в любой области мозга гематоэнцефалического барьера, обычно непроницаемого для множества препаратов и биоинженерных клеточных конструкторов. Благодаря этому появляется возможность доставлять необходимые лекарственные средства адресно в структуры мозга. После установления роли лимфатической и менингеальной лимфатической систем в патофизиологии “болезней накопления” предложены новые терапевтические стратегии для борьбы с протеинопатией и прогрессированием заболеваний с помощью открытия гематоэнцефалического барьера фокусированным ультразвуком и дополнительных прокогнитивных влияний.

Современные нейротехнологии стали важнейшим этапом реабилитации пациентов, перенёсших заболевания нервной системы. Прежде всего это методы, основанные на биологической обратной связи, которые позволяют в режиме реального времени регистрировать параметры (например, движения человека) и автоматически подстраивать под них реабилитационный сценарий и нагрузку, что значительно повышает реабилитационную эффективность, улучшает все параметры ходьбы и других функций.

Хорошо зарекомендовали себя технологии *виртуальной реальности*, направленные на восстанов-

ление равновесия и ходьбы, зрительного внимания, ориентирования в пространстве, зрительно-моторной координации, когнитивно-аффективных функций. Иллюзорные программы способствуют преодолению внутренних барьеров и улучшению нарушенных процессов более чем у 90% пациентов.

В неврологическую клинику в современном исполнении вернулись технологии *электроцевтики*: в виде многоканальной и многомодальной стимуляции структур головного мозга с помощью транскраниальной магнитной стимуляции, транскраниальной электростимуляции постоянным или переменным электрическим током, фотостимуляции мерцающим красным светом и др.

Группой компаний “Нейроботикс” разработано нейрореабилитационное устройство Нейроплей, которое основано на детектировании биоэлектрических ритмов головного мозга и самоуправлении ими. Оно успешно адаптировано ФЦМН ФМБА России и апробировано совместно с Департаментом психологической работы Министерства обороны для устранения стрессовых расстройств у личного состава. В сотрудничестве с госкорпорацией “Росатом” ведётся адаптация этого прибора для операторов установок критической инфраструктуры. Кроме того, разрабатываются отечественные айтрекеры для нейрореанимации, реабилитационных приборов с биологической обратной связью, модульных экзоскелетов.

Когда нарушенные неврологические функции необратимо утрачены и их невозможно восстановить, нужно обращаться к *нейропротезированию*. Оно охватывает такие сферы, как разработка неинвазивных и инвазивных интерфейсов “мозг—компьютер”, которые позволяют преобразовывать активность мозга в сигналы, управляющие различными внешними устройствами; электродные матрицы для спинальной нейромодуляции при травмах спинного мозга; последние поколения зрительных и слуховых протезов, имплантируемых непосредственно в соответствующие отделы головного мозга; нейропротезы конечностей, управляемые сигналами нервной системы.

Для успешного развития нейропротезирования необходимо преодолеть ряд технологических барьеров, приводящих к отторжению имплантата тканями головного и спинного мозга. Нужно создать мягкую электронику, механические свойства которой будут соответствовать окружающим тканям. Данные работы ведутся в научных центрах ФМБА России совместно с ООО “Лифт Центр”, МИСИС и другими партнёрами. Современные нейроинтерфейсы принимают сигналы от больших групп нейронов. Чем крупнее имплантированный электрод, тем больше область мозга, от которой измеряется интегрированный сигнал. Важно получить нейроинтерфейсы, которые будут принимать информацию от отдельных нейронов, общаться с ними на языке синаптических контактов.

Коллективы ООО “Лифт Центр” и ФЦМН ФМБА России разрабатывают гибридные функционализированные микроэлектродные матрицы, которые могут принимать сигналы от синапсов нейронов, либо стимулировать нейроны через синаптическую передачу. Эти матрицы лягут в основу имплантируемой микроэлектроники будущего и позволят не только помещать в мозг сверхминиатюрные устройства, но и изучать взаимодействия между отдельными синапсами и ансамблями нейронов, чтобы понять логику нейрональной обработки сигналов, механизмов запоминания и обучения.

В заключение необходимо подчеркнуть, что национальный технологический суверенитет Российской Федерации в области нейротехнологий может быть достигнут только путём междисциплинарного взаимодействия клинических и фундаментальных нейронаук (включая нейробиологию, нейрогенетику, нейрофизиологию и др.) с точными, естественными, инженерными и гуманитарными науками. Для дальнейшего поступательного развития нужно создать Межведомственный научный совет по нейрокогнитивным технологиям при Президиуме РАН с включением в его состав представителей всех заинтересованных отделений РАН и актуализировать Федеральную научную программу исследований мозга.

ЛИТЕРАТУРА

1. Pak V.V., Ezeriņa D., Lyublinskaya O.G. et al. (2020) Ultrasensitive Genetically Encoded Indicator for Hydrogen Peroxide Identifies Roles for the Oxidant in Cell Migration and Mitochondrial Function. *Cell Metab.*, no. 31 (3), pp. 642–653.
2. Kostyuk A.I., Tossounian M.A., Panova A.S. et al. (2022) Hypocrates is a genetically encoded fluorescent biosensor for (pseudo)hypohalous acids and their derivatives. *Nat. Commun.*, no. 13 (1), pp. 1–71.
3. Kelmanson I.V., Shokhina A.G., Kotova D.A. et al. (2021) *In vivo* dynamics of acidosis and oxidative stress in the acute phase of an ischemic stroke in a rodent model. *Redox Biol.*, no. 48, 102178.
4. Kalinichenko A.L., Jappy D., Solius G.M. et al. (2023) Chemogenetic emulation of intraneuronal oxidative stress affects synaptic plasticity. *Redox Biol.*, no. 60, 102604.
5. Ermakova Y.G., Lanin A.A., Fedotov I.V. et al. (2017) Thermogenetic neurostimulation with single-cell resolution. *Nat. Commun.*, no. 8, 15362.
6. Nekrasov E.D., Vigont V.A., Klyushnikov S.A. et al. Manifestation of Huntington's disease pathology in human induced pluripotent stem cell-derived neurons. *Mol. Neurodegener.*, no. 11, 27.
7. Revah O., Gore F., Kelley K.W. et al. (2022) Maturation and circuit integration of transplanted human cortical organoids. *Nature*, no. 610 (7931), pp. 319–326.

8. Джафарова М.Ю., Джафаров В.М., Сенько И.В., Белоусов В.В. (2022) Применение фокусированного ультразвука под контролем магнитно-резонансной томографии для лечения тремора при болезни Паркинсона. Клиническое наблюдение и обзор литературы // Российский неврологический журнал. № 6. С. 56–62.

Jafarova M.Yu., Jafarov V.M., Senko I.V., Belousov V.V. (2022) Application of focused ultrasound under the control of magnetic resonance imaging for the treatment of tremor in Parkinson's disease. Clinical observation and literature review. Russian Neurological Journal, no. 6, pp. 56–62. (In Russ.)

BIOMEDICAL NEUROTECHNOLOGIES: FROM THE STUDY OF LIVING SYSTEMS TO THE CORRECTION OF PATHOLOGY OF THE NERVOUS SYSTEM

V.I. Skvortsova^{a,*}, V.V. Belousov^{b,**}

^a*Federal Medical and Biological Agency, Moscow, Russia*

^b*Federal Center for Brain and Neurotechnology of the FMBA of Russia, Moscow, Russia*

^{*}*E-mail: fmba@fmba.gov.ru*

^{**}*E-mail: belousov@fccps.ru*

The article, prepared based on a report presented at a scientific session of the general meeting of RAS members, is devoted to topical issues of the development of biomedical neurotechnologies in Russian Federation. The authors draw attention to the main directions, points of growth and the unique experience of the interdisciplinary and integrated approach of the Federal Medical Biological Agency and its research centers in solving fundamental and applied problems in the field of neuroscience, the development of innovative medicines, technologies for the treatment of diseases of the nervous system and neurorehabilitation.

Keywords: Federal Medical Biological Agency, technological platforms, neurotechnologies, diseases of the nervous system, synthetic biology, thermogenetics, omics technologies, regenerative therapy, neurointerfaces, neurorehabilitation.

НАУЧНАЯ СЕССИЯ ОБЩЕГО СОБРАНИЯ ЧЛЕНОВ РАН

**О НАУЧНОЙ СЕССИИ ОБЩЕГО СОБРАНИЯ ЧЛЕНОВ РАН “РОССИЙСКАЯ
АКАДЕМИЯ НАУК В РЕШЕНИИ ПРОБЛЕМ НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО
РАЗВИТИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ”**

ПОСТАНОВЛЕНИЕ ОБЩЕГО СОБРАНИЯ ЧЛЕНОВ РАН

В настоящее время происходит процесс крушения однополярного мира, сложившегося на рубеже XX–XXI вв., путём его распада на макрорегионы и последующего формирования нового хозяйственного уклада. В масштабах планеты складывается глобальная система функционирования природных, социальных, экономических и технологических комплексов в интересах повышения качества жизни; эта система базируется на фундаментальных законах развития Природы, Человека и Общества.

Ведущие позиции в новом мировом укладе займут только те страны, которые способны самостоятельно решать две основные задачи: обеспечение высокого качества жизни своего населения и собственной обороны и безопасности. Очевидно, что успешное решение этих проблем будет зависеть от наличия в стране современного научно-технологического комплекса, основанного на лидирующей роли фундаментальной науки.

Указом Президента Российской Федерации от 1 декабря 2016 г. № 642 утверждена Стратегия научно-технологического развития Российской Федерации (далее – Стратегия). В целях её выполнения Распоряжением Правительства Российской Федерации от 24 июня 2017 г. № 1325-р был принят План мероприятий по реализации Стратегии на 2017–2019 гг. Распоряжением Правительства Российской Федерации от 26 сентября 2017 г. № 2048-р в План внесены изменения и дополнения. Указом Президента Российской Федерации от 15 марта 2021 г. № 143 “О мерах по повышению эффективности государственной научно-технической политики” в целях научно-технологического развития Российской Федерации, определения его приоритетов и обеспечения взаимодействия органов государственной власти Российской Федерации при формировании и реализации государственной научно-технической политики на Совет по науке и образованию при Президенте Российской Федерации были возложены функции по определению стратегических целей, задач и приоритетов научно-технологического развития Российской Федерации, а также по принятию решений о разработке и реализации Правительством Российской Федерации важнейших инновационных проектов

государственного значения. В качестве постоянно действующего органа при Правительстве Российской Федерации была создана Комиссия по научно-технологическому развитию Российской Федерации.

Распоряжением Правительства Российской Федерации от 20 мая 2023 г. № 1315-р утверждена Концепция технологического развития на период до 2030 года (далее – Концепция). Концепция определяет технологический суверенитет как наличие в стране (под национальным контролем) высоко развитой системы фундаментальной науки и фундаментального образования, критических и сквозных технологий, обеспечивающих возможность устойчивого развития государства и общества в достижении национальных целей.

Реализация Стратегии и Концепции направлена на развитие высокотехнологичных отраслей экономики Российской Федерации. Технологический суверенитет обеспечивается исследованиями, разработками и внедрением критических и сквозных технологий.

Следует выделить следующие ключевые вызовы для технологического развития Российской Федерации в период с 2023 по 2030 г.:

- резкое ускорение процесса создания и распространения качественно новых технологий, в том числе цифровых, радикально меняющих рынки и производственные системы;
- усложнение технологий, особенно в области искусственного интеллекта, микроэлектроники, квантовых вычислений, создания новых материалов, системотехники, инженерной биологии, требующее развития соответствующих компетенций и глубокой кооперации исследований;
- крайне неблагоприятная внешняя обстановка, беспрецедентное санкционное давление недружественных государств на экономику страны.

Российская Федерация находится в первой десятке стран по патентной и публикационной активности в области технологий генерации и передачи энергии, квантовых технологий и в середине второго десятка стран в области новых материалов, цифровых систем, искусственного интеллекта, но-

вых производственных технологий, перспективных мобильных сетей связи, интернета вещей, а также медико-биологических и фармацевтических технологий. В то же время наблюдается резкое отставание от наиболее развитых стран в темпах инновационноориентированного экономического роста, что обусловлено низкой мотивацией разработчиков научно-технологических решений к созданию соответствующих производств, недостатком финансовых ресурсов и относительно небольшой ёмкостью внутреннего рынка высокотехнологичной продукции, низкой заинтересованностью компаний в исследованиях и технологических инновациях ввиду отсутствия конкуренции и существовавшей до недавнего времени возможности покупки готовых технологических решений за рубежом.

Реформы научно-технологического комплекса России, проведённые в 1992–2013 гг., исходили из необходимости интеграции в мировое, а фактически в американско-европейское технологическое пространство на основе уже установленных другими правил, при общей ориентации экономики страны только на ресурсное развитие. При этом в основу реформ были положены следующие подходы: перестройка системы организации науки по зарубежным стандартам, использование зарубежных показателей для оценки эффективности и результативности науки, дезинтеграция прежней системы управления, институциональное копирование Запада (болонская система образования, трансформации Академии наук и тому подобное).

Ещё одной проблемой и тормозящим фактором скорейшей реализации технологического развития является существенный уровень зависимости по широкому спектру материалов, оборудования и технологий от импортных поставщиков. В целях её преодоления в Российской Федерации необходимо предпринять комплекс организационных и экономических мер как минимум по импортозамещению необходимых материалов и технологий, а затем по достижению технологического суверенитета, сокращению отставания от развитых стран, достижению лидерства в принципиальных областях.

Российская Федерация обладает значительным кадровым потенциалом и существенными научно-техническими заделами по важнейшим направлениям развития технологий, что определяет следующие ключевые возможности для ускорения технологического развития Российской Федерации:

- локализация производств в высокотехнологичных отраслях в условиях сокращения импорта и ухода из страны иностранных компаний-конкурентов;
- использование и внедрение в отраслях экономики научных результатов благодаря имеющимся научно-технологическим заделам по ряду критических и сквозных технологий, по созданию опытных образцов;

- применение накопленного опыта научных и образовательных школ для подготовки кадров непосредственно на научных, технологических и производственных площадках.

Новыми субъектами технологического развития страны должны стать научно-технологические объединения (консорциумы, технологические холдинги, технопарки и другие), включающие конструкторскую и образовательную, исследовательскую, производственную базы, опытные производства. Подобные структуры могут формироваться как вокруг научных и образовательных организаций, так и вокруг технологических и производственных компаний. Такие объединения должны быть способны реализовать крупномасштабные технологические проекты вплоть до разработки готовых к коммерциализации опытных образцов.

Для эффективного функционирования субъектов технологического развития нужна качественно новая институциональная среда:

- институты поддержки собственных линий разработки технологий, включая центры коллективного пользования, тестирования и испытаний;
- институт квалифицированного заказчика, включая генеральных конструкторов и конструкторские бюро, формирующий техническое задание на исследование и разработки для дальнейшего внедрения их результатов в технологические и производственные процессы;
- цифровые платформы и информационные сервисы для обеспечения сетевого взаимодействия субъектов технологического развития;
- устранение регуляторных барьеров, прежде всего в части оборота результатов интеллектуальной деятельности и защиты прав инвесторов;
- программы внедрения наилучших доступных технологий с использованием собственных линий разработки технологий для высокотехнологичной продукции;
- соглашения Правительства Российской Федерации и компаний-лидеров по разработке линейек высокотехнологичной продукции на основе критических и сквозных технологий;
- установление и обеспечение прозрачных и стабильных регуляторных правил поведения и взаимодействия субъектов технологического развития, мотивирующих их к технологическим инновациям;
- государственный заказ на фундаментальные и прикладные исследования и разработки, создание приоритетных технологических решений.

В научных организациях под научно-методическим руководством РАН уже сейчас имеются существенные научные заделы по основным направлениям Стратегии и Концепции. Российской академией наук сформирована система научных советов по приоритетным направлениям дорожных карт высокотехнологичных направлений развития

страны. Их функция — экспертное и аналитическое обеспечение и мониторинг научных исследований в интересах технологического развития. Российская академия наук активно включилась в работу по реализации дорожных карт развития высокотехнологичных направлений, определённых соглашениями, заключёнными Правительством Российской Федерации с компаниями-лидерами и крупными государственными корпорациями в целях формирования перспективных технологических направлений и развития сквозных технологий. Научным советам РАН приданы экспертные функции по проведению научно-технической экспертизы результатов реализации Соглашений по отдельным высокотехнологичным направлениям.

Для результатов фундаментальных исследований, имеющих практическую и технологическую направленность, следует использовать установленные определения уровней готовности разрабатываемых или разработанных технологий, а также научных и (или) научно-технических результатов, соответствующих каждому уровню готовности технологий.

Для обеспечения научного суверенитета и устойчивого развития страны в долгосрочной перспективе необходима стабильная финансовая поддержка фундаментальных исследований, сохранение и развитие научной инфраструктуры на уровне технологически развитых стран мира. Фундаментальные и поисковые исследования с дальним прицелом должны финансироваться в рамках государственного задания, а также на конкурсной основе через гранты Минобрнауки России и научных фондов по рекомендации отделений РАН по областям и направлениям науки и региональных отделений РАН. В современных геополитических условиях особое внимание необходимо уделять решению неотложных прикладных научных задач, от которых зависит суверенитет и обороноспособность Российской Федерации.

Общее собрание членов РАН отмечает, что научные организации (далее — институты), находящиеся под научно-методическим руководством РАН, играют весьма существенную роль в достижении научно-технологической независимости России и укреплении её обороноспособности, и обращает внимание на неэффективное функционирование существующей системы финансирования институтов, которая ведёт к стагнации фундаментальных и проблемно-ориентированных исследований в стране. Необходимо концентрировать бюджетное финансирование исследований в рамках государственного задания, которое не покрывает полностью расходов на содержание инфраструктуры и государственного имущества институтов, в том числе уникальных научных установок, полигонов, приобретения расходных материалов, ремонтных работ. Сложившаяся система содержания инфраструктуры и государственного имущества, находящегося в управлении институтов, не соответствует

важности и масштабу задач, стоящих перед ними, не позволяет гибко перестраивать финансирование по приоритетным направлениям технологического развития, которые должны определяться по предложениям Российской академии наук.

На научной сессии общего собрания членов РАН «Российская академия наук в решении проблем научно-технологического развития Российской Федерации» 12–13 декабря 2023 г. были заслушаны прогнозно аналитические доклады по основным направлениям научно-технологического развития Российской Федерации. Целесообразно продолжить данный опыт обсуждения высокотехнологичных проблем на общих собраниях членов РАН.

На основании материалов, представленных докладчиками, и учитывая предложения, высказанные в ходе обсуждения на научной сессии, общее собрание членов РАН ПОСТАНОВЛЯЕТ:

1. Считать целесообразным законодательно определить, что наука является системообразующим институтом развития страны, и обеспечить финансирование отечественной науки в размере не менее 2% валового внутреннего продукта (ВВП) Российской Федерации. Поручить президенту Российской академии наук выступить с указанной законодательной инициативой.

2. Руководству Российской академии наук обеспечить проведение компетентной экспертизы проектов новой версии Федерального закона «О науке и государственной научно-технической политике» и готовящегося Федерального закона «О технологической политике в Российской Федерации». Считать необходимым обеспечить в исходной и принципиальной для всех последующих документов формулировке определение понятия технологического суверенитета, понимание ключевой роли фундаментальных и ориентированных исследований в отечественных научных и научно-образовательных организациях, подготовки отечественных высококвалифицированных научных и инженерных кадров, а также использования отечественного стратегического сырья. Рекомендовать принять данное определение в следующей формулировке: «Технологический суверенитет — это состояние промышленного комплекса и социальной сферы Российской Федерации, при котором обеспечена его способность самостоятельно выпускать высокотехнологичную продукцию, необходимую для решения стратегических задач обороны и политической и экономической безопасности страны, с опорой на отечественные научно-технологические разработки и отечественный научный и научно-технологический персонал, а также на отечественные ресурсы необходимого для выпуска такой продукции стратегического сырья».

3. Совместно с заинтересованными федеральными органами исполнительной власти и государственными корпорациями создать рабочие группы по разработке дорожных карт по трансферу техно-

логий и результатов научно-исследовательских работ и опытно-конструкторских разработок, полученных по результатам реализации государственной программы Российской Федерации “Научно-технологическое развитие Российской Федерации” (ГП НТР).

4. Президиуму РАН сформировать при Российской академии наук банк данных по технологическим разработкам с учётом уровней готовности технологий. Отделениям РАН по областям и направлениям науки и региональным отделениям РАН до 1 марта 2024 г. представить в президиум РАН требования к уровням готовности технологий с учётом приказа Минобрнауки России от 6 февраля 2023 г. № 107 “Об утверждении Порядка определения уровней готовности разрабатываемых или разработанных технологий, а также научных и (или) научно-технических результатов, соответствующих каждому уровню готовности технологий”.

5. Президиуму РАН подготовить и внести в Комиссию по научно технологическому развитию Российской Федерации, созданную при Правительстве Российской Федерации, предложения по актуализации Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации с учётом изменения геополитической и социально-экономической ситуации, определив основной целью создание современной научно-технологической базы, обеспечивающей переход к экономике полного инновационного цикла, реализацию национальных приоритетов и достижение технологического суверенитета и национальных целей, определённых Президентом Российской Федерации.

6. Президиуму РАН разработать и внести в Совет по науке и высшему образованию при Президенте Российской Федерации предложения по системе оценки результатов научных исследований, основанной в первую очередь на экспертизе результатов со стороны Российской академии наук, а также с учётом научных публикаций, включая в том числе научные статьи в высокорейтинговых отечественных и международных журналах, получения патентов и создания ноу-хау по основным направлениям технологического развития. Важным фактором эффективности исследований считать международное научное сотрудничество, совместные исследования и мероприятия с зарубежными научными организациями и университетами, сделав акцент прежде всего на страны Союзного государства России и Беларуси, Евразийского экономического союза, БРИКС, Шанхайской организации сотрудничества и другие дружественные и нейтральные государства.

7. В целях создания для промышленных предприятий и коммерческих организаций возможности финансировать из собственных средств научные, конструкторские и технологические работы научных организаций президиуму РАН подготовить и направить в Правительство Российской Федера-

ции предложения о внесении в Налоговый кодекс Российской Федерации дополнения, позволяющего относить затраты на научно-исследовательские и опытно-конструкторские разработки на себестоимость продукции.

8. Рекомендовать Российскому научному фонду и Фонду перспективных исследований расширить тематику научных исследований, финансируемых фондами, и создать тематические разделы конкурсов технологической независимости по основным направлениям, рассмотренным на общем собрании членов РАН.

9. Президиуму РАН представить в Правительство Российской Федерации предложения по внесению изменений в систему государственного финансирования научных организаций (институтов), находящихся под научно-методическим руководством РАН:

- установить институтам целевое финансирование на расходы по содержанию инфраструктуры, оборудования и иного имущества;

- в целях повышения эффективности планирования государственного задания научных организаций и контроля его выполнения сводные планы по всем темам государственного задания институтов с объёмами требуемого финансирования необходимо предварительно рассматривать в РАН, с учётом востребованности результатов, а затем направлять в Минобрнауки России. Предусмотреть институтам возможность при необходимости оперативно вносить изменения в темы государственного задания и в распределение объёмов финансирования.

10. В целях повышения эффективности научных исследований и разработок президиуму РАН совместно с Минобрнауки России подготовить и представить в Совет по науке и высшему образованию при Президенте Российской Федерации предложения по разработке программ развития научных институтов.

11. Всесторонне расширять деятельность научных организаций и членов РАН по популяризации науки, проводя работу со средствами массовой информации и образовательными организациями, в том числе общего, среднего и высшего образования.

12. Президиуму РАН подготовить и издать материалы настоящей научной сессии общего собрания членов РАН и собраний отделений РАН по областям и направлениям науки и региональных отделений РАН по рассматриваемой тематике в виде отдельной книги и направить материалы по решениям и рекомендациям настоящей научной сессии общего собрания членов РАН в Совет по науке и высшему образованию при Президенте Российской Федерации.

*Президент РАН академик РАН Г.Я. Красников
Главный учёный секретарь президиума РАН
академик РАН М.В. Дубина*