



ДОМ БЕЗ АЛЛЕРГИИ:
МИФЫ
И РЕАЛЬНОСТЬ

24

ПРЕОДОЛЕНИЕ
СТЕРЕОТИПОВ КАК
ФАКТОР РАЗВИТИЯ НИР

52

ПОДХОДЫ
К БЕЗОПАСНОСТИ
СОВРЕМЕННЫХ АЭС

63

ПОНЯТЬ
ХИМИКА МОЖЕТ
ТОЛЬКО ХИМИК

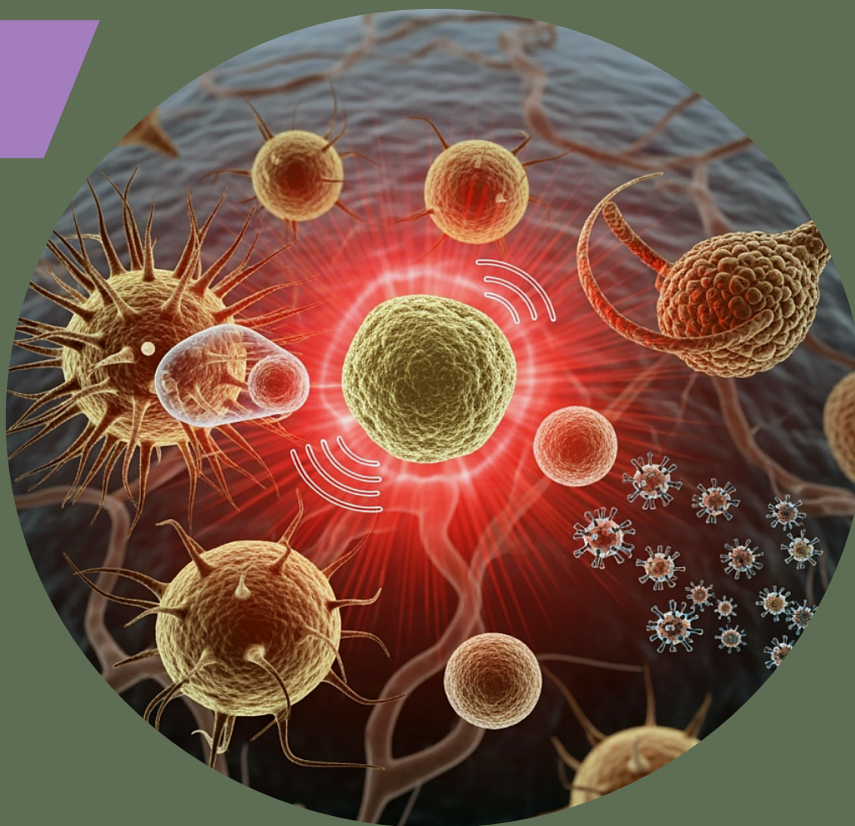
70

Наука и инновации

№9 (283)

СЕНТЯБРЬ 2026

научно-
практический
журнал



Современные
аспекты
аллергологии

ISSN 1818-9857



9 171818 985001 09
ISSN 2412-9372 (online)



Мы создаем молекулярное искусство

- ПЦР наборы для применения в медицине, ветеринарии, криминалистике
- ПЦР наборы для анализа пищевых продуктов
- Регенты для молекулярной биологии



www.qpcr.by

ИЗДЕЛИЯ МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ.

На правах рекламы. Производитель ООО «АртБиоТех». 222210 Республика Беларусь, Минская обл., Смолевичский район, Китайско-Белорусский индустриальный парк «Великий камень», пр. Пекинский, 18. УНП 192743351. Сайт: www.qpcr.by

Мы создаем молекулярное искусство

- Taq ДНК-полимеразы
- Pfu ДНК-полимеразы
- Готовые смеси для ПЦР
- Ревертазы
- Готовые смеси для ОТ-ПЦР
- Комплекты для ПЦР
- Прочие реагенты



- ✓ Компания полного цикла
- ✓ Собственное производство
- ✓ Стандарты качества ISO 13485:2016 и ISO 9001:2015
- ✓ Квалифицированная техническая поддержка
- ✓ Индивидуальный подход к каждому клиенту
- ✓ Оперативность поставок



www.qpcr.by

ИЗДЕЛИЯ МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ.

На правах рекламы. Производитель ООО «АртБиоТех». 222210 Республика Беларусь, Минская обл., Смолевичский район, Китайско-Белорусский индустриальный парк «Великий камень», пр. Пекинский, 18. УНП 192743351. Сайт: www.qpcr.by



Зарегистрирован в Министерстве информации Республики Беларусь, свидетельство о регистрации №388 от 18.05.2009 г.

Учредитель:

Национальная академия наук Беларуси

Редакционный совет:

В.С. Караник <i>председатель совета</i>	С.В. Гапоненко	М.В. Мясникович
С.А. Чижик <i>сопредседатель совета</i>	В.Л. Гурский	В.Я. Панченко
С.С. Щербаков <i>сопредседатель совета</i>	В.Г. Гусаков	В.Н. Пармон
Ж.В. Комарова	АЕ. Дайнеко	О.Г. Пенязков
В.В. Азаренко	Дун Суочэн (Dong Suocheng)	Ф.И. Привалов
О.Ю. Баранов	В.Г. Залесский	С.П. Рубникович
В.Г. Богдан	А.И. Иванец	О.О. Руммо
	А.В. Кильчевский	Сюцин Лю (Xuqing Lui)
	А.А. Коваленя	А.В. Труханов
	Э.И. Коломиец	С.В. Харитончик
	С.А. Красный	А.Г. Шумилин

Главный редактор:

Жанна Комарова

Ведущие рубрик:

Ирина Емельянович
Наталья Минакова

Татьяна Жданович
Юлия Василишина

Дизайн и верстка:

Татьяна Аверкова

Адрес редакции:

220072, г. Минск, ул. Академическая, 1-129.
Тел.: (017) 351-14-46,
e-mail: nii2003@mail.ru,
www.innosfera.belnauka.by

Подписные индексы:

007 532 (ведомственная) 00753 (индивидуальная)

Формат 60x84 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 9,8.
Тираж 471 экз. Цена договорная.
Подписано в печать 08.09.2026.

Издатель: РУП «Издательский дом «Беларуская навука».
Свид. о гос. рег. №1/18 от 02.08.2013.
г. Минск, ул. Ф. Скорины, 40. Заказ №178

© «Наука и инновации»

При перепечатке и цитировании ссылка на журнал обязательна. За содержание рекламных объявлений редакция ответственности не несет. Мнение редакции не всегда совпадает с мнением авторов статей. Рукописи не рецензируются и не возвращаются.

Содержание

СОВРЕМЕННЫЕ АСПЕКТЫ АЛЛЕРГОЛОГИИ

Андрей Гончаров, Наталья Антонец, Екатерина Шамова,
Ирина Романова, Антонина Осипова

Диагностика и клеточная терапия аллергозаболеваний 4

В статье представлены инновационные разработки в области диагностики и клеточной иммунотерапии аллергических заболеваний.

Татьяна Барановская

Профессиональная аллергическая астма 12

Описаны подходы к диагностике, профилактике и лечению профессиональной бронхиальной астмы.

Наталья Аляхнович, Оксана Ищенко

Провокационное аллeрготестирование гиперчувствительности к металлам 16

Описаны методы провокационного аллeрготестирования, позволяющие выявить сенсибилизацию к металлам у пациентов с симптомами непереносимости металлоконструкций.

Ирина Щурок, Оксана Ищенко

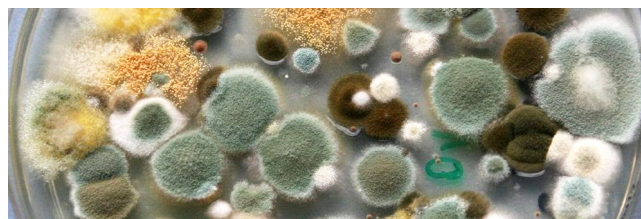
Диагностика аллергии на компоненты вакцин 21

Обосновано применение аппликационного и прик-теста со вспомогательными компонентами вакцин – необходимых и доступных диагностических методов, повышающих приверженность населения к проведению вакцинации.

Дмитрий Тапальский, Елена Карпова

Дом без аллергии: мифы, факты и работающие меры 24

Представлена современная концепция понятия «дом без аллергии», где окружающее пространство – это среда, где разумно управляют факторами риска.



ИННОВАЦИОННАЯ ЭКОНОМИКА

Ольга Жуковская

Промышленные инновационные экосистемы: концепция, модели формирования и потенциал развития 29

Рассматривается концепция промышленных инновационных экосистем как наиболее сложная и перспективная форма организации инновационной и производственной деятельности в условиях Индустрии 5.0 и 6.0.

ЦИФРОВАЯ ПЕРСПЕКТИВА

Александр Косенко

Основные тенденции современного развития виртуальных миров 36

Рассмотрены сущность и определения виртуальных миров, отражены основные тенденции их развития в мире.

ЭКОНОМИКА КАЧЕСТВА

Ирина Салтанова

Система KPI для мониторинга результативности научно-исследовательской деятельности 42

Представлена трехуровневая модель аудита научно-исследовательской деятельности, основанная на пяти ключевых KPI, позволяющая оптимизировать перераспределение бюджетного финансирования в пользу конкурентоспособных коллективов и приоритетных направлений.

Андрей Сартори, Анастасия Соловьева

Как преодолеть ловушки стереотипов, или Методы повышения результативности НИР 52

Рассмотрены барьеры во взаимодействии науки и бизнеса при выполнении поисковых НИР по технологическим запросам. Для их преодоления предложен подход к управлению на основе дополненных уровней готовности технологий с числовым индикатором вероятности внедрения.

ЧЕРНОБЫЛЬ: 40 ЛЕТ ОСМЫСЛЕНИЯ

Алексей Лукашевич

Безопасность современных АЭС: совершенствование технологий в ядерной сфере 63

В статье рассмотрены условия устойчивого развития атомной энергетики в Беларуси и мире в XXI в. Проанализированы эволюция ядерных реакторов, нормативно-правовая база и международное сотрудничество в сфере безопасности.

ОТКРЫВАЯ СЕБЯ

Татьяна Ковальчук-Рабчинская

Понять химика может только химик: о науке, любви и поиске баланса 70

Декан химического факультета БГУ Татьяна Ковальчук-Рабчинская в своем эссе отмечает, что профессионализм и успех в любой сфере требуют безупречной точности в мелочах и полной самоотдачи.

СПАДЧЫНА

Аляксандр Бурачонак

Прадпрымальніцкая дынастыя Пуслоўскіх на тэрыторыі Беларусі ў канцы XVIII – пачатку XX ст. 74

Даследаванне прысвечана гісторыі прадпрымальніцтва і мецэнацтва дынастыі Пуслоўскіх на землях Беларусі. Разглядаюцца лёсы іх прадпрыемстваў, а таксама ўнёсак роду ў эканоміку, тэхналогіі і культуру рэгіёна.

ДИССЕРТАЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Юлия Лебедева, Екатерина Вашкевич, Михаил Белевцев

Технология CAR-NK: новые шаги в лечении онкологических заболеваний 79

На примере технологии CAR-NK рассмотрены актуальные достижения современной иммунотерапии и выделены ключевые преимущества применения медицинской генной инженерии в онкологии.

Andrey Goncharov, Natalia Antonevich, Ekaterina Shamova, Irina Romanova, Antonina Osipova

Diagnostics and cellular therapy of allergic diseases 4

The article presents innovative developments in the field of diagnostics and cellular immunotherapy for allergic diseases.

Tatyana Baranovskaya

Occupational allergic asthma 12

Approaches to the diagnosis, prevention, and treatment of occupational bronchial asthma are described.

Natalia Alyakhnovich, Oksana Ishchenko

Provocative allergy testing for metal hypersensitivity 16

The article describes provocative allergy testing methods that can help detect metal sensitization in patients with symptoms of metal intolerance.

Irina Shchurok, Oksana Ishchenko

Diagnosing allergies to vaccine components 21

The authors justify the use of patch and prick tests with vaccine adjuvants which are essential and accessible diagnostic methods that increase public adherence to vaccination.

Dmitry Tapalsky, Elena Karpova

Allergy-free home: myths, facts, and effective measures 24

The article presents a modern concept of the "allergy-free home," where the surrounding space is defined as an environment with risk factors wisely managed.

Olga Zhukovskaya

Industrial innovation ecosystems: concept, models and development potential 29

The author analyses a concept of industrial innovation ecosystems as the most complex and promising form of innovation and production activities in Industry 5.0 and 6.0 conditions.

Alexander Kosenko

Major trends in the modern development of virtual worlds 36

The article examines the nature and definition of virtual worlds, and highlights the main trends in their development globally.

Irina Saltanova

KPI system for monitoring research performance 42

The article presents a three-tiered research audit model based on five key KPIs, enabling the optimization of budget allocations to competitive teams and priority areas.

Andrei Sartori, Anastasia Solovyova

How to overcome stereotype traps, or Methods for improving R&D performance 52

The article considers the barriers to collaboration between science and business in conducting exploratory research on technological inquiries. To overcome these barriers, a management approach based on augmented technology readiness levels with a numerical indicator of the probability of implementation has been proposed.

Alexey Lukashevich

Safety of modern nuclear power plants: improving nuclear technology 63

The article considers sustainable development of nuclear energy conditions in Belarus and in the world in the 21st century. It addresses such issues as legislation on the use of nuclear energy, the latest technical solutions and evolution of nuclear reactors, priorities in the development of fourth-generation reactors, and other aspects of international cooperation for safety.

Tatyana Kovalchuk-Rabchinskaya

Only a chemist can understand a chemist: on science, love, and the search for balance 70

In her essay, Tatyana Kovalchuk-Rabchinskaya, Dean of the Faculty of Chemistry at BSU, notes that professionalism and success in any field require impeccable precision in small details and full dedication.

Aliaksandr Burachonak

The Puslovsky entrepreneurial dynasty on the territory of Belarus in the late 18th – early 20th centuries 74

The author studies the business activity history of the famous Puslovsky business and patrons of the arts dynasty on the lands of Belarus, as well as the life paths of its representatives, the fates of the enterprises they created, their role in the history of the region's industry, and contribution to the development of technology, economy and culture.

Yuliya Lebedeva, Ekaterina Vashkevich, Mikhail Belevtsev

CAR-NK technology: new steps in cancer treatment 79

The example of CAR-NK technology examines current advances in modern immunotherapy and highlights key benefits of medical genetic engineering in oncology.



Сегодня аллергология переживает критический перелом: к середине XXI в. с гиперчувствительностью столкнется каждый второй житель планеты. Урбанизация, изменение климата и химизация среды стремительно расширяют спектр антигенов – от аэроаллергенов до техногенных ксенобиотиков. В Республике Беларусь этот вызов усугубляется увеличением сезона пыления, появлением новых инвазивных видов и ростом профессиональной аллергии. Белорусская наука отвечает на это переходом к прецизионной медицине, развитию аллергодиагностики и управлению иммунным ответом.

Диагностика и клеточная терапия аллергозаболеваний

Андрей Гончаров,

ведущий научный сотрудник лаборатории иммунологии и вирусологии Института биофизики и клеточной инженерии НАН Беларуси, кандидат медицинских наук, доцент

Наталья Антонец,

ведущий научный сотрудник лаборатории иммунологии и вирусологии Института биофизики и клеточной инженерии НАН Беларуси, кандидат биологических наук, доцент

Екатерина Шамова,

заведующий лабораторией медицинской биофизики Института биофизики и клеточной инженерии НАН Беларуси, кандидат биологических наук, доцент

Ирина Романова,

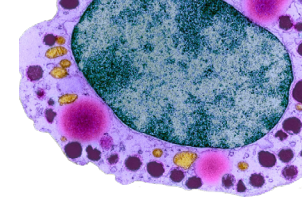
ведущий научный сотрудник лаборатории иммунологии и вирусологии Института биофизики и клеточной инженерии НАН Беларуси, кандидат медицинских наук

Антонина Осипова,

ведущий научный сотрудник лаборатории медицинской биофизики Института биофизики и клеточной инженерии НАН Беларуси, кандидат медицинских наук

Согласно официальным данным Всемирной организации по аллергии (WAO), масштаб распространения аллергических заболеваний достиг уровня глобальной пандемии в XXI в. Различные клинические формы диагностированы у 30–40% населения планеты, что соответствует 4-му месту в мире в структуре неинфекционных болезней. Ежегодный прирост составляет около 35–40 млн случаев. Согласно прогностическим моделям ВОЗ, к 2030 г. с признаками аллергии может столкнуться уже до 50% населения Земли.

С учетом высокой актуальности проблемы с 2021 г. в Институте биофизики и клеточной инженерии НАН Беларуси функционирует Центр иммунологии и аллергологии (создан в соответствии с постановлением Бюро Президиума НАН Беларуси от 26.10.2021 г. №492), цель которого – комплексное изучение формирования и механизмов функционирования иммунитета живых организмов на молекулярно-клеточном уровне в норме и при патологии, разработка инновационных способов диагностики и лечения болезней,



ассоциированных с нарушением функционирования иммунитета, в интересах медицины и сельского хозяйства.

Спектр научно-практических исследований центра включает: создание новых методов аллергодиагностики; биомедицинских клеточных продуктов (БМКП), обладающих иммуносупрессивными, иммуностимулирующими и цитотоксическими (в отношении опухолевых клеток) свойствами; методов клеточной терапии аутоиммунных, аллергических и онкологических заболеваний; генетической модификации иммунных клеток для применения в медицине.

В области диагностики аллергических реакций немедленного типа в институте активно развивается два направления. Первое нацелено на создание тест-систем на основе микрочипов с иммобилизованными аллергенами различных групп. Второе связано с клеточными *in vitro*-тестами для определения реактивности базофилов и тучных клеток на воздействие аллергенов с последующим определением маркеров активации и дегрануляции.

Технология микрочипов сформировалась на стыке молекулярной биологии, химии поверхности и оптических методов детекции в начале 1990-х гг. и выступает одним из ключевых инструментов современной молекулярной биологии и биомедицины. ДНК- и белковые микрочипы позволяют осуществлять одновременный анализ экспрессии множества генов либо широкого спектра белков. Особое место среди микрочиповых платформ занимают аллергочипы, предназначенные для одновременного выявления иммуноглобулинов класса E (IgE), специфичных к индивидуальным

молекулярным аллергенам и их компонентам [1].

Наиболее известные коммерческие микрочипы – ImmunoCAP ISAC, AllergXplorer (ALEX) – включают широкую панель очищенных и рекомбинантных аллергенных компонентов [2, 3]. Использование подобных систем позволяет дифференцировать истинную сенсibilизацию от перекрестной реактивности, первичные сенсibilизирующие аллергены, прогнозировать риск развития тяжелых системных реакций, оптимизировать подбор аллерген-специфической иммунотерапии (АСИТ), формировать индивидуальные аллергологические профили пациента в рамках концепции персонализированной медицины [4].

В настоящее время показана высокая диагностическая информативность аллергочипов при полисенсibilизации, атипичных формах аллергии, а также при расхождении клинической картины с результатами кожных проб и стандартных иммунологических тестов [1, 5]. Дополнительное преимущество технологии – необходимость забора минимального объема сыворотки крови, необходимой для проведения анализа, что особенно важно при обследовании детей и пациентов с ограниченным объемом биоматериала. В Республике Беларусь также ведутся работы в области создания отечественных аллергологических тест-систем, в том числе и на основе технологии микрочипов.



Рис. 1. Диагностическая тест-система АЛЛЕРГОЧИП.БЕЛ (А) и процесс ее изготовления (Б)

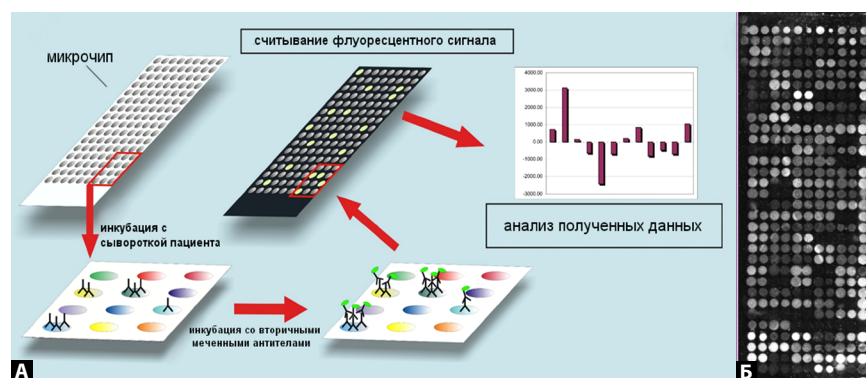


Рис. 2. Принцип работы аллергочипа (А) и флуоресцентное изображение АЛЛЕРГОЧИП.БЕЛ после инкубации с сывороткой крови пациента (Б)

В институте под руководством А.Е. Гончарова, А.В. Осиповой и Е.В. Шамовой в 2024 г. разработан аллергочип для выявления IgE-зависимых аллергических реакций (рис. 1).

Принцип работы тест-системы АЛЛЕРГОЧИП.БЕЛ основан на определении в сыворотке крови пациента аллерген-специфических IgE (рис. 2).

На поверхность кремниевой подложки (чипа), содержащей иммобилизованные аллергены, наносят образец сыворотки крови. При наличии специфических IgE происходит их связывание с соответствующими аллергенами. После удаления несвязавшихся компонентов проводят инкубацию с флуоресцентно мечеными антителами к IgE. Образовавшиеся иммунные комплексы регистрируют по интенсивности флуоресцентного сигнала, что позволяет определить наличие сенсибилизации пациента одновременно к 200 аллергенам, в том числе и к конкретным.

Панель АЛЛЕРГОЧИП.БЕЛ включает как экстракты аллергенов, позволяющие выявить чувствительность к их природным источникам, так и отдельные молекулярные аллергены, которые помогают определить, к каким именно белкам развивается иммунный ответ, а также оценить риск перекрестных аллергических реакций. Именно такое сочетание делает панель универсальной: она позволяет одновременно проводить первичную диагностику сенсибилизации и компонентную (молекулярную) аллергодиагностику, что особенно важно для выбора тактики лечения, включая аллерген-специфическую иммунотерапию (АСИТ). В панели подобраны аллергены, наиболее актуальные для Республики Беларусь: пыльца березы,

ольхи, орешника, луговых и сорных трав, клещи домашней пыли, плесневые грибы, а также наиболее распространенные пищевые аллергены. Перечень может быть изменен согласно запросам врачей-аллергологов, клинических иммунологов и педиатров.

Это способствует повышению точности диагностических результатов и дает информацию о первичных аллергенах и маркерах перекрестной реактивности, что важно для дальнейшего индивидуального лечения. Данный метод не имеет противопоказаний.

Создание тест-системы АЛЛЕРГОЧИП.БЕЛ – важный шаг в развитии отечественной аллергодиагностики. Разработка объединяет современные микрочиповые технологии и панель аллергенов, адаптированную к особенностям Республики Беларусь, что позволяет повысить точность диагностики и сделать ее более доступной для пациентов.

Панель находится в стадии получения регистрационного удостоверения на изделие медицинского назначения, после чего сможет применяться в учреждениях здравоохранения страны, способствуя более раннему выявлению аллергических заболеваний, выбору оптимальной тактики лечения и развитию персонализированного подхода.

Лабораторные *in vitro*-методы диагностики аллергии, направленные на установление ее причины, включают прежде всего обнаружение специфического IgE. Однако если для выявления пыльцевого сенсибилизатора имеется широкий спектр высокочувствительных диагностических наборов, включая разработанный нами аллергочип, то для лекарственной аллергии (ЛА) определение специфического IgE сильно затруднено. Это связано

главным образом с его низким содержанием к ЛС в сыворотке крови пациента. Все это приводит к неудовлетворительной чувствительности метода, не превышающей 20–25%. В этой связи диагностика аллергии к лекарствам базируется преимущественно на анамнезе заболевания, то есть ограничивается лишь тем, насколько подробно пациент может описать возможные причины патологической реакции.

В развитых странах мира активно внедряются клеточные *in vitro*-тесты для диагностики аллергии, в частности тест активации базофилов (ВАТ). Принцип ВАТ основан на определении при помощи проточного цитометра маркеров активации и/или дегрануляции базофилов в ответ на воздействие причинного аллергена. В отличие от определения специфического IgE в сыворотке крови, ВАТ отражает функциональный ответ системы иммунитета. Диагностика привлекает своей относительной простотой, дешевизной, безопасностью для пациента, возможностью стандартизации [6].

Методы постановки ВАТ разработаны авторами публикации и давно применяются на практике в институте в рамках двух инструкций, утвержденных Министерством здравоохранения Республики Беларусь [7, 8]. К недостаткам относят небольшие сроки хранения цельной крови для анализа (4–6 часов), а следовательно, необходимость постановки теста в день взятия крови, невозможность применения в случае снижения содержания базофилов в периферической крови (например, в течение 2–3 недель после острой аллергической реакции).

Имеется возможность частично устранить ограничения ВАТ, используя для диагностики

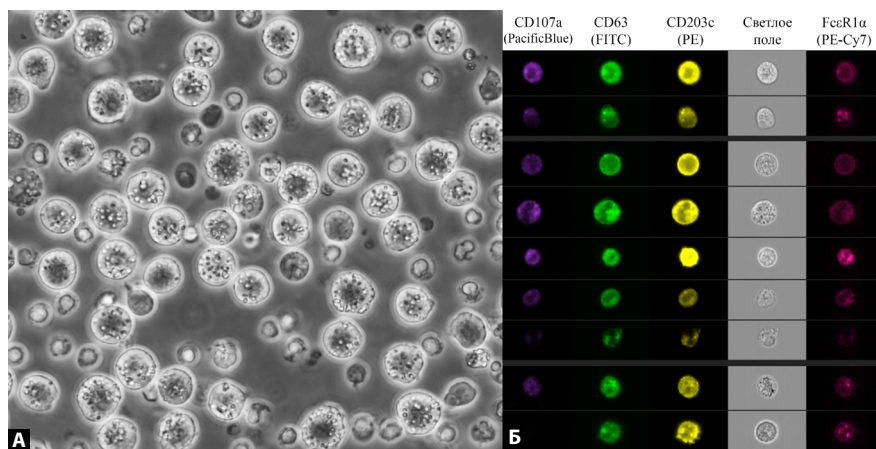
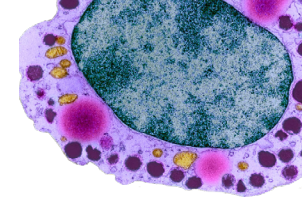


Рис. 3. Визуализация культивируемых клеток: А – микрофотография ТК на 22-е сутки, 40х; В – оценка экспрессии маркеров тучных клеток CD107a, CD63 и CD203c с помощью визуализирующего проточного цитометра

вместо собственных базофилов донорские тучные клетки (ТК), так называемый тест их активации (МАТ) [9].

Метод получения ТК достаточно сложен и включает выделение CD34⁺ гемопоэтических стволовых клеток и клеток-предшественников из периферической крови или костного мозга с последующим их культивированием для накопления биомассы и дифференцировки в тучные клетки. ТК, как и сыворотки пациентов, можно хранить в низкотемпературных условиях, что дает возможность постановки МАТ с большим количеством образцов одновременно, в удобное время. При этом снимаются вопросы,

связанные с содержанием базофилов в крови пациента, значительно упрощается преаналитический этап исследования.

Институтом биофизики и клеточной инженерии НАН Беларуси разработана методика получения ТК путем дифференцировки гемопоэтических стволовых клеток (ГСК) пуповинной крови, выделенных иммуноманитной сепарацией. CD34⁺-клетки растят в бессывороточной питательной среде StemPro-34 SFM с добавлением цитокинов Stem Cell Factor (SCF), ИЛ-3, ИЛ-6 в течение не менее 6 недель со сменой половины объема этих составляющих каждые 3–4 дня. Оценка иммунотипа клеток как с помощью

проточного цитометра, так и визуализирующего проточного цитометра Amnis ImageStreamX mkII показала, что в соответствии с высокой экспрессией молекул CD117, CD203c, FcεR1 данные культуры относятся к линии ТК и могут быть использованы для оценки IgE-опосредованной активации в ответ на специфический стимул (рис. 3).

Алгоритм постановки МАТ включает такие этапы, как предварительная сенсбилизация зрелых тучных клеток сывороткой пациентов, индукция иммунного ответа ТК аллергеном с последующей оценкой маркера дегрануляции. Положительным контролем МАТ служило неконъюгированное с флуорохромом моноклональное антитело к IgE (клон 4Н10). Идентификацию ТК проводили по двойной экспрессии молекул CD117 и CD203c с добавлением зонда для оценки жизнеспособности 7-AAD. Далее определяли экспрессию маркера дегрануляции CD63, который отражает IgE-опосредованный иммунный ответ ТК на аллерген. С целью объективизации результатов был задействован индекс активации по молекуле CD63 (ИА63), который представляет собой степень изменения экспрессии молекул, измеренную по соотношению значения экспрессии в пробе к ее значению в отрицательном контроле (рис. 4).

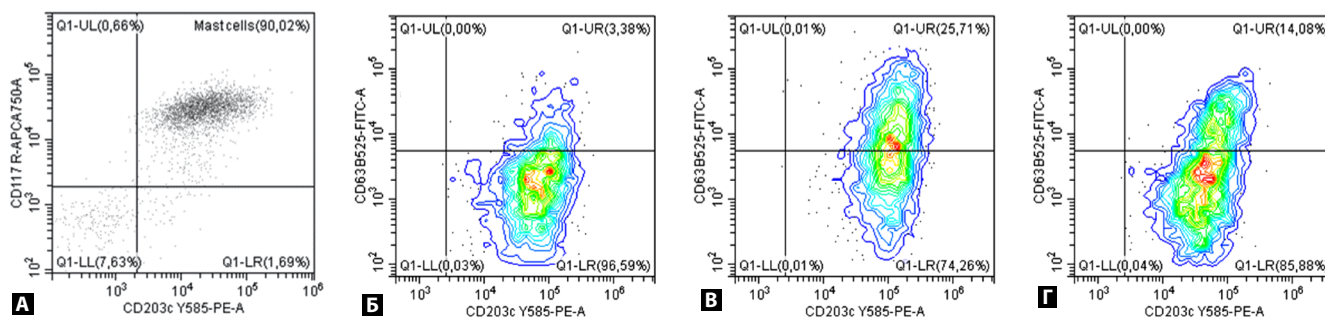


Рис. 4. Учет результатов МАТ: А – гейтирование тучных клеток по молекулам CD203c и CD117; Б – экспрессия CD63 на тучных клетках в отрицательном контроле; В – экспрессия CD63 на тучных клетках в положительном контроле; Г – экспрессия CD63 на тучных клетках в пробе с аллергеном (Ara h1) у сенсбилизированного пациента

Впервые в Беларуси выполнена оценка диагностической значимости нового метода диагностики реакций немедленного типа для пациентов с установленной клинически значимой IgE-опосредованной сенсibilизацией на следующий спектр аллергенов: береза ($n=16$), арахис ($n=9$), домашняя пыль ($n=11$), рыба ($n=4$), яд перепончатокрылых ($n=5$). Диагностическая значимость метода диагностики МАТ на основании значений ROC-анализа для индекса активации по молекуле CD63 составила: чувствительность диагностики – 80,0%, специфичность – 93,7% (cut-off-point ИА⁶³>1,6).

Таким образом, МАТ может быть использован для диагно-

стики сенсibilизации IgE-опосредованной гиперчувствительности немедленного типа на пыльцевые, инсектные и пищевые аллергены в ситуациях с неоднозначными результатами других лабораторных методов, противоречивыми данными между результатами исследований, анамнезом и клинической картиной патологической реакции, а также в спорных случаях при наличии у пациента полисенсibilизации.

Важное направление деятельности института – разработка БМКП для медицины. Цели применения клеточных продуктов разные: стимуляция иммунной системы в отношении опухолевых или вирусных антигенов, иммуномодулирующие и противовос-

палительные эффекты, стимуляция регенерации тканей и их замещение, прямое противоопухолевое действие и деплеция целевых клеток (рис. 5).

Институтом разработаны технологии производства 22 БМКП, из которых 13 зарегистрированы в установленном порядке [10]. Для лечения аутоиммунных и аллергических заболеваний могут применяться следующие клеточные продукты: толерогенные дендритные клетки, регуляторные Т-лимфоциты, мезенхимальные стволовые клетки обонятельной выстилки, включая аллогенные пулированные, мезенхимальные стволовые клетки обонятельной выстилки с усиленными иммуномодулирующими свойствами,

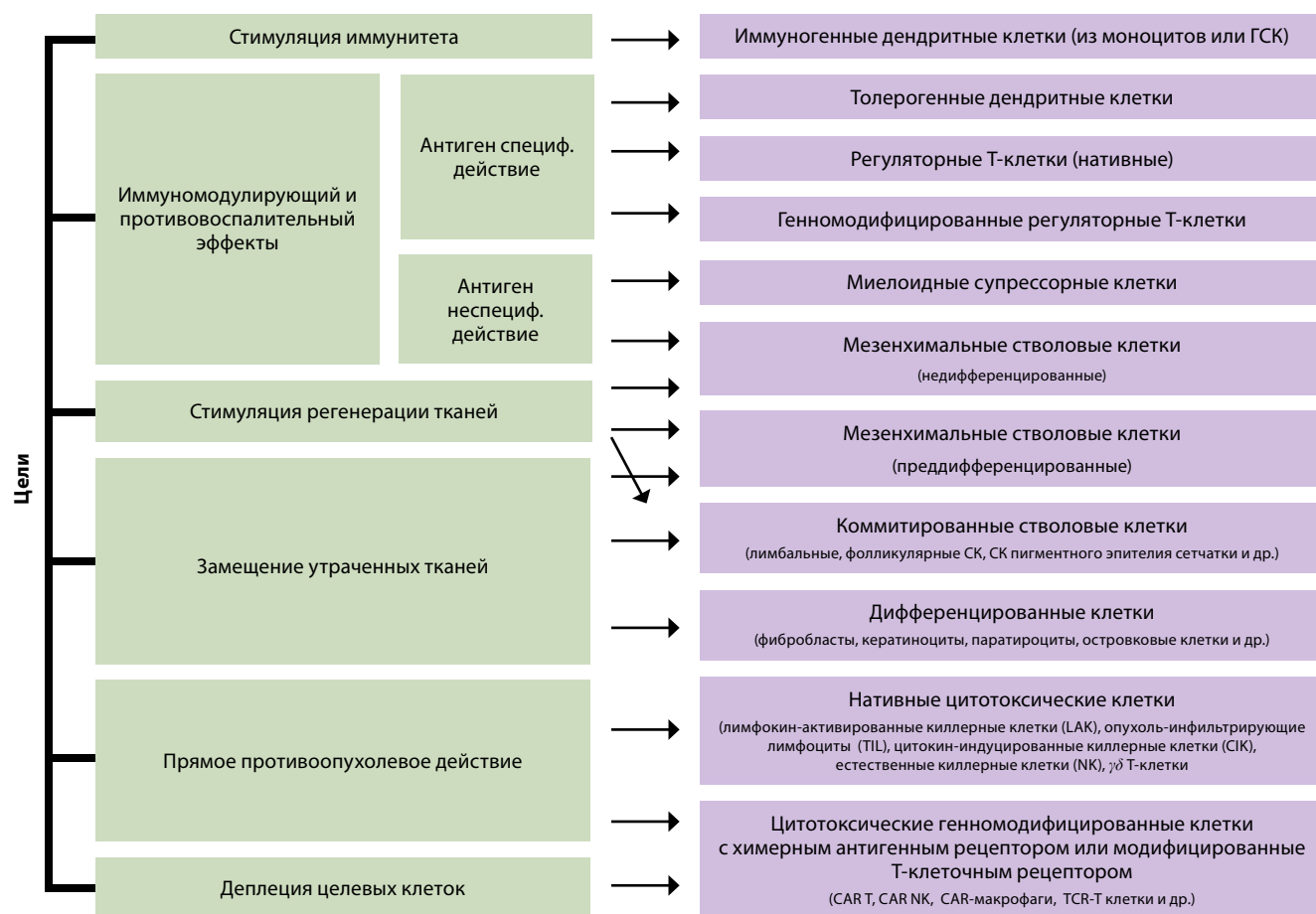
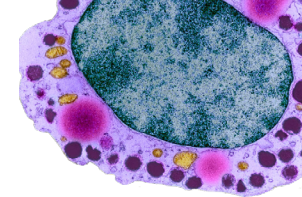


Рис. 5. Применение клеточных технологий в медицине



МСК, обогащенные внеклеточными везикулами.

В тесной кооперации с организациями Минздрава институтом созданы и внедрены методы лечения иммуноопосредованных и аллергических заболеваний: системной красной волчанки, системного склероза, сахарного диабета I типа, COVID-19-ассоциированных пневмоний, постковидного синдрома, хронического полипозного риносинусита, аллергического ринита. С 2019 г. данные способы практикуются в работе отделения клеточной терапии института. Здесь организован консультативный прием пациентов аллергологического и иммунологического профиля, в том числе детей.

Лечение аллергического ринита. Аллергический ринит (АР) – заболевание, характеризующееся IgE-опосредованным воспалением слизистой оболочки полости носа и наличием хотя бы двух из перечисленных симптомов: обструкция носа, зуд в его полости, ринорея, чихание. Длительное течение АР, необходимость постоянного приема лекарственных средств (антигистаминные, топические глюкокортикостероиды, антагонисты лейкотриеновых рецепторов и др.) и их побочные действия способствуют формированию лекарственной устойчивости и значительно снижают качество жизни пациентов.

МСК, полученные из различных тканей, а также их внеклеточные везикулы представляют значительный интерес для использования в качестве биомедицинского клеточного продукта благодаря их иммуномодулирующей активности. Кроме того, путем определенных биотехнологических подходов эти свойства МСК можно усилить. Так,

нами разработан БМКП на основе МСК обонятельной выстилки с улучшенными иммуносупрессивными и противовоспалительными свойствами. Протокол включает получение первичной культуры МСК, накопление биомассы, праймирование TNF- α , контроль качества по критериям жизнеспособности, стерильности, подлинности (наличие CD90, CD105, CD73 на мембране клеток и отсутствие маркеров гемопоэтических клеток и эндотелия CD45 и CD31), оценку иммуносупрессивных свойств по степени экспрессии коингибиторных молекул CD273, CD274 (рис. 6).

Институтом совместно с РНПЦ оториноларингологии в 2022–2023 гг. проведены клинические испытания с использованием БМКП по возможности его применения для лечения АР [11] (научный руководитель со стороны РНПЦ – профессор Ю.Е. Еременко).

В исследование включены пациенты с таким диагнозом ($n=22$), из которых 13 человек (средний возраст $43,8 \pm 5,3$ лет, из них мужчин – 8, женщин – 5) получали клеточную терапию, а 9 (средний возраст $48,4 \pm 4,6$ лет, из них мужчин – 7, женщин – 2) составляли группу сравнения. Все

участники были сопоставимы по возрасту и полу, имели подтвержденную аллергию на растения, пыль, животных: в основной группе – 13 чел. (100%), 6 (46%), 2 (15%), в контрольной – 9 (100%), 1 (11%), 2 (22%) соответственно.

Введение БМКП на основе МСК ОВ выполнялось под местной аппликационной анестезией раствором лидокаина 10% или под внутривенным наркозом. После анемизации слизистой оболочки полости носа раствором ксило-метазолина 0,1% под контролем эндоскопа БМКП вводился в слизистую оболочку полости носа в области средних носовых раковин, в латеральную стенку, верхние отделы перегородки носа и нижних носовых раковин. Количество вводимых клеток составило от 10 до 20 млн.

Переносимость процедуры всеми пациентами оценивалась как хорошая. Повышения температуры тела, изменения частоты сердечных сокращений, артериального давления, аллергических реакций немедленного типа выявлено не было. Показатели общего анализа крови соответствовали референтным значениям на всех этапах лечения. Они значимо не менялись через 1–2 месяца и через 1 год после применения МСК,

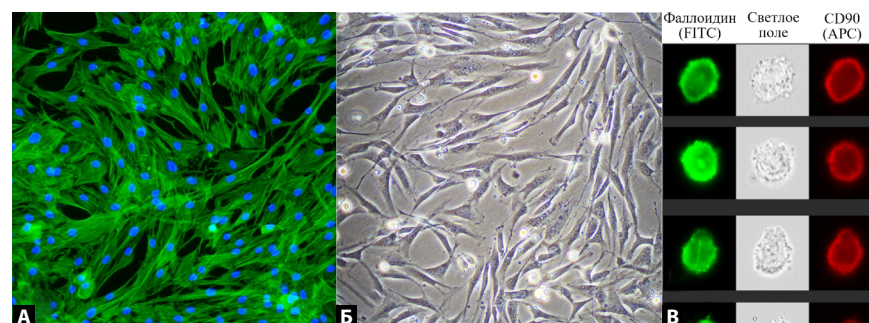


Рис. 6. Морфология и иммунофенотип МСК обонятельной выстилки с улучшенными иммуносупрессивными и противовоспалительными свойствами: А – флуоресцентная микроскопия (фаллоидин-FITC / Hoechst), 100 $\times$; Б – фазовое контрастирование, 100 $\times$; В – визуализирующая проточная цитометрия (Ch02 – фаллоидин (FITC), Ch04 – светлое поле, Ch05 – экспрессия CD90 (APC))

то есть не оказывали системного действия на организм. У участников основной группы, по данным эндоскопии, на 6–7-е сутки отмечались: изменение цвета слизистой оболочки полости носа на синюшно-розовый в области введения – у 2 пациентов (15%), из которых отек – у одного (8%), не было местных реакций – у 11 (84%). Через 1–2 месяца отклонения не фиксировались. Таким образом, можно сделать вывод, что применение МСК у пациентов с АР безопасно.

Содержание субпопуляций клеток системы иммунитета у пациентов с АР не имело существенных различий с референтными значениями. БМКП на основе МСК ОВ с улучшенными иммуносупрессивными и противовоспалительными свойствами не оказывает системного иммуномодулирующего действия.

Установлено, что клеточная терапия улучшает эндоскопическую картину полости носа через 6 мес. наблюдения в сравнении с группой контроля (без проведения клеточной терапии); снижает воспаление по данным риноцитогаммы; позволяет облегчить течение заболевания при контакте с аллергеном (по индексу TNSS) в срок до 1 года наблюдения; значительно снижает потребность в лекарственных средствах в течение полугода [12].

Разработана и утверждена инструкция по применению, в которой изложен данный метод лечения [13]. После завершения клинических испытаний в 2025–2026 гг. в рамках внедрения результатов НИР 9 пациентов с диагнозом АР получили лечение с использованием БМКП, у всех – с положительным эффектом.

Лечение atopического дерматита. Актуальность проблемы atopического дерматита (АД) как

социально значимого дерматоза обусловлена высоким уровнем заболеваемости, хроническим рецидивирующим течением, способствующим снижению качества жизни и инвалидизации пациентов, незначительной эффективностью традиционных методов лечения и ограничением доступности таргетной терапии. Мировой опыт свидетельствует, что распространенность АД имеет показатель 2–8% среди взрослых и до 20% – среди детей. В структуре дерматологических заболеваний, по данным различных авторов, АД занимает от 15 до 40%. Тяжелое течение, не поддающееся классической терапии, отмечается у 25% пациентов.

В иммунопатогенезе АД критическую роль играет активация Т-лимфоцитов и выделяемые ими цитокины, что приводит к усилению воспаления в коже и усугублению дефекта кожного барьера. Ранее в рамках фундаментального исследования, выполненного совместно РНПЦ эпидемиологии и микробиологии и БГМУ (руководители – А.Е. Гончаров, Д.А. Черношей), представлены

две модели АД, выполненные на линейных лабораторных мышах C57BL/6, и была оценена эффективность применения мезенхимальных стволовых клеток у мышей. Показано, что локальное использование МСК было безопасным для животных и способствовало коррекции воспалительных проявлений АД, что свидетельствует о перспективности МСК в практике. Полученные результаты стали основой для проведения клинических испытаний.

Существующие отечественные подходы в клеточной терапии с БМКП МСК основаны на использовании свежесекретированных клеток, что, в свою очередь, значительно увеличивает как сроки подготовки средства для введения пациенту, так и стоимость единицы продукции. Устранить данные недостатки поможет новый протокол лечения с помощью криоконсервированных клеток. В настоящий момент наш институт совместно с БГМУ выполняет задание ГНТП «Инновационные технологии в медицине» на 2026–2030 гг.

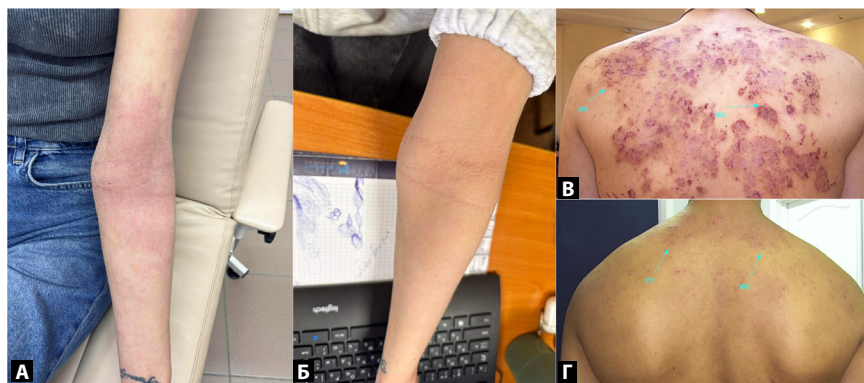
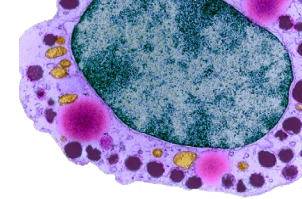


Рис. 7. Клиническая картина при АД: А – до применения БМКП (эритема, инфильтрация, обильное шелушение, микроэрозии, лихенификация); Б – через 30 суток после введения МСК (слабо выраженная эритема, незначительное мелко-пластинчатое шелушение, лихенификация); В – распространенный atopический дерматит, эритематозно-сквамозная форма, непрерывно-рецидивирующее течение, тяжелой степени; Г – через 30 суток после введения МСК (слабо выраженная эритема, мелко-пластинчатое шелушение, невыраженная лихенификация)



по разработке биомедицинского клеточного продукта на основе криоконсервированных аллогенных мезенхимальных стволовых клеток и метода лечения атопического дерматита с его использованием (научные руководители: А.П. Музыченко, Н.Г. Антонец, А.Е. Гончаров).

В рамках проекта проводится оценка иммунологической и клинической эффективности лечения АД с помощью иммунотерапии криоконсервированными МСК (криоМСК). В качестве их тканевого источника выбрана обонятельная выстилка (ОВ), технология получения которой в совершенстве отработана в институте. Для производства БМКП отобрана среда с 93% человеческой сыворотки АВ0 и 7% криопротектора ДМСО. Показано, что свежеевосстановленные из условий глубокого замораживания МСК обладают высокой иммуносупрессивной активностью: ингибирование митоген-индуцированной пролиферации Т-клеток составило >70%, что сопоставимо с клетками, не подвергавшимися криоконсервации.

По состоянию на июль 2026 г. в клиническое испытание включено 25 человек (11 – основной группы и 14 – группы сравнения) с диагнозом АД (тяжелое или среднетяжелое течение), которым локально и внутривенно ввели БМКП; 9 чел. – местно в область воспаления. Интервал между инъекциями составлял 1,5 месяца, количество доз за один раз – от 3 до 8, в зависимости от площади пораженного участка кожи. При этом общее самочувствие пациентов оставалось удовлетворительным, отмечена хорошая переносимость препарата, жалоб на болезненность или зуд не было, отсутствовали и местные системные и аллергические реак-

ции; температура, артериальное давление, частота дыхания, пульс фиксировались в пределах нормы.

Итоги лечения оценивали по результатам визуального осмотра и дерматоскопии. Случаев гипертермии, воспалительных процессов в области инъекций и иных негативных последствий не было. Показатели общих лабораторных тестов (общий анализ крови, биохимия) соответствовали референсным значениям, клинически значимых отклонений не зафиксировано.

В краткосрочном периоде наблюдения (30 дней) отмечалось снижение тяжести проявле-

ния симптомов при локальном введении БМКП (рис. 7).

Продemonстрировано положительное влияние способа лечения АД, что сопровождается статистически значимым снижением дерматологического индекса качества жизни. На данный момент продолжается медицинское наблюдение за группой пациентов.

Таким образом, в Центре успешно решаются самые разные проблемы диагностики и клеточной терапии аллергических заболеваний, разрабатываются уникальные тест-системы и методы оказания медицинской помощи. ■

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Microarray-Based Allergy Diagnosis: Quo Vadis? / H.-J. Huang [et al.] // *Frontiers in Immunology*. 2021. №11. P. 594978. Doi: 10.3389.
2. Extended IgE profile based on an allergen microarray: a novel tool for precision medicine in allergy diagnosis / E. Heffler [et al.] // *World Allergy Organization Journal* / 2018. №11(1). P. 7. DOI: 10.1186/s40413-018-0186-3.
3. A comprehensive comparison between ISAC and ALEX2 multiplex test systems / Platteel [et al.] // *Clinical Chemistry and Laboratory Medicine*. 2022. №60 (7). P. 1046–1052. DOI: 10.1515/cclm-2022-0191.
4. Molecular IgE Sensitization Profiling With Micro-Arrayed Allergen Molecules in Adult Patients With Asthma From the LEAD Cohort: A Precision Medicine Approach / H.-J. Huang [et al.] // *Allergy*. 2025. №81. P. 130–144. DOI: 10.1111/all.70017.
5. Allergy testing in children with persistent asthma: comparison of four diagnostic methods / Å. Önell [et al.] // *Allergy*. 2017. №72(4). P. 590–597. DOI: 10.1111/all.13047.
6. Романова И.В. Тест активации базофилов: технология метода и его применение в клинической практике / И.В. Романова, А.Е. Гончаров // *Иммунопатология, аллергология, инфектология*. 2018. №1. С. 26–34.
7. Метод диагностики заболеваний и патологических состояний, обусловленных реакциями гиперчувствительности немедленного типа на лекарственные средства из группы противомикробных препаратов для системного применения: инструкция по применению: утв. Министерством здравоохранения Респ. Беларусь 01.12.2017, №093–1117 / РНПЦ эпидемиологии и микробиологии; сост.: И.В. Романова, А.Е. Гончаров, Э.А. Доценко. – Мн., 2017.
8. Метод лабораторной диагностики заболеваний и патологических состояний, вызванных реакциями гиперчувствительности немедленного типа на пыльцу растений: инструкция по применению: утв. Министерством здравоохранения Респ. Беларусь 16.03.2018, №011-0118 / РНПЦ эпидемиологии и микробиологии; сост.: А.Е. Гончаров, И.В. Романова, Л.В. Маслова, А.В. Осипова. – Мн., 2018.
9. Иммунофункциональная характеристика культивированных тучных клеток человека и их применение в диагностике IgE-опосредованных реакций гиперчувствительности / И.В. Романова, А.Е. Гончаров, А.П. Рубан, Л.З. Шереметьева // *Иммунопатология, аллергология, инфектология*. 2025. №3. С. 6–13.
10. Государственный реестр биомедицинских клеточных продуктов // https://www.rceth.by/Refbank/reestr_biomeditsinskih_kletochnih_produktov.
11. Antonevich N. Treatment of Allergic Rhinitis and Chronic Polypous Rhinosinusitis With Olfactory Mucosa-derived Mesenchymal Stem Cells / N. Antonevich, A. Hancharou // <https://clinicaltrials.gov/study/NCT05167552>.
12. Efficacy and safety of intranasal Injection of allogeneic Mesenchymal stem cells in allergic Rhinosinusitis / J. Eremenko [et al.] // *Annals of Allergy, Asthma & Immunology*. 2024. Vol. 133. S. 93.
13. Метод лечения пациентов с аллергическим ринитом с использованием биомедицинского клеточного продукта на основе мезенхимальных стволовых клеток обонятельной выстилки с улучшенными иммуносупрессивными и противовоспалительными свойствами: инструкция по применению: утв. Министерством здравоохранения Респ. Беларусь 13.12.2024, №136-1223 / РНПЦ оториноларингологии, Институт биофизики и клеточной инженерии НАН Беларуси; сост.: Ю.Е. Еременко, А.Е. Гончаров, Н.Г. Антонец, А.А. Ниделько, В.Э. Гурбо, В.Л. Чекан, Э.А. Шулепова, Е.В. Шестакова. – Мн., 2024.



Профессиональная аллергическая астма

В последние десятилетия во всем мире отмечается резкий рост аллергических заболеваний. По данным ВОЗ, аллергическим ринитом страдают от 10% до 20% населения планеты, а в развитых странах этот показатель достигает 30%. Количество страдающих бронхиальной астмой (БА) уже превысило 300 млн человек, причем в 60–80% случаев она имеет аллергическую природу. Ежегодно этот недуг уносит до 250 тыс. жизней, что выводит проблему в глобальную угрозу для систем здравоохранения [8]. Особое место в этой статистике занимает профессиональная астма. В промышленных странах до 15–20% всех случаев заболевания у взрослых развиваются из-за воздействия вредных факторов на рабочих местах [4, 9]. Правильный диагноз и своевременное вмешательство являются определяющими критериями в прогнозе заболевания и его социально-экономических последствий [9]. Своевременный аудит условий работы и вывод сотрудника из зоны риска не только спасают его здоровье, но и защищают остальной коллектив. Такой подход предотвращает инвалидность персонала и снижает экономические потери как для конкретного предприятия, так и для государства в целом.



Татьяна Барановская,
доцент кафедры пульмонологии,
фтизиатрии, аллергологии и
профпатологии Белорусского
государственного медицинского
университета, кандидат
медицинских наук

Эпидемиология

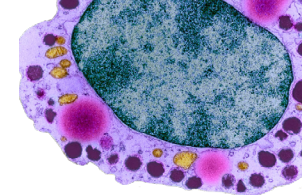
Многоцентровое ретроспективное исследование, проведенное в Европе, показало, что тяжелая форма болезни была диагностирована у 16,2% пациентов и обусловлена их профессиональной деятельностью [13]. Для сравнения: среди людей, у которых астма не связана с условиями труда, она встречается приблизительно в 5% случаев [1]. К тяжелому течению профессиональной астмы обычно приводит постоянное воздействие вызывающего ее фактора на рабочем месте, слишком поздняя диагностика и низкий уровень образования работников, из-за которого они часто игнорируют правила безопасности [13].

В 2016 г., по оценкам исследователей, 24,0% мужчин и 13,4% женщин во всем мире подвергались воздействию опасных

веществ на производстве, способных вызывать астму [7].

Профессиональная астма характеризуется обратимой обструкцией дыхательных путей и/или гиперчувствительностью к факторам рабочей среды. Классификация заболевания включает аллергическую бронхиальную астму, обусловленную гиперчувствительностью к компонентам рабочей среды, а также неиммунную форму, или астму, спровоцированную раздражающими веществами (ирритантами). Астма, вызванная сенсibilизаторами, более распространена и встречается приблизительно в 90% случаев.

Формирование аллергической профессиональной астмы включает некоторый латентный период от начала воздействия аллергена до первых клинических проявлений. Иногда симптомы ска-



зываются через месяцы, а то и годы. Скорость развития болезни напрямую зависит от концентрации вредного вещества на производстве, агрессивности самого аллергена и индивидуальных особенностей организма.

Производственные факторы риска разделяют на высокомолекулярные (индуцируют IgE-зависимые реакции) и низкомолекулярные вещества, вызывающие иммунный ответ иногда без участия иммуноглобулинов (таблица). На сегодняшний день доказана связь с развитием астмы примерно для 600 промышленных соединений, из которых более 400 обладают выраженными сенсибилизирующими свойствами.

Недавнее масштабное исследование в Европе с участием когорты из 635 работников показало неожиданный результат. Из сотен потенциальных аллергенов в общей сложности 8 высокомолекулярных или низкомолекулярных веществ являются причиной более 70% всех случаев бронхиальной астмы. В этот список вошли: мука, изоцианаты, персульфаты, металлы, латекс, древесная пыль, четвертичные аммониевые соединения и акрилаты [7].

К низкомолекулярным агентам относятся органические и неорганические соединения, действующие как гаптены, часть которых обладает иммунными механизмами, опосредованными IgE, включая соли платины (промышленные катализаторы), тримеллитиновые и фталевые ангидриды (содержащиеся в красках и герметиках), персульфаты (окрашивание волос, отбеливатели). К низкомолекулярным сенсибилизаторам без воздействия IgE относятся диизоцианаты (содержащиеся в красках и лаках, а также используемые в производстве

полиуретана), акрилаты (клеи и адгезивы), соединения в составе древесины, такие как пикватовая кислота (красный кедр), металлы (хром, никель и кобальт) и глутаральдегид.

Диагностика

Алгоритм диагностики профессиональной астмы состоит из нескольких этапов:

- **сбор профессионального анамнеза:** детальное изучение всех контактов с вредными веществами на рабочем месте;
- **подтверждение диагноза астмы:** спирометрия (измерение функции внешнего дыхания) и другие тесты;

- **доказательство связи с профессией:** наиболее информативным считается серийное измерение пиковой скорости выдоха (пикфлоуметрия) в течение нескольких недель, включая рабочие и выходные дни. Специфические ингаляционные провокационные тесты проводятся в специализированных центрах.

Профессиональный характер заболевания надо предполагать у всех взрослых с возникшим бронхообструктивным синдромом. Хотя клинические проявления не отличаются от симптомов обычной, не профессиональной астмы (свистящее дыхание, тяжесть в грудной клетке, одышка, кашель), они проявляются

Сенсибилизатор	Профессия/Место работы/ Воздействие
Высокая молекулярная масса (≥ 5 кДа)	
Мука и зерновые	Пекари, пищевая промышленность
Латекс (натуральный каучук, гуттаперча)	Медицинские работники; производители и частые пользователи изделий из латекса
Ферменты (<i>Bacillus subtilis</i> , трипсин, папаин и др.)	Производство и использование моющих средств; фармацевтическая и пищевая промышленность
Продукты растительного происхождения	Сельское хозяйство
Животные и продукты животного происхождения	Лаборатории, виварии ветеринарные, сельское хозяйство, кожевники
Грибы (<i>Aspergillus</i> , <i>Cladosporium</i> , <i>Trichoderma</i>)	Офисы, школы, уборщики, сельское хозяйство, технические установки, мельницы и др.
Низкая молекулярная масса (< 5 кДа)	
Диизоцианаты	Производство полиуретана; производство пенопласта; автомобильные краски и полиуретановые лаки, клеи; пластмассовая промышленность
Персульфаты	Парикмахерские, прачечные
Металлы (соли хрома, никеля, кобальта, цинка, платины)	Металлопокрытие (гальванизация), сварщики, фармацевтическая промышленность и нефтеперерабатывающие заводы
Четвертичные аммониевые соединения	Уборщики, медики
Акрилаты	Стоматология, клеевые смолы, синтетические ткани, типографские чернила, производство, мастера маникюра
Древесная пыль	Плотники, деревообработка
Чистящие средства: глутаральдегид	Уборщики, медицинские работники
Лекарственные препараты (например, антибиотики)	Фармацевтическая промышленность, медики
Фталевые и тримеллитиновые ангидриды	Производство эпоксидной смолы, маляры

Таблица. Наиболее распространенные сенсибилизаторы, а также часто встречающиеся профессии/рабочие места и факторы воздействия

преимущественно на рабочем месте. При этом латентный период от начала трудовой деятельности до развития сенсibilизации может составлять от нескольких недель до нескольких лет.

Сбор профессионального анамнеза и оценка причинного фактора

На ранних стадиях заболевания пациенты отмечают появление симптомов бронхиальной обструкции непосредственно на работе, однако они исчезают или ослабевают, если человек находится вне ее (в выходные дни или во время отпуска). Утяжеление симптоматики, как правило, наблюдается при длительном контакте с аллергеном, вследствие чего клиническое улучшение вне производства наступает со значительным опозданием даже во время отдыха. Поздние астматические реакции на аллерген, приводящие к усилению симптомов в конце рабочего дня или после его окончания, могут значительно осложнить своевременное выявление болезни. Кроме того, воздействие домашних раздражителей и сенсibilизаторов может ухудшить течение астмы и во вне рабочее время. Таким образом, клинический анамнез более надежен для исключения, чем для подтверждения профессионального характера заболевания. Согласно имеющимся данным, отрицательная прогностическая ценность анамнеза составляет 83%, тогда как положительная – 63% случаев [11].

Важным этапом является оценка течения заболевания на основании выписки из амбулаторной карты, содержащей информацию о частоте обострений, объеме лечения и его результатах. Надежными и полезными

объективными параметрами служат также интенсивное использование лекарств, частота посещения врача и госпитализация.

Медицинский осмотр – это форма скрининга на рабочем месте, позволяющая выявлять случаи астмы на ранней стадии. Данный вид обязательного контроля включает профосмотр специалиста с проведением спирометрии. Работников, у которых в его ходе были обнаружены новые симптомы астмы или нарушения функции легких, следует как можно скорее направить к врачу, имеющему опыт в диагностике и назначении терапии.

Подтверждение профессионального характера бронхиальной астмы проще всего осуществлять до прекращения контакта с производственным фактором и назначения поддерживающего лечения. В целях установления этиологической связи патологии, сопряженной с условиями труда, проводят многократные измерения пиковой скорости выдоха (ПСВ), а также анализируют обращения за медицинской помощью в рабочие часы. Тесты в условиях производства (экспозиционная проба) и специфические ингаляционные пробы используются реже.

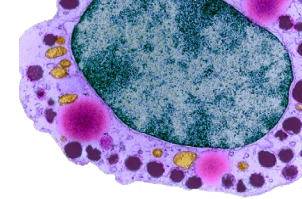
Идентификация триггерного фактора критически важна для верификации диагноза профессиональной астмы. Это позволяет минимизировать контакт с опасным веществом в будущем, предотвратить развитие патологии у других работников, а также своевременно обнаружить новые потенциальные источники опасности. Если данные клинко-профессионального анамнеза и производственные условия указывают на профессиональный характер заболевания, необходимо незамедлительно прове-

сти дальнейшее обследование, предпочтительно – пока пациент еще работает и подвергается воздействию причинного агента, для объективной оценки астмы и установления ее связи с условиями труда и принятия мер по защите персонала.

Подтверждение профессиональной причины заболевания рекомендуется обосновывать серийными измерениями пиковой скорости выдоха (ПСВ) и аллергологическими исследованиями с производственными аллергенами.

Серийный мониторинг ПСВ обладает достаточной доказательной базой для диагностики астмы, вызванной ингаляционными аллергенами [6]. Получение качественных данных возможно при условиях предварительного соответствующего обучения и подробного инструктажа обследуемого. Несмотря на то, что нельзя полностью исключить вероятность ложных или неточных результатов, данный метод признан наиболее простым и экономически доступным для оценки реакции организма на промышленные ингаляционные аллергены, в связи с чем рекомендован для использования во всем мире. Измерения пиковой скорости выдоха следует проводить не менее 4 раз в день с интервалом не более 2–3 часов на протяжении двух недель в рабочие смены и столько же – вне работы.

Для сравнительного анализа используются наибольшие значения из трех записей, выполненных в каждой временной точке. Колебания показателя пикфлоуметрии на 20% и более в рабочие дни расцениваются как диагностически значимый критерий в пользу профессиональной астмы. Одновременно с этим осуществляется мониторинг клинических



симптомов болезни и потребности больного в бронхолитиках, а также объема получаемой базисной терапии. Чувствительность метода составляет 75% и специфичность – 79% для диагностики заболевания [10].

Аллергологическое обследование чаще всего состоит в выполнении кожных тестов с обычным набором аллергенов и с аллергенами, присутствующими на рабочем месте, что позволяет подтвердить наличие сенсibilизации. Определение уровня специфических антител IgE также свидетельствует о повышенной чувствительности к причинным агентам. Реже используется ингаляционный тест с производственным аллергеном.

Лечение профессиональной бронхиальной астмы

Лечение заболевания осуществляется в соответствии с утвержденным клиническим протоколом и по возможности должно проводиться профильным специалистом, обладающим специальными знаниями в этой области [2]. В рамках взаимодействия с пациентами важно объяснить им, что оптимальные условия для улучшения контроля над заболеванием обеспечиваются при раннем и полном прекращении контакта с причинно-значимым производственным фактором воздействия. Терапия имеет комплексный характер и включает стандартную фармакотерапию, обучение больных, а также консультирование по вопросам отказа от курения в соответствии с национальными рекомендациями. Кроме того, у таких людей могут наблюдаться сопутствующие и связанные с астмой патологии (например, профессиональный аллергический ринит,

конъюнктивит, повышенная тревожность и депрессия), которые также требуют своевременного обследования и терапии [12].

Профилактика профессиональной астмы

Комплекс мер первичной профилактики направлен на предотвращение возникновения новых случаев заболевания работников и включает следующие направления:

- *полный отказ от использования новых сенсибилизирующих агентов на рабочем месте, а также их поэтапное замещение безопасными аналогами;*
- *модификация химическо-физической формы веществ-сенсибилизаторов для снижения риска сенсибилизации (например, уменьшение пылеобразования, гранулирование и полимеризация продукта);*
- *снижение уровня воздействия за счет технологической модификации производства (автоматизация и роботизация линий, установка эффективных систем и применение средств индивидуальной защиты);*
- *обучение рабочих правилам техники безопасности и гигиены труда;*
- *систематический контроль за уровнем концентрации сенсибилизирующих агентов в рабочих зонах.*

Меры повторной профилактики, направленные на обнаружение первых признаков патологии до развития тяжелых нарушений функции дыхания, включают:

- *медицинский контроль в группах риска (проведение обязательных предварительных (при поступлении*

на работу) и периодических медицинских осмотров работников);

- *обучение персонала пунктов актуальным вопросам диагностики профессиональных аллергических заболеваний;*
- *проведение инструктажей и образовательных программ для рабочих о рисках развития профессиональной астмы и первых симптомах аллергии.*

Для предупреждения прогрессирования болезни и сохранения трудоспособности работники осуществляют следующие мероприятия:

- *максимально раннее выявление заболевших лиц и объективное подтверждение диагноза;*
- *рациональное трудоустройство после подтверждения диагноза и подбор безопасных условий труда;*
- *контроль за другими возможными триггерами и минимизация контакта с ними (бытовыми аллергенами, табачным дымом, резкими запахами);*
- *динамичное наблюдение за состоянием здоровья пациентов с подбором и коррекцией адекватной терапии.*

Как показывают исследования, примерно каждый шестой пациент с бронхиальной астмой соответствует критериям тяжелой формы патологии. Прогноз в значительной степени определяется тяжестью течения болезни на момент постановки диагноза и тем, продолжают ли работники подвергаться воздействию вредного фактора в дальнейшем. Около 25–30% больных, прекращающих контакт с причинно-значимым агентом, полностью выздоравливают,

а еще 30–35% отмечают уменьшение выраженности симптомов на фоне терапии и рационального трудоустройства [5]. В свою очередь лица, продолжающие работать в условиях экспозиции триггерного вещества, подвержены высокому риску необратимого тяжелого течения заболевания. ■

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Распространенность, заболеваемость, фенотипы и другие характеристики тяжелой бронхиальной астмы в Российской Федерации / С.Н. Авдеев, Н.М. Ненашева, К.В. Жуденков, В.А. Петраковская [и др.] // Пульмонология. 2018. Т. 28. №3 С. 341–358.
2. Клинический протокол «Диагностика и лечение пациентов (взрослое население) с бронхиальной астмой». 30.04.2024 г. №84 // <https://minzdrav.gov.by/>.
3. British Thoracic Society Clinical Statement on occupational asthma / Ch.M. Barber [et al.] // Thorax. 2022. P. 1–10.
4. Impact of occupational exposures on exacerbation of asthma: a population Based asthma cohort study / K.J. Hennerberger [et al.] // BMC Pulmonary Medicine. 2016. №16. P. 148.
5. Workplace interventions for treatment of occupational asthma / P.K. Hennerberger [et al.] // Cochrane Database Systematic Review. 2019. №10. P. CD006308.
6. A Practical Clinical Model for Diagnosing Occupational Asthma in Workers Exposed to low-Molecular-weight agent s: Model Development and Validation / H.N. Kigloo [et al.] // The Journal of Allergy and Clinical Immunology: In Practice. 2026. №14(5). P. 1121–1132.
7. Main causal agents of occupational asthma in France / D. Lucas [et al.] // Annals of Work Exposures and Health. 2023. №67(3). P. 297–302.
8. Matazimov M.T. Allergy and allergy related diseases: global Statistics and analysis of sources / M.T. Matazimov, M.Sh. Dolanova // Central Asian Journal of education and Innovation. 2026. Vol. 5(1), Part 3. P. 16–21.
9. Martinez R.O. Guidelines for Occupational Asthma / R.O. Martinez // Archivos de Bronconeumologia. 2006. №42(9). P. 457–474.
10. Moore V.C. A Systematic Review of Serial Peak Expiratory Flow Measurements in the Diagnosis of Occupational Asthma / V.C. Moore, M.C. Yaakkola, P.C. Burge // Annals Respiratory Medicine. 2009. Vol. 1. P. 31–44.
11. Clinical diagnosis of current asthma: predictive value of respiratory symptoms in the SAPALDIA study / Sistek D. [et al.] // The European Respiratory Journal. 2001. №17(2). P. 214–219.
12. Diagnosis and management of work-related asthma / S.M. Tarlo [et al.] // Chest. 2008. №134. P. 1–41.
13. Severe Occupational Asthma insights from a multicenter European Cohort / O. Vandenplas [et al.] // The Journal of Allergy and Clinical Immunology: In Practice. 2019. №7. P. 2309–2318.

Провокационное аллерготестирование гиперчувствительности к металлам



Наталья Аляхнович,

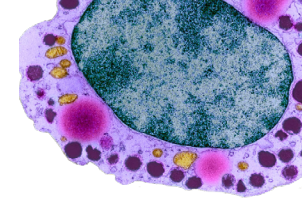
доцент кафедры клинической иммунологии и аллергологии с курсом ФПК и ПК Витебского государственного медицинского университета, кандидат медицинских наук, доцент



Оксана Ищенко,

заведующий кафедрой клинической иммунологии и аллергологии с курсом ФПК и ПК Витебского государственного медицинского университета, доктор медицинских наук, профессор

Гиперчувствительность к металлам (ГЧМ) – замедленная аллергическая реакция, возникающая при повторных контактах с металлическими изделиями. Учитывая их широкое применение в медицине, ГЧМ может иметь серьезные последствия и вызывать послеоперационные осложнения, в том числе несостоятельность протезов и имплантов [1]. Иммунный ответ на металлы отличается от гиперчувствительности на продукты питания, лекарства и аллергены окружающей среды (пыльцевые, бытовые, эпидермальные и т.д.). ГЧМ обусловлена 4-м типом аллергических реакций и представляет собой активацию сенсibilизированных Т-лимфоцитов, которая проявляется через 2–3 суток после контакта с металлом, к которому ранее была приобретена повышенная чувствительность. Т-лимфоциты пролиферируют и продуцируют провоспалительные цитокины, чем вызывают активацию макрофагов и выброс дополнительных медиаторов воспаления [2]. ГЧМ может проявляться отеком, дерматитом, болью вокруг места имплантации, потерей функции протеза вследствие остеолитизиса [3],



поражением более глубоких тканей со снижением объема движений и суставным выпотом [4].

Тотальную артропластику, а также открытую репозицию с внутренней фиксацией проводят с помощью металлоконструкций из нержавеющей стали, сплавов кобальта или титана. В случае эндопротезирования суставов обычно используется титан благодаря его способности быстро покрываться оксидной пленкой, устойчивой к окружающей среде, что придает ему относительную биологическую инертность [5]. Кроме того, титан схож по характеристикам с эластичностью кости, что способствует заживлению тканей после бесцементной артропластики и фиксации переломов [6]. Комбинации с кобальтом обеспечивают необходимую гладкость поверхностей, а применение нержавеющей стали с никелем, хромом, железом и молибденом обусловлено ее способностью к хорошей деформации при нагрузках, что предпочтительно при срастании переломов [5].

Распространенность ГЧМ, проявляющейся в виде кожных реакций, оценивается в 10–15% в общей популяции, с наибольшим количеством реакций на никель (14%) [1]. Тем не менее имеются описания клинических случаев гиперчувствительности на хром, кобальт, молибден и даже титан. Несмотря на сравнительно большую устойчивость к коррозии, исследования *in vivo* и *in vitro* доказали, что оксидный слой на поверхности титановых имплантов может повреждаться, например, при травме или высоких механических нагрузках, а также в результате контакта с биологическими средами организма, что влечет выделение ионов. Ионы титана активно связываются с белками

и аминокислотами, формируют металлоорганические комплексы и способствуют увеличению скорости дальнейшей коррозии титанового сплава. Обнаружено от 100 до 300 ионов титана на миллион в тканях около импланта и в региональных лимфоузлах [7].

Гистологическая оценка при ГЧМ показывает инфильтрацию лимфоцитами и развитие фиброза вследствие контакта с ионами металлов, поступающими в окружающие ткани после начала коррозионных процессов в металлодержащих изделиях [8].

Наиболее распространены клинические проявления аллергии на металлоконструкции – локальные периимплантные кожные реакции: эритематозно-папулезная сыпь, экзема с шелушением, плохое заживление послеоперационной раны, иногда сочетание с системными высыпаниями по типу крапивницы, псориаза, псориатических бляшек и др. Принимая во внимание возможность системных реакций, в том числе и в отдалении от металлоконструкции, а также неспецифических, сходных с другими осложнениями (инфекционными или механическими) симптомов, истинная распространенность ГЧМ может быть значительно выше [1].

В случае аллергического контактного дерматита общепринятым методом диагностики выступает патч-тестирование – способ диагностирования аллергии при аппликации на кожу исследуемого аллергена в нераздражающей концентрации на 2 суток с последующей визуальной фиксацией возникающих типичных проявлений гиперчувствительности замедленного типа – везикулярной воспалительной инфильтрации, возникающей в среднем после 72 часов после контакта причинного аллергена с кожей [9].

В случае ГЧМ в ортопедии аппликационное тестирование не всегда информативно, так как не полностью повторяет условия экспозиции металлического протеза [9]. Другой способ диагностики – использование реакции трансформации лимфоцитов (РТЛ), которая измеряет пролиферацию периферических лимфоцитов в ответ на воздействие потенциального аллергена *in vitro* после инкубационного периода. Тем не менее не обнаружено стойкой корреляции между РТЛ и гистологическим подтверждением периимплантной патологии, что свидетельствует о невозможности применения РТЛ в качестве единственного надежного предиктора осложнений артропластики вследствие ГЧМ [10].

Генетическая предрасположенность, нарушения в системе иммунитета, степень выделения ионов металлов из металлоконструкций, обширность хирургических манипуляций в ходе установки импланта влияют на развитие и разнообразие клинических симптомов ГЧМ. Принимая во внимание низкую степень осведомленности медицинских работников в данной области, необходимы стандартные протоколы предоперационного выявления пациентов с ГЧМ или высоким риском ее возникновения с обращением особого внимания на людей с асептическим отторжением импланта в прошлом [1].

В качестве методов лечения ГЧМ необходимо выделить терапию топическими иммунодепрессантами, в том числе глюкокортикостероидами при локализованных дерматитах, тогда как тяжелые случаи требуют ревизии имплантов на основе альтернативных материалов – керамических покрытий, танталовых и иных сплавов, устойчивых к коррозии [11].

Научными сотрудниками университета было обследовано 66 человек, средний возраст – 43 года, из них 58 женщин (87,9%) и 8 мужчин (12,1%). Всех пациентов разделили на группы по вероятности ГЧМ с помощью разработанного балльного опросника [12, 13]. Набравших менее 3 баллов и без симптомов непереносимости металлов включили в группу сравнения (16 человек), имевших признаки ГЧМ и набравших от 3 баллов – в исследуемую группу (50 человек). Средний возраст обследованных достоверно не различался – 41,9 [34,0; 50,0] и 43,6 [40,1; 47,1] лет, как и соотношение по полу (%) – женщины/мужчины – 12,0/88,0 и 12,5/87,5 соответственно.

Все пациенты прошли провокационное аллерготестирование – аппликационные пробы со стандартными соединениями хрома, кобальта, молибдена, никеля, алюминия, титана на вазелине (инструкция №081-1225) [13].

Кроме того, часть представителей группы (22 человека) с высокой вероятностью гиперчувствительности к соединениям титана (выявлено по характерным анамнестическим указаниям опросника – так называемым большим критериям, таким как аллергические реакции в анамнезе на продукты с пищевыми красителями, на лекарственные препараты в окрашенных таблетках и капсулах без указания конкретного действующего вещества, на косметические средства и средства гигиены, ухода (зубные пасты) в случае наличия оксида титана или физического солнцезащитного компонента в их составе, на титаносодержащие импланты/протезы) прошли сублингвально-оральную пробу с оксидом титана с оценкой изменения пероксидазной активности ротовой жидкости (инструкция №112-1124) [14].

Всем обследованным до и после провокационных проб проведен общеврачебный осмотр.

Результаты статистически обрабатывались в программе Statistica 8.0 с применением критериев T-test Стьюдента, Манна – Уитни (M-U), корреляции Spearman Correlation в зависимости от типа распределения величин.

По результатам анализа опросника выделены 2 подгруппы. Установлено, что у 22 человек (подгруппа 1) наблюдались симптомы аллергического контактного дерматита на металлы (таблица).

Оставшиеся 28 человек (подгруппа 2) отмечали системные аллергические реакции в виде гиперемии кожи, отеков, крапивницы, зуда, ощущения металлического привкуса во рту, жжения после установки металлоконструкций, нанесения татуировки либо после употребления/использования косметических средств, пищевых продуктов, лекарственных препаратов, потенциально содержащих пищевые добавки с повсеместно распространенным и входящим в их

Анамнестические сведения	Группа					
	исследуемая (n=50)				сравнения (n = 16)	
	подгруппа 1 (n=22)		подгруппа 2 (n=28)			
	n	%	n	%	n	%
Дерматит в виде зудящих пузырьков, эритема, отек, инфильтрация в местах контакта с металлической фурнитурой, бижутерией и т.д.	22	100*	0	0	0	0
Наличие любых аллергических реакций на металлические изделия	22	100	19	67,9*	0	0
Наличие металлоконструкций в организме	6	27,3	18	64,3*	0	0
Наличие зубных имплантов	7	31,8	11	42,9	6	37,5
Периимплантиты и другие симптомы непереносимости металлических зубных имплантов и ортопедических металлоконструкций	3	13,6	6	21,4	0	0
Сыпь, покраснение кожи при использовании косметических средств	11	50,0	13	46,4	3	18,8
Сыпь, покраснение кожи вследствие применения дезодорантов	3	13,6	3	10,7	0	0
Отягощенный аллергоанамнез	10	45,6	16	57,1	0	0
Подозрение на гиперчувствительность к соединениям титана	8	36,4	14	50,0	0	0

Таблица. Анамнестическая характеристика обследованных пациентов. Примечание: * – достоверные различия между подгруппами ($p < 0,05$)

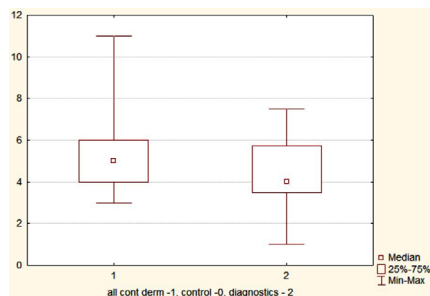
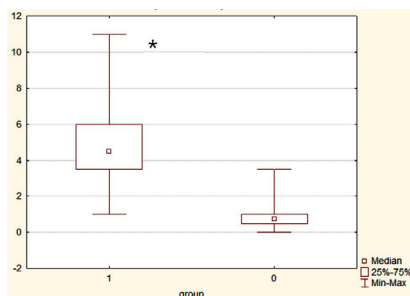
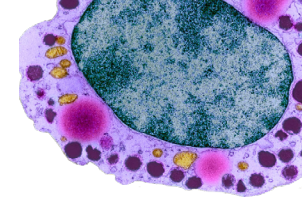


Рис. 1, 2. Баллы опросника исследуемой и группы сравнения (слева), баллы опросника подгрупп исследуемой группы (справа)

состав оксидом титана (таблица). Достоверно меньшее количество пациентов подгруппы 2 – 67,9% ($p=0,005$) – называли металлы в качестве причинно-значимых аллергенов или связывали свои симптомы с контактом с ними (у большинства из них ($p=0,01$) имелись металлоконструкции в организме – зубные импланты и/или ортопедические протезы), в отличие от представителей 1-й подгруппы (таблица). По остальным анамнестическим признакам количество людей в подгруппах статистически не различалось.

Пациенты исследуемой группы набрали достоверно большее количество баллов по опроснику – 4,5 (3,5; 6,0), чем группа сравнения – 0,8 (0,5; 1,0) (M-U: $p=0,000$) (рис. 1). Баллы между подгруппами значимо не различались: в 1-й они составили 5,0 (4,0; 6,0), во 2-й – 4,0 (3,5; 5,8) (M-U: $p=0,09$) (рис. 2).

У людей с симптомами аллергического контактного дерматита на металлы (подгруппа 1) аппликационные пробы с металлами показывали положительный результат значительно чаще, чем в подгруппе с другими симптомами ($p=0,001$).

В первой подгруппе аппликации были положительными в 77,3% случаев (17 человек из 22 обследованных), во второй – в 25,0% (7 из 28), и это подтверждает наблюдение о том, что патч-тестирование более эффективно в диагностике кожных симптомов ГЧМ.

В подгруппе 1 чаще выявлялась аллергия к никелю (в 88,2% случаев из положительных результатов аппликаций), далее – к хрому (35%) и кобальту (23,5%), реже – к титану (17,7%) (рис. 3), молибдену и алюминию (11,8%). В подгруппе 2 наибольшее

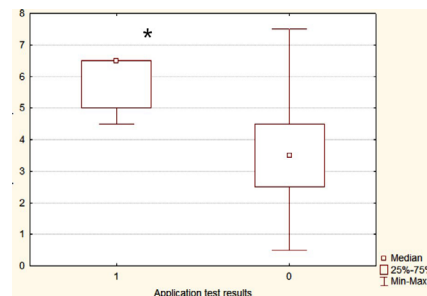


Рис. 4. Баллы опросника пациентов с положительными и отрицательными результатами аппликационного тестирования с металлами в подгруппе 2

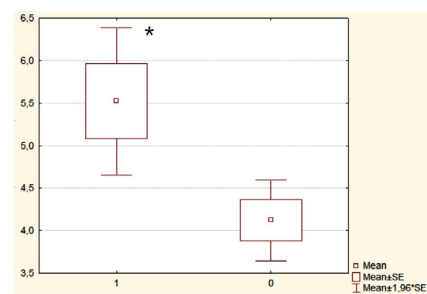


Рис. 5. Баллы опросника пациентов с подозрением на гиперчувствительность к титану и без нее в исследуемой группе

количество положительных аппликаций было с титаном (57,1% случаев), далее – с никелем, кобальтом и молибденом (по 42,9%), реже – с хромом (14,2%), не было их с алюминием. Интересно, что у всех 7 пациентов с положительными пробами на металлы в подгруппе 2 было зарегистрировано значимое увеличение пероксидазной активности ротовой жидкости после сублингвально-орального провокационного теста с оксидом титана [14], что подтверждает сенсibilизацию к титану.

У лиц с положительным тестом на металлы в подгруппе 2 были выше баллы по опроснику – 6,5 (5,0; 6,5), по сравнению с теми, у кого аппликации не выявили сенсibilизацию ни к одному протестированному металлу –



Рис. 3. Положительные аппликации после 48 ч экспозиции с соединениями металлов, слева направо: с никелем, кобальтом и титаном

3,5 (3,0; 4,5) ($M-U: p=0,008$) (рис. 4), в то время как в подгруппе 1 таких различий по баллам опросника не наблюдалось.

Положительный результат аппликационных проб с металлами в подгруппе 2 коррелировал с подозрением на гиперчувствительность к титану ($r=0,6$), а также с более высокими баллами по опроснику, отягощенным аллергоанамнезом и аллергическими реакциями на косметику в анамнезе ($r=0,5$), тогда как в подгруппе 1 подобных корреляций не обнаружено.

Из 22 пациентов с подозрением на гиперчувствительность к титану балльные результаты опросника – 5,5 [4,6; 6,4] – были значительно выше, чем у остальных – 4,1 [3,6; 4,6] ($T\text{-test}: p=0,005$) (рис. 5).

Провокационный сублингвально-оральный тест с оксидом титана у этих пациентов был положительным у 17 человек (77%), что соответствует исследованиям диагностической чувствительности предложенного провокационного теста, проведенным ранее [14, 15]. Так как сублингвально-оральная проба выполнялась только у лиц с подозрением на гиперчувствительность к титану, частота положительных результатов в подгруппе 1 (75%) и в подгруппе 2 (79%) достоверно не различалась.

Частота положительных аппликационных проб с оксидом титана у пациентов с подозрением на гиперчувствительность к данному металлу составила лишь 23%, еще у 9% они были сомнительными, что показывает более низкую эффективность кожного провокационного аллertestирования по сравнению с сублингвально-оральной пробой ($p=0,001$).

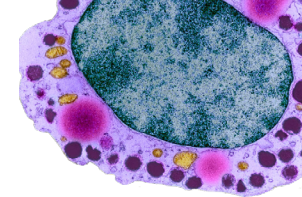
У имеющих аллергические симптомы непереносимости

металлоконструкций ($n=9$) аппликационные кожные пробы с соединениями металлов были положительными у 5 человек (55,6%), среди них у 33,3% – с никелем или хромом, у 22,2% – с кобальтом, молибденом или титаном, у одного (11,1%) – сомнительная с алюминием. Лишь в одном случае была выявлена моносенсибилизация к никелю, у остальных – одновременно к нескольким металлам. Сублингвально-оральная проба с оксидом титана выполнена пяти пациентам из этой подгруппы. В 4 случаях (80,0%) она была положительной, причем в одном помогла выявить сенсибилизацию к титану при отрицательных аппликационных пробах. Всего гиперчувствительность к соединениям протестированных металлов подтверждена в 66,7% случаев непереносимости металлоконструкций. В группе сравнения все результаты кожного аппликационного тестирования с металлами были отрицательными.

Таким образом, опросник определения ГЧМ позволяет выявить пациентов, нуждающихся в дальнейшем провокационном аллertestировании. Аппликационные пробы с металлами наиболее эффективны в диагностике ГЧМ у пациентов с симптомами аллергического контактного дерматита (77%); сублингвально-оральное тестирование с оксидом титана одинаково эффективно в выявлении гиперчувствительности к титану как у пациентов с кожными, так и с системными признаками (75–79%). Предложенные методы провокационного аллertestирования позволяют выявить сенсибилизацию к металлам в 67% случаев у пациентов с симптомами непереносимости металлоконструкций. ■

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Metal Hypersensitivity and Contact Dermatitis in Orthopedic Hardware and Biocompatible Implants / A. Cetvetello [et al.] // *Dermis*. 2025. №5(3). P. 37.
2. Marwa K. Type IV Hypersensitivity Reaction / K. Marwa, N.P. Kondamudi // <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK562228>.
3. Badell J.S. Metal allergy and the use of custom implants in primary total ankle replacement / J.S. Badell, J.M. Cottom // *Foot & Ankle Surgery: Techniques, Reports & Cases*. 2023. №3(2). P. 100285.
4. Pacheco K.A. Contact Dermatitis From Biomedical Devices, Implants, and Metals-Trouble From Within / K.A. Pacheco, J.P. Thyssen // *The Journal of Allergy and Clinical Immunology*. 2024. №12(9). P. 2280–2295.
5. Tapscott D.C. Orthopedic Implant Materials / D.C. Tapscott, C. Wottowa // <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK560505>.
6. Biomedical titanium alloys with Young's moduli close to that of cortical bone / M. Niinomi [et al.] // *Regen Biomater*. 2016. №3(3). P. 173–185.
7. Huang C. The contribution of metal allergy to the failure of metal alloy implants, with special reference to titanium: Current knowledge and controversies / C. Huang, S.Y.V. Chiang, D.J. Gawkrödger // *Contact Dermatitis*. 2024. №90 (3). P. 201–210. Doi: 10.1111/cod.14481.
8. Van der Merwe J.M. Metal Hypersensitivity in Joint Arthroplasty / J.M. Van der Merwe // *Journal of the American Academy of Orthopaedic Surgeons: Global Research & Reviews*. 2021. №5 (3). P. e20.00200.
9. Richards L.J. Utility of Patch Testing and Lymphocyte Transformation Testing in the Evaluation of Metal Allergy in Patients with Orthopedic Implants / L.J. Richards, A. Streifel, J.M. Rodrigues // *Cureus*. 2019. №11 (9). P. e5761.
10. Poor Correlation Among Metal Hypersensitivity Testing Modalities and Inferior Patient-Reported Outcomes After Primary and Revision Total Knee Arthroplasties / D.N. Bracey [et al.] // *Arthroplast Today*. 2022. №18. P. 138–142.
11. Alontseva D. Biocompatibility and Corrosion of Microplasma-Sprayed Titanium and Tantalum Coatings versus Titanium Alloy / D. Alontseva [et al.] // *Coatings*. 2024. №14 (2). P. 206.
12. Аляхнович Н.С. Валидация опросника по выявлению риска гиперчувствительности к титану и его оксиду / Н.С. Аляхнович, Ихсас А. Мохамед // *Иммунопатология, аллергология, инфектология*. 2024. №(4). P. 99–105. DOI: 10.18621/iah.2024.4.11. EDN: QLXTNZ.
13. Аляхнович Н.С. Кожное аппликационное тестирование как инструмент диагностики аллергического контактного дерматита на металлы / Н.С. Аляхнович // *Иммунопатология, аллергология, инфектология*. 2026. №2. P. 15–22.
14. Аллергия к титану – от анамнеза до постановки диагноза / Н.С. Аляхнович [и др.] // *Медицинские новости*. 2026. №1. P. 55–59.
15. Аляхнович Н.С. Клиника и диагностика гиперчувствительности, вызванной титаном и его оксидом / Н.С. Аляхнович // *Рецепт*. 2022. №25 (6). С. 771–780.



Диагностика аллергии на компоненты вакцин



Ирина Щурок,

доцент кафедры клинической иммунологии и аллергологии с курсом ФПК и ПК Витебского государственного ордена Дружбы народов медицинского университета, заместитель председателя Федерации специалистов в иммунологии и аллергологии, кандидат медицинских наук, доцент



Оксана Ищенко,

заведующий кафедрой клинической иммунологии и аллергологии с курсом ФПК и ПК Витебского государственного ордена Дружбы народов медицинского университета, руководитель Центра передовых технологий в области иммунологии и аллергологии Всемирной организации аллергии ВГМУ, председатель Федерации специалистов в иммунологии и аллергологии, доктор медицинских наук, профессор

Вакцинация является важнейшим эффективным методом защиты от инфекционных заболеваний. Главная цель при этом – защита конкретного человека и формирование коллективного иммунитета [1].

Вакцины, как и другие лекарственные средства, могут вызывать различные побочные реакции, в том числе гиперчувствительности. При этом антигены препарата редко выступают причиной. Патологические состояния обычно ассоциируют со вспомогательными компонентами вакцин, такими как яичный белок, желатин, консерванты, адъюванты и др. [2]. Чаще всего регистрируются неиммунологические нетяжелые реакции гиперчувствительности, которые не воспроизводятся при повторном воздействии [3]. Тяжелые иммунологически опосредованные состояния после вакцинации, включая анафилаксию, встречаются редко. Риск ее развития оценивается в 1,3 на 1 млн доз вакцин [4]. Тем не менее практически все они могут вызвать системные аллергические реакции [5].

Согласно статистическим данным Всемирной организации здравоохранения, 1/3 населения земного шара страдает от разного рода аллергических заболеваний [6]. Существующие опасения развития нежелательных реакций при вакцинации у пациентов с отягощенным аллергоанамнезом создают барьер при проведении массовой прививочной кампании населения. Поэтому разработка и внедрение методов диагностики аллергии на компоненты вакцин – важная и приоритетная задача.

Исследование выполнено на группе пациентов в рамках антиковидной программы вакцинации на базе аллергологического отделения Витебской областной клинической больницы и кафедры клинической иммунологии и аллергологии с курсом ФПК и ПК учреждения образования «Витебский государственный ордена Дружбы народов медицинский университет». Для диагностики применены российская векторная вакцина Гам-КОВИД-Вак и китайская инактивированная вакцина Vero Cell (Веросел), а также вспомогательные компоненты вакцин – гидроксид алюминия, полисорбат 80 (Твин 80), полиэтиленгликоль 2000 (ПЭГ 2000).

Каждый из обследованных 44 человек (табл. 1) заполнил информированное согласие и аллергологический опросник с отметкой об отягощенной наследственности по аллергии, наличию различных негативных реакций в анамнезе, вакцинального статуса.

В исследуемую группу были включены пациенты ($n=25$), обратившиеся за медицинской помощью в течение первых 3 суток после введения антиковидных вакцин с жалобами на появление крапивницы, свиста в грудной клетке, чувства нехватки воздуха, головокружения, болей в животе, тошноты, рвоты, уплотнения и болезненности в месте укола; в контрольную – вакцинированные ($n=19$) без побочных реакций после инъекций. Группы были однородны по возрасту и полу. Из них у 6 (31,6%) пациентов был отягощен наследственный аллергоанамнез, без различий с исследуемой группой ($p=0,13$). В сравнении с ней число лиц с аллергическими заболеваниями в контроле было в 3 раза меньше: 5 (26%) против 19 (76%), $p=0,001$. Ранее все пациенты переносили вакцина-

цию по национальному календарю без побочных эффектов. У одного человека был эпизод анафилаксии при подготовке к колоноскопии препаратом Форджет.

В выборку не включали людей с острыми и хроническими заболеваниями в стадии декомпенсации, с психическими отклонениями и расстройствами поведения, обострением аллергии, принимающих иммунодепрес-

санты или кортикостероиды, беременных.

В течение 7 суток до исследования пациенты не принимали антигистаминные лекарственные средства II поколения, системные глюкокортикостероиды, антилейкотриеновые лекарственные средства; в течение 3 суток до теста – антигистаминные лекарственные средства I поколения.

Учитывая различный антигенный состав и механизм развития аллергических реакций, использовался метод аппликационного тестирования (замедленные реакции), а затем прик-тест (немедленные реакции) по отдельности с компонентами вакцин в разведении в соответствии с международными рекомендациями [6]: гидроксид алюминия 2%; полисорбат 80 20% w/v; полиэтиленгликоль 2000 50% w/v.

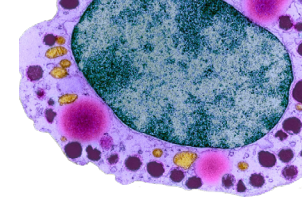
Для аппликационного тестирования 3 патч-пластины с диагностируемыми аллергенами (9 частей вазелина + 1 часть ланолина + компоненты вакцин) и отрицательный контроль (9 частей вазелина + 1 часть ланолина) фиксировали на коже передней поверхности предплечья или средней трети спины гипоаллергенным пластырем на 48 ч. Результаты оценивались дважды: через 48 и 96 ч. Тест считался положительным при наличии эритемы и отека в месте аппликации, в этом случае компонент исключался из дальнейших опытов для данного пациента. При получении отрицательных результатов проводили прик-тестирование с составляющими вакцин. Уколы стерильными одноразовыми прик-ланцетами делали под углом 90° на коже передней поверхности предплечья сквозь нанесенную каплю аллергена. Прик-тест с контрольными растворами (0,01%-ный

Показатель	Исследуемая группа ($n=25$)	Контрольная группа ($n=19$)
Возраст, лет	31,5 [27,9; 35,0]	27,2 [22,9; 33,5]
Пол, мужчины/женщины	12/13	9/10
Отягощенный наследственный аллергоанамнез	9	6
Бронхиальная астма	9	1
Аллергический ринит, конъюнктивит	5	2
Крапивница	4	2
Анафилактический шок	1	0

Таблица 1. Клинико-демографическая характеристика обследованных

№ пациента	Размер максимального диаметра волдыря/гиперемии, мм		
	Гидроксид алюминия	Полиэтиленгликоль 2000	Полисорбат 80
1	0/15	0/15	9/25
2	0/15	8/20	9/30
3	0/15	0/25	8/15
4	8/15	0/15	0/15
5	7/25	0/15	0/15
6	0/15	6/15	0/15
7	0/15	0/12	8/15

Таблица 2. Положительные результаты прик-тестирования с компонентами вакцин у обследованных пациентов



гистамин, тест-контрольная жидкость) выполняли аналогичным образом. Результат прик-теста анализировали через 15–20 мин. При отрицательном – производили оценку теста с испытуемыми аллергенами. Тест считали положительным при наличии волдыря на тестируемый аллерген диаметром ≥ 3 мм. При отсутствии реакции на вспомогательные компоненты осуществлялся провокационный прик-тест с нативной вакциной в разведении 1:1000, 1:100, 1:10. Если аллергологическое тестирование и в этом случае оказывалось отрицательным, а также при отсутствии иных противопоказаний при необходимости вакцинации пациенту вводили полную прививочную дозу.

Для обнаружения замедленного типа гиперчувствительности были проведены и оценены аппликационные тесты (патч-тесты) с компонентами вакцин (рис. 1). Результаты со всеми ними у 24 (96%) пациентов в исследуемой группе были отрицательные, положительный на гидроксид алюминия был зарегистрирован только у одного (4%) человека, который и клинически отмечал возникновение подкожных узелков в области плеча в течение недели после введения

инактивированной вакцины. Среди здоровых добровольцев положительных кожных патч-тестов с компонентами вакцин не было получено.

Результаты прик-теста с компонентами вакцин для выявления немедленных аллергических реакций были положительны у 7 (28%) пациентов исследуемой группы (табл. 2), в контрольной – все были отрицательные.

Положительные результаты кожного прик-тестирования с ТВИН 80 в исследуемой группе зарегистрированы у 4 (16%) человек, которые отмечали приступы удушья, бронхоспазма ($n=2$, пациенты с аллергической бронхиальной астмой) или крапивницы ($n=2$, с крапивницей) после введения вакцин.

У одного человека с бронхиальной астмой были зарегистрированы положительные результаты на прик-тесты одновременно к двум агентам – ТВИН 80 и ПЭГ 2000. В анамнезе он неоднократно выполнял эндоскопическое обследование толстого кишечника с применением препаратов, содержащих ПЭГ. Пациенту выданы рекомендации о противопоказании применения лекарств, содержащих полиэтиленгликоль и ТВИН 80.

У участника с анафилаксией в анамнезе после применения Форд-жет зафиксирован положительный прик-тест на ПЭГ 2000 (рис. 2).

Результаты кожного провокационного прик-тестирования с гидроксидом алюминия у 23 (92%) пациентов были отрицательные. У 2 (8%) отмечалась положительная на гидроксид алюминия (клинически наблюдалось образование подкожных узелков в месте введения вакцины, которые бесследно исчезли через 7 дней).

Оставшиеся 18 участников (72%) исследовательской группы и все из контрольной были тестированы нативными вакцинами, положительных реакций не было.

Пациенты с нежелательными реакциями для антиковидной вакцинации были протестированы с применением нативной вакцины в разведении 1:1000, 1:100, а затем 1:10, где не содержался компонент, с которым была отмечена положительная проба. Таким образом, без побочных эффектов вакцинировали 4 пациентов с отягощенным аллергоанамнезом на вакцины.

При помощи метода специфического кожного алерготестирования на компоненты вакцин установлена сенсibilизация к их компонентам у 8 из 25 пациентов, имеющих в анамнезе данные об аллергических реакциях на ранее введенные вакцины, что подтверждает необходимость интерпретации результатов и установку диагноза врачами аллергологами-иммунологами. Применение разработанного метода позволяет проводить диагностику патологических реакций на компоненты вакцин с целью персонализированного их подбора пациентам с отягощенным аллергоанамнезом, тем самым уменьшая риск развития тяжелых состояний. Наличие аллергических заболеваний



Рис. 1. Патч-тестирование с гидроксидом алюминия, ПЭГ 2000, ТВИН 80



Рис. 2. Положительный результат прик-теста на ПЭГ 2000

в прошлом не является противопоказанием для вакцинации, в том числе от COVID-19.

Аппликационный и прик-тест со вспомогательными компонентами вакцин – необходимые и доступные диагностические методы, повышающие приверженность населения к проведению вакцинации. Их внедрение в практическое здравоохранение осуществлено на основании инструкции по применению №022-0424 от 24.06.2024, утвержденной Министерством здравоохранения Республики Беларусь [7], работа выполнена при поддержке

Гранта Президента Республики Беларусь в сфере здравоохранения на 2024 г. [8]

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Охват иммунизацией // <https://www.who.int/ru/news-room/fact-sheets/detail/immunization-coverage>.
2. McNeil M.M. Vaccine-associated hypersensitivity / M.M. McNeil, F. DeStefano // J Allergy Clin Immunol. 2018. Vol. 141, №2. P. 463–472. Doi: 10.1016/j.jaci.2017.12.971.
3. Risk of anaphylaxis after vaccination of children and adolescents / K. Bohlke [et al.] // Pediatrics. 2003. №112(4). P. 815–820. Doi: 10.1542/peds.112.4.815.
4. Consensus document on the approach to children with allergic reactions after vaccination or allergy to vaccine components / L.A. Echeverria-Zudaire [et al.] // Allergol Immunopathol (Madr). 2015. Vol. 43, №3. P. 304–325. Doi: 10.1016/j.aller.2015.01.004.
5. Vaccines and allergy: back to the right places / V. Moschese [et al.] // Pediatric Allergy and Immunology. 2024. Vol. 35, №9. Art. e14236. Doi: 10.1111/pai.14236.
6. Вакцинация пациентов с аллергическими заболеваниями против новой коронавирусной инфекции COVID-19: позиционный документ Российской ассоциации аллергологов и клинических иммунологов / Н.И. Ильина [и др.] // Российский аллергологический журнал. 2021. Т. 18, №3. С. 93–97. Doi: 10.36691/RJA1479.
7. An EAACI position paper on the investigation of perioperative immediate hypersensitivity reactions / L.H. Garvey [et al.] // Allergy. 2019. Vol. 74, №10. P. 1872–1884. Doi: 10.1111/all.13820.
8. Метод диагностики аллергии на введение вакцин с использованием провокационного кожного тестирования: инструкция по применению №022-0424: утв. М-вом здравоохранения Респ. Беларусь 24.06.2024 / И.Н. Щурок [и др.]. – Витебск, 2024.

Дом без аллергии: мифы, факты и работающие меры



Дмитрий Тапальский,
директор Института
физиологии НАН
Беларуси, доктор
медицинских наук,
профессор



Елена Карпова,
заведующий центром
медицинской
микробиологии и
антибиотикорезистентности
Института физиологии
НАН Беларуси, кандидат
медицинских наук, доцент

В массовом представлении профилактика аллергии прочно связана с идеей идеально чистого дома: чем качественнее уборка и дороже климатическая техника, тем меньше риск развития симптомов. Но современные научные данные показывают более сложную картину: далеко не все меры действительно снижают воздействие аллергенов, а некоторые привычки могут, напротив, значительно ухудшать состояние здоровья. Современные исследования бытовой среды, домашней пыли, микроорганизмов и различных бытовых химических загрязнителей позволяют отделить реальные факторы риска от мифов. Рассмотрим изменения бытовой среды, способствующие результативному снижению экспозиции аллергенов у пациентов с аллергическими заболеваниями, а также меры без доказанной эффективности, создающие лишь субъективное ощущение контроля. Особое внимание при этом следует уделить аллергенам пылевых клещей и эпидермальным аллергенам домашних животных, плесневым грибам, бытовой пыли и средствам уборки, а также вопросам поиска оптимального баланса между гигиеной и безопасностью.



Пылевые клещи и домашняя пыль: что реально работает

Домашняя пыль остается одним из главных раздражителей для пациентов с аллергическим ринитом и астмой – прежде всего за счет пылевых клещей, которые концентрируются в матрасах, подушках, мягкой мебели и коврах, где поддерживаются подходящие для данных паукообразных условия влажности и температуры. Традиционные рекомендации включают регулярную влажную уборку, использование пылесосов с высокоэффективными фильтрами и сокращение количества текстильных материалов, способствующих накоплению аллергенов. Но данные современ-

ных клинических исследований показывают, что одиночные меры дают лишь ограниченный и кратковременный результат. Систематические обзоры и метаанализы подтверждают, что отдельные вмешательства, например акарициды или специальные чехлы для матрасов, снижают уровень клещевых аллергенов в пыли, но не



приводят к устойчивому улучшению состояния пациентов с астмой или аллергическим ринитом, в то время как комплексные подходы, сочетающие тщательную уборку, фильтрацию воздуха и снижение влажности в помещении, оказываются более эффективными для уменьшения количества обострений и улучшения качества жизни [1, 2] (табл. 1).

Рандомизированные изучения пылесосов с HEPA- и микрофильтрами подтверждают снижение концентрации клещевых аллергенов в коврах и на полу, однако сами по себе такие устройства не заменяют полноценный комплекс мер по контролю домашней среды. Например, в одном из опытов применение воздухоочистителя

Мера	Основной эффект	Выводы современных обзоров
Чехлы-барьеры для матрасов и подушек	Снижение содержания клещевых аллергенов в постели	Уменьшают экспозицию аллергена; клинический эффект выражен умеренно и требует сочетания с другими вмешательствами
Пылесосы с HEPA-фильтром	Снижение количества аллергенов в коврах и на полу	Эффективны как часть комплексной программы; сами по себе редко приводят к выраженному клиническому улучшению
Влажная уборка и сокращение использования текстильных материалов, накапливающих пыль	Снижение общей нагрузки домашней пыли	Рекомендуются как базовые меры; эффект зависит от регулярности и сочетания с контролем влажности
Применение акарицидов	Кратковременное снижение концентрации клещевых аллергенов	Может быть полезно только в отдельных случаях, не рассматривается как самостоятельное долговременное решение

Таблица 1. Бытовые меры против пылевых клещей и их доказательная база

с HEPA-фильтром не сопровождалось значимым уменьшением дыхательных симптомов у пациентов с аллергией на клещей, если параллельно не проводились и другие меры по ограничению контакта с ними. Важно понимать, что клещевые аллергены становятся аэрозольными лишь на короткое время после механического воздействия и не находятся постоянно во взвешенном состоянии в воздушной среде. Поэтому при выборе техники имеет смысл ориентироваться не только на наличие HEPA-фильтра, но и на удобство уборки, возможность обработки ковров и мягкой мебели и сочетание с другими мерами снижения концентрации бытовых аллергенов [3, 4].

Домашние животные: баланс между риском и защитой

Аллергию на кошек и собак нередко ошибочно связывают с их шерстью, однако ключевую роль здесь играют белки слюны, кожных выделений и мочи животных, оседающие на поверхностях и в пыли. Для уже сенсibilизированных пациентов контакт с домашними животными может длительно поддерживать

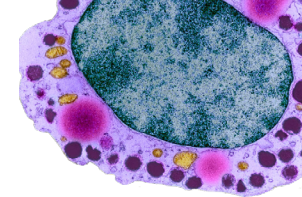
хроническое воспаление и провоцировать симптомы аллергического ринита и астмы, поэтому в ряде случаев врачи рекомендуют ограничить пребывание питомца в спальне или полностью исключить совместное с ним проживание.

Однако картина не так однозначна, как кажется на первый взгляд. Современные наблюдательные когортные исследования показывают, что ранний контакт с кошками и собаками, особенно на первом году жизни, у значительной части детей связан не с ростом, а с меньшей вероятностью последующей сенсibilизации и негативных проявлений. Иными словами, раннее соседство с домашними животными может работать как своеобразная тренировка для иммунной системы.

В рамках обновленной гигиенической гипотезы считается, что такой опыт помогает иммунному ответу формироваться более сбалансированно. Но здесь важно не подменять профилактикой лечение: эти данные не означают, что питомец безопасен для уже сенсibilизированного ребенка или взрослого. Если аллергия на животное подтверждена клинически, постоянный контакт с ним будет поддерживать воспаление и симптомы заболевания [5].

Практические рекомендации для пациентов строятся не по универсальной схеме, а с учетом клинического контекста. Учитывается степень сенсibilизации, выраженность симптомов и сопутствующих недугов. Если расстаться с животным невозможно, обычно обсуждают меры, которые реально могут снизить аллергенную нагрузку, например ограничение доступа в спальню, регулярное купание питомца, использование воздухоочистителей и более тщательную уборку. При этом важно понимать, что такие меры уменьшают экспозицию раздражителей, но не устраняют ее полностью, особенно если четвероногий друг постоянно живет в доме и свободно перемещается по нему. Наиболее разумный подход включает сочетание медицинской оценки и действенных мер контроля домашней





среды, а не ожидание, что антиаллергенный фильтр или покрытие решат проблему [6].

Плесень, влажность и вентиляция: почему сухой дом важнее, чем стерильный

Избыточная влажность и плесень в жилище устойчиво связаны с повышенным риском респираторных симптомов, бронхиальной астмы и аллергических заболеваний у детей и взрослых. В Глобальных рекомендациях ВОЗ по качеству воздуха подчеркивается, что постоянная сырость, конденсат на стенах и окнах, видимый рост плесени и характерный запах – это не только эстетическая проблема, но и фактор риска для здоровья. При этом ключевым элементом профилактики считается не косметическая борьба с пятнами, а устране-

ние источников влаги (протечки, нарушения теплоизоляции, неэффективная вентиляция, ошибки эксплуатации помещений).

Исследования показывают, что ликвидация причин сырости и ремонт помещений, поврежденных влагой, могут снижать частоту симптомов и обострений астмы. Приоритет следует отдавать поддержанию сухой, хорошо вентилируемой среды и своевременному устранению избыточной влажности, а не частой и агрессивной химической дезинфекции поверхностей. Такой подход особенно важен, если в доме имеются видимые признаки сырости или плесневого поражения [7, 8].

Попытки бороться с плесенью только за счет бытовых фунгицидов и отбеливателей без устранения сырости дают лишь кратковременный косметический эффект и не снижают риск возобновления ее роста. Более рациональная стратегия включает инженерные меры: улучшение теплоизоляции стен, устранение «холодных мостиков», модернизацию вентиляции, периодическое проветривание и разумное применение увлажнителей. В санузлах и кухне особое значение имеет быстрое удаление конденсата после душа или при-

готовления пищи, а также поддержание исправности вытяжек. Для людей с аллергией и астмой важно рассматривать плесень как важный маркер проблем с влажностью, которые требуют системного решения. Такой подход лучше согласуется с выводами международных экспертных групп и уменьшает заболеваемость, связанную с неблагоприятным микроклиматом жилища [9].

Чистящие средства и «идеальная чистота»: скрытые риски

Интуитивно кажется, что чем регулярнее и тщательнее проводится уборка и дезинфекция, тем меньше вероятность появления заболевания. Однако исследования последних лет это опровергают. Злоупотребление аэрозольными чистящими средствами, дезинфектантами и ароматизаторами сопровождается повышением концентрации летучих органических соединений и мелких частиц в воздухе. Наблюдения и систематические обзоры связывают постоянное наличие химических средств в арсенале для домашней уборки с возникновением астмы и хронического раздражения дыхательных путей, особенно у детей. При этом риск аллергической сенсибилизации не всегда возрастает, что указывает на роль раздражающего, а не классически аллергического

Аллергенный фактор	Источник в жилище	Рекомендуемый подход
Пылевые клещи	Матрасы, подушки, ковры, мягкая мебель	Комплексная программа: барьерные чехлы, пылесос с фильтром, влажная уборка, контроль влажности
Аллергены кошек и собак	Шерсть, эпидермис, слюна, оседающие в пыли	Индивидуальная оценка риска; при симптомах – ограничение доступа животного, усиленная уборка, обсуждение возможности отказа
Плесень и грибки	Влажные углы, санузлы, кухни, плохо проветриваемые помещения	Поиск и устранение источника влаги, ремонт, улучшение вентиляции, отказ от косметических «маскирующих» решений
Химические загрязнители от чистящих средств	Аэрозоли, очищающие спреи, ароматизированные дезинфектанты	Снижение частоты и объема применения, выбор менее летучих форм, хорошая вентиляция при уборке

Таблица 2. Основные источники аллергенов в жилище и подходы к их контролю



механизма. Доказано, что уровень субъективно воспринимаемой чистоты жилья не является прямым предиктором развития недуга. Более значимым становится состав микробного сообщества пыли и контакты с разнообразными микроорганизмами [10, 11].

Современный пересмотр гигиенической концепции предлагает разделять целенаправленную профилактику инфекций (гигиена рук, обработка критических поверхностей) и постоянную тотальную дезинфекцию воздуха и предметов быта. Для семей с аллергическими заболеваниями разумнее сосредоточиться на регулярной, но не чрезмерной уборке с использованием наименее агрессивных средств и на адекватной вентиляции помещений во время и после применения химсредств. Выбор продукции без избыточных ароматизаторов, отказ от аэрозольных форм, ограничение дезинфектантов и освежителей воздуха помогут снизить химическую нагрузку на дыхательные пути [12].

Важно понимать, что идеальная чистота в представлении рекламы не гарантирует снижения риска аллергии и может сопровождаться увеличением экспозиции раздражающих веществ. Гораздо рациональнее стремиться к «умной» чистоте: выверенному режиму ухода за домом, который учитывает как микробиологические, так и химические аспекты (табл. 2).

Баланс между профилактикой и мифами

Отдельные меры по контролю бытовой среды редко дают выраженный и устойчивый клинический эффект. Гораздо более убедительные результаты обычно демонстрируют комплексные

программы, сочетающие работу с несколькими аллергенами, улучшение вентиляции, контроль влажности и постепенную корректировку бытовых привычек. При этом выбор стратегии должен быть индивидуальным, в зависимости от профиля сенсibilизации, тяжести заболевания, возраста пациента и реальных возможностей семьи. Популярны мифы о том, что стерильный дом полностью защищает от аллергии, плохо согласуются с данными исследований о роли микробного окружения и химических загрязнителей. Формирование домашней тактики поведения для человека с гиперчувствительностью должно опираться на консультирование с врачом, понимание ключевых триггеров в конкретном жилище и готовность к последовательным и комплексным изменениям с доказанной эффективностью.

Важным практическим выводом здесь становится идея разумной заботы: дом должен быть достаточно чистым, хорошо проветриваемым и не сырым, а меры контроля – продуманными, но не чрезмерными. Это предполагает систематическую, но не навязчивую уборку, контроль влажности, внимательное отношение к плесени и источникам запаха, а также критическую оценку маркетинговых обещаний антиаллергенных средств. Не менее важно обсуждать возможность присутствия домашних животных с учетом реального состояния здоровья, а не только с точки зрения эмоциональной привязанности.

Дом без аллергии в современном понимании – это не стерильный лабораторный бокс, а среда, где разумно управляют факторами риска и в которой человек с сенсibilизацией может жить полноценной жизнью. ■

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Zuiani C. Update on house dust mite allergen avoidance measures for asthma / C. Zuiani, A. Custovic // Current Allergy and Asthma Reports. 2020. №20 (9). P. 50.
2. House dust mite allergen avoidance strategies for the treatment of allergic asthma: A hypothesis-generating meta-analysis / F.E. van Boven [et al.] // World Allergy Organization Journal. 2024. №17 (6). P. 100919.
3. Sobczak M. Are there effective methods to reduce exposure to house dust mite allergens? A meta-analysis of randomized clinical trials / M. Sobczak, K. Kowal, R. Pawliczak // International Forum of Allergy & Rhinology. 2025. №15 (8). P. 792–802.
4. A double-blind study of the effectiveness of a high-efficiency particulate air (HEPA) filter in the treatment of patients with perennial allergic rhinitis and asthma / R.E. Reisman [et al.] // Journal of Allergy and Clinical Immunology. 1990. №85 (6). P. 1050–1057.
5. The primary prevention of atopy: does early exposure to cats and dogs prevent the development of allergy and asthma in children? A Comprehensive Analysis of the Literature / C. Indolfi [et al.] // Life. 2023. №13 (9). P. 1859.
6. Ahluwalia S.K. Indoor Environmental Interventions for Furry Pet Allergens, Pest Allergens, and Mold: Looking to the Future / S.K. Ahluwalia, E.C. Matsui // The Journal of Allergy and Clinical Immunology: In Practice. 2018. №6 (1). P. 9–19.
7. Remediating buildings damaged by dampness and mould for preventing or reducing respiratory tract symptoms, infections and asthma / R. Sauni [et al.] // The Cochrane Database of Systematic Reviews. 2015. №2015 (2). P. CD007897.
8. Housing interventions and control of asthma-related indoor biologic agents: a review of the evidence / J. Krieger [et al.] // Journal of Public Health Management and Practice. 2010. №16 (5 Suppl). P. S11–S20.
9. Fisk W.J. Meta-analyses of the associations of respiratory health effects with dampness and mold in homes / W.J. Fisk, Q. Lei-Gomez, M.J. Mendell // Indoor Air. 2007. №17 (4). P. 284–296.
10. Pacheco Da Silva E. Effects of household cleaning products on the lungs: an update / E. Pacheco Da Silva, O. Dumas, N. Le Moual // Expert Review of Respiratory Medicine. 2025. №19 (4). P. 313–324.
11. Arif M.I. Household cleaning agents impact on pediatric asthma: a systematic review and meta-analysis / M.I. Arif, Z.Y. Wang, L. Ru // International Journal of Environmental Health Research. 2025. №35 (10). P. 3018–3030.
12. Cleaning products: Their chemistry, effects on indoor air quality, and implications for human health / H. Salonen [et al.] // Environment International. 2024. №190. P. 108836.

Аннотация. Рассматривается концепция промышленных инновационных экосистем (ПИЭ) как наиболее сложная и перспективная форма организации инновационной и производственной деятельности в условиях Индустрии 5.0 и 6.0. Проведен сравнительный анализ инновационных кластеров, сетей и экосистем в контексте промышленного развития, а также сделаны выводы об их взаимосвязях и развитии. Исследование опирается на модель пятизвенной спирали инноваций с интеграцией искусственного интеллекта, принципы и особенности промышленного симбиоза, что позволяет охарактеризовать современные условия и факторы для формирования ПИЭ. По результатам проведенного анализа отдельных лучших зарубежных практик (Дания, Китай, Япония, Финляндия) определены ключевые подходы к построению ПИЭ и перспективы их применения в Республике Беларусь. Отмечается, что экосистемный подход к реализации промышленной политики способен обеспечить большую гибкость, устойчивость и конкурентоспособность организаций.

Ключевые слова:

промышленные инновационные экосистемы, промышленный симбиоз, инновационные кластеры, инновационные сети, цифровая трансформация, пятизвенная спираль инноваций, экосистемный подход, экосистемные взаимодействия.

Для цитирования: Жуковская О. Промышленные инновационные экосистемы: концепция, модели формирования и потенциал развития // Наука и инновации. 2026. №9. С. 29–35.

<https://doi.org/10.29235/1818-9857-2026-09-29-35>

Промышленные инновационные экосистемы:

концепция, модели формирования и потенциал развития

УДК 338.45:004++316.42+330.342

Ольга Жуковская,
заведующий кафедрой социально-
трудовых отношений Белорусского
государственного университета,
кандидат экономических наук, доцент;
oyzhukovskaya@gmail.com



В настоящее время происходит все большее усложнение и ускорение социально-экономических процессов, что проявляется в объединении технологий, социума и окружающей среды, а также в увеличении числа факторов, оказывающих влияние на инновационное и промышленное развитие в целом. Так, в сфере производства произошел переход от техноцентрической Индустрии 4.0, связанной с автономными киберфизическими системами (CPS), цифровизацией, умным производством и Интернетом вещей, к человекоцентрической Индустрии 5.0, реализующейся в сетях, кластерах и, главным образом, инновационных экосистемах различной специфики. Ориентированность на человека «имеет целью вернуть интересы людей в производственный процесс» [1], а среди основных технологий выделяются: коллаборативные роботы (коботы); умные датчики; цифровые двойники; Интернет всего (IoE) и искусственный интеллект вещей (AIoT); блокчейн; граничные и туманные вычисления (Edge and Fog Computing); когнитивные вычисления; 6G; дополненная реальность (AR), смешанная реальность (MR) и голография [1]. Становятся все более значимыми и технологии искусственного интеллекта (ИИ), которые в парадигме Индустрии 6.0 уже пронизывают практически все сферы.

Таким образом, создаваемая среда все более усложняется, что может быть описано «пятизвенной спиралью инноваций плюс ИИ» [2], включающей не только сферу науки и образования (генерации знаний), органы государственной власти и управления, бизнес-сообщество, социум и природную среду, но также ИИ как ключевую технологию и основной акселератор инновационных процессов [2]. Стремление к преобразованию промышленных систем в промышленные экосистемы, имитируя биологические экосистемы посредством замкнутого цикла мышления, включая обмен материалами и каскадное распределение энергии [3, 4], является важной тенденцией современного развития. Интернет вещей, данные и аналитика (в целом, технологии Индустрии 4.0) обеспечивают эффективность материальных потоков и промышленного симбиоза в контексте циркулярной экономики. В то же время Индустрия 5.0 добавляет социальное измерение, а технологии Индустрии 6.0 еще больше расширяют возможности концепции промышленных экосистем.

Экосистемная парадигма характеризуется преодолением барьеров инновационного развития [5] на основе новых организационно-экономических моделей в различных областях; при этом устойчивость промышленных экосистем рассматривается через призму рационального симбиоза участников – государства, бизнеса, науки и общества [6], а также природной среды, то есть, по существу, модели пятикратной спирали инноваций. Ключевыми инструментами данного комплексного подхода можно

назвать цифровизацию, государственное регулирование, инновационные сети и адаптивные бизнес-модели, которые позволяют минимизировать внешние угрозы и обеспечить устойчивое развитие отрасли [6]. Основным механизмом его реализации становится цифровая трансформация.

Экосистемное взаимодействие снижает технологические и экономические, а также инновационные риски, повышая устойчивость промышленности к кризисным явлениям, способствуя формированию единого цифрового пространства; при этом самоорганизация и симбиотические отношения между участниками могут увеличивать сопротивляемость внешним изменениям [6, 7].

Итак, промышленные экосистемы реализуются через модель деятельности, при которой предприятия, рассматриваемые подобно совокупности организмов в природной экосистеме, обмениваются ресурсами с целью создания циклической среды, где «отходы» одного производства становятся «сырьем» для другого [8]; в основе лежит промышленный симбиоз, характеризующийся устойчивостью, циркулярностью, системностью и экоэффективностью. При этом все больше таких структур концентрируется не только на материальных потоках, но и новых продуктах, процессах, подходах, механизмах и технологиях, что содействует росту их инновационности.

Промышленный симбиоз особенно важен для стран, не имеющих большого количества собственных ресурсов, а также малых экономик. Например, в Финляндии существует система Finnish Industrial Symbiosis System (FISS) [9], которая содействует появлению новых возможностей бизнеса,

а также позволяет повторно использовать отходы и сократить расходы природных ресурсов.

Промышленные инновационные экосистемы, таким образом, представляют собой сообщество различных организаций, объединенных на основе синтеза экосистемных взаимодействий, современных подходов к технологическому и инновационному развитию, а также организации промышленной деятельности.

К основным преимуществам ПИЭ можно отнести: рост эффективности использования ресурсов, человеческого и социального капитала, «наличие синергетического эффекта, более высокие производительность и темпы экономического роста, достижение целей устойчивого развития, повышение инвестиционной и инновационной активности» [10], что создает потенциал для увеличения инновационности; при этом проблемными аспектами могут стать оппортунистическое поведение участников, значительная дифференциация в ресурсном обеспечении, целях и принципах принятия решений, стремление к установлению иерархических связей [10], сложность координации и построения.

В целом ПИЭ, наряду с сетевыми взаимодействиями и кластерами в промышленности, являются усложненной организационно-экономической формой деятельности, обеспечивающей рост инновационных показателей (табл. 1).

Инновационные сети представляют собой гибкий и адаптивный механизм коллаборации, ориентированный на достижение целей проекта и рост сотрудничества в конкретной области. Н.В. Смородинская рассматривала экосистемный подход в тесной взаимосвязи с кластерным и сетевым, отмечая,

что «кластерно-сетевые структуры – гораздо более гибкие, чем модель иерархии, и одновременно более интегрированные, чем модель рынка» [13].

Инновационные кластеры – достаточно устойчивые формализованные структуры, основанные главным образом на географической концентрации и отраслевой специализации, что, однако, может ограничивать их способность быстро адаптироваться к технологическим изменениям. В этой связи экосистем-

ный подход представляет собой наиболее сложную, масштабную и комплексную форму организации инновационной деятельности, способную к созданию большей ценности на основе междисциплинарных взаимосвязей.

Кластеры могут являться основой для инновационных экосистем, механизмом формирования которых в таком случае становятся открытые и совместно используемые онлайн-платформы, построенные на основе цифровой инфраструктуры, позволя-

ющей всем заинтересованным сторонам – государственным учреждениям, гражданам, частному сектору, неправительственным организациям и научным учреждениям – подключаться и взаимодействовать в режиме реального времени [12, 14].

Таким образом, сети и кластеры – это особые пространства с более высокой инновационной интенсивностью вследствие лучших возможностей, роста числа транзакций и доступных ресурсов, а также инновационной среды.

Критерий сравнения	Сети	Кластеры	Экосистемы
Цели	Прикладной характер задач: разработка новых продуктов, обмен знаниями и технологиями, снижение издержек, доступ к благам и др.	Рост конкурентоспособности (за счет синергии), стимулирование реализации инновационного развития на мезоуровне, привлечение ресурсов и инвестиций в регионы	Достижение единой миссии участников, решение сложных масштабных, повторяющихся задач
Динамичность, гибкость, открытость	Высокая динамичность и гибкость, открытость в рамках реализации конкретного проекта	Низкие возможности для маневренности, ограниченная гибкость, динамичность и открытость	Максимальные динамичность, гибкость и открытость
Функции	Координация совместных проектов, обмен неявными и кодифицированными знаниями, создание благоприятных условий для участников	Координация, кооперация, создание специализированной инфраструктуры и платформ, продвижение общих интересов	Формирование устойчивой среды для непрерывного инновационного развития
Территория	Нет четкой территории, внегеографический характер взаимодействий	Локализация, географическая привязка (регион, город и др.)	Трансграничный характер, могут реализовываться как в физическом, так и виртуальном пространстве
Среда	Целевая, достаточно открытая, доверительная	Конкурентная, достаточно открытая, доверительная, основанная на общих интересах и длительных взаимодействиях	Открытая, конкурентная, доверительная, предпринимательская, основанная на создании нового и объединении различных подходов
Инновации	Фокус на решении конкретных общих задач – следовательно, инкрементальные инновации	Особое значение придается не только совместным продуктовым, но и процессным, организационным инновациям	Системные, продуктовые, процессные, организационные, радикальные инновации; новые бизнес-модели; мультиотраслевые инновации и междисциплинарные решения
Организационная структура	Горизонтальная, гибкая, проектно-ориентированная, носит адаптационный характер	Высокая степень формализации и устойчивости, иерархичность: наличие координирующего органа (управляющая компания, кластерная ассоциация), распределение ролей, разработанные механизмы принятия решений	Оркестраторы, партнеры, участники; высокая степень адаптивности и способности к развитию
Участники	Широкий круг участников (компании, эксперты, представители правительственных организаций и др.), обладающих необходимыми компетенциями, ресурсами или знаниями для достижения цели функционирования сети	Координационный совет, кластерная ассоциация, фирмы одной или смежных отраслей, местные органы власти, инвесторы, финансовые институты и др.	Широкий и способный к изменениям круг участников: потребители, университеты, венчурные фонды, инфраструктурные организации и др.; могут заниматься неродственными видами экономической деятельности
Самоорганизация, саморегуляция, особенности взаимодействия	Высокий уровень самоорганизации, временный, неформальный проектно-ориентированный характер взаимодействий, договорные отношения, взаимный контроль	Умеренный уровень самоорганизации, стабильный формализованный, основанный на географической близости характер взаимодействий	Максимальный уровень самоорганизации, рыночные механизмы, социальные нормы, репутация, нелинейный и многомерный характер взаимодействий
Модель	Формирование «снизу», децентрализация	Формирование «сверху» или «снизу», координирующий орган	Многоуровневый, циркулярный, глобальный и межотраслевой характер; формируются платформы для совместного взаимодействия

Таблица 1. Сравнение инновационных сетей, кластеров и экосистем в контексте промышленного развития

Источник: разработано автором по [1, 11, 12]

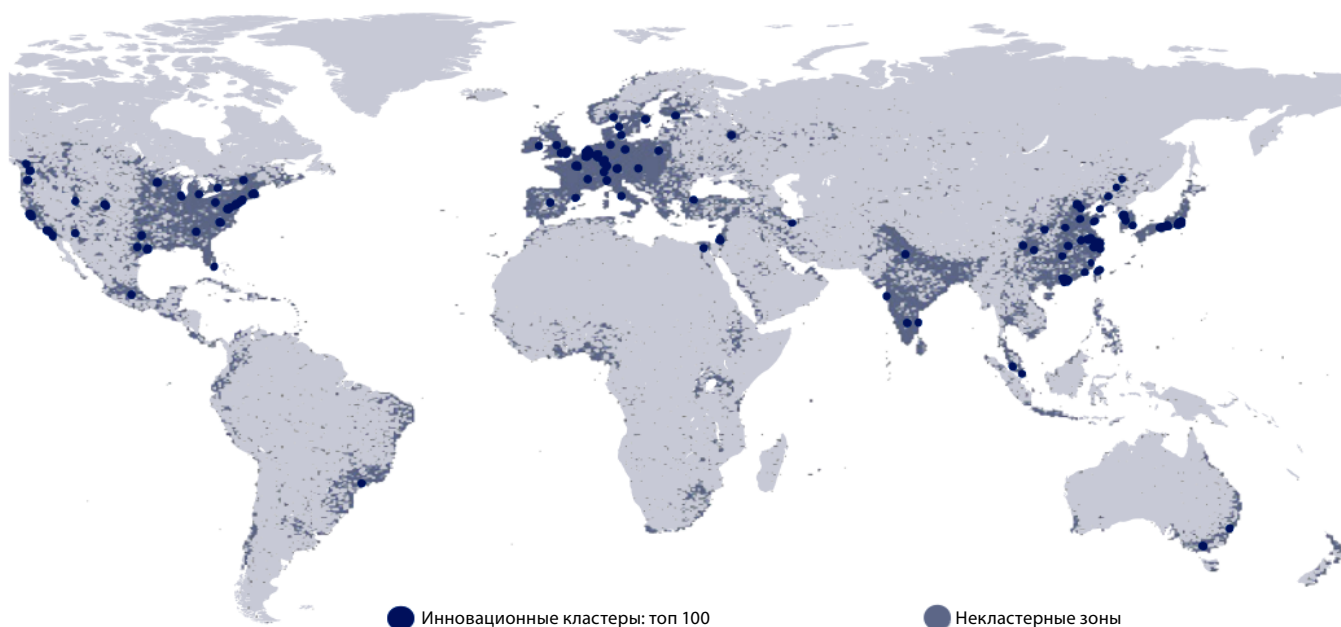


Рис. 1. Географическое распределение инновационных кластеров. Источник: [15]

Указанные условия более благоприятны для компаний, формирующих экосистемы: зачастую они «точечно вырастают» на базе кластеров. В этой связи оценить общие условия и потенциал для организации и функционирования ПИЭ можно на основе данных о развитии кластеров в разных странах.

Прежде всего отметим, что процессы кластеризации происходят крайне неравномерно (рис. 1): особое значение имеют демографические, природно-географические факторы, наличие транспортной и информационно-коммуникационной инфраструктуры и др. Общая ситуация отображена в рейтинге «100 лучших кластеров Глобального индекса инноваций» за 2025 г., рассчитываемого на основе трех основных показателей (патентные заявки, опубликованные научные статьи и сделки с участием венчурного капитала [15]), что выявляет области, где наблюдается высокая концентрация изобретателей, исследователей

и/или венчурной деятельности. Таким образом, предпосылки для возникновения инновационных экосистем часто выходят за пределы административных границ, охватывая мегаполисы, межрегиональные сети и трансграничные коридоры. При этом 100 ведущих инновационных кластеров генерируют в совокупности примерно 70% глобальных патентных заявок и сделок венчурного капитала, а также обеспечивают около половины всех научных публикаций в мире; на счету 10 наиболее успешных кластеров около 40% международных патентных заявок, 35% сделок с участием венчурного капитала и более 15% глобального объема научных публикаций [15] (табл. 2).

Отметим, что лидеры имеют в своем составе и лучшие научно-исследовательские учреждения, университеты, а также пользуются государственной поддержкой. Можно сделать вывод, что модель тройной спирали инноваций лежит в основе успешности кластеров, тем не менее, в современ-

ных условиях для формирования экосистем нужен более широкий набор условий, охватывающий не только расширенную модель пятикратной спирали инноваций (дополненную социальной и природной средой), но и потенциал общей сетевой активности и инновационного развития, а также новейшие технологии (главным образом ИИ).

В то время как более традиционный подход сосредоточивается на инкрементальных (улучшающих) инновациях, многие современные вызовы требуют иной формы – инноваций, изменяющих системы, а не просто их компоненты, – то есть системных инноваций. Так, по мере перехода от индустриальных подходов к цифровой трансформации все чаще возникает необходимость изменений организационно-экономических отношений на основе экосистемных принципов.

Инновации системного типа в промышленности реализуются, например, в формировании осо-

бой модели организации деятельности, основанной, прежде всего, на циркулярности, экоэффективности и системности. Предприятия обмениваются ресурсами, снижая нагрузку на окружающую среду и свои издержки, могут демонстрировать лучшие результаты от совместной работы, а широкий круг участников (потребители, органы власти и управления и др.) получает значимые преимущества. Такие экосистемы носят относительно замкнутый, безотходный характер, максимально приближаясь к природным циклам, где отходы или избыточные мощности одного производства становятся сырьем для другого.

Один из самых известных примеров в данной сфере – симбиоз Калуннборг [16] в Дании, где частные и государственные компании взаимодействуют при обмене ресурсами, повышая при этом инновационность членов сообщества. Среди ключевых его участ-

ников – электростанция (Ørsted), нефтеперерабатывающий завод (Statoil/Equinor), фармацевтические и биотехнологические компании (Novo Nordisk, Novozymes/Novonesis), производитель гипсокартона (Saint-Gobain Gyproc), городская администрация, фермеры (рис. 2).

Данная модель представляет собой естественное эволюционное формирование ПИЭ «снизу вверх», начатое еще в 1960-х гг. В результате преимущества получают не только непосредственные участники экосистемы (путем, например, снижения затрат на сырье и утилизацию, продажи новых продуктов, повышения устойчивости), но и регион в целом (появление новых рабочих мест, сокращение отходов, укрепление государственно-частного партнерства и др.).

Среди ПИЭ, созданных «сверху», по инициативе органов государственного управления, выделяется Националь-

ный пилотный промышленный парк циркулярной экономики в Гуйюе (КНР), специализирующийся на переработке электронных отходов, что особенно важно, поскольку Китай является крупнейшим в мире их генератором: к 2040 г. прогнозируется их рост до 28 млрд т (в сравнении с 14 млрд т в 2020 г.) [17, 18]. Собирая этот тип отходов со всего мира, извлекая из них ценные материалы (золото, серебро, медь, палладий, редкоземельные металлы, пластик, стекло) и поставляя обратно для выпуска новой электроники, город Гуйю, ранее считавшийся одной из самых загрязненных точек на планете, превращается в высокотехнологичный хаб с замкнутым циклом промышленного производства.

Существует и комбинированная модель ПИЭ – государственно-частное партнерство – проект японского экологического города Кавасаки [19]. Данная ПИЭ

Позиция	Название кластера	Страна	Ведущий участник / патентный заявитель	Ведущая научная организация	Доля в глобальном объеме публикаций, %	Доля в глобальном объеме патентных заявок, %	Доля венчурных сделок в глобальном масштабе, %
1	Шэньчжэнь – Гонконг – Гуанчжоу	КНР	Huawei	Университет Сунь Ятсена	2,4	9,0	2,9
2	Токио – Йокогама	Япония	Mitsubishi Electric	Токийский университет	1,4	10,3	2,2
3	Сан-Хосе – Сан-Франциско	США	Google	Стэнфордский университет	0,7	3,9	6,9
4	Пекин	КНР	BOE Technology	Университет Цинхуа	4,0	3,8	2,9
5	Сеул	Республика Корея	Samsung Electronics	Сеульский национальный университет	1,7	5,4	3,1
6	Шанхай – Сучжоу	КНР	Университет Сучжоу	Шанхайский университет Цзяотун	2,5	3,3	3,7
7	Нью-Йорк	США	IBM	Колумбийский университет	0,9	1,0	4,8
8	Лондон	Соединенное Королевство	Nicoventures Trading	Университетский колледж Лондона	0,7	0,5	4,4
9	Бостон – Кембридж	США	Массачусетский технологический институт (MIT)	Гарвардская медицинская школа	0,9	1,5	2,0
10	Лос-Анджелес	США	SNAP	Калифорнийский университет в Лос-Анджелесе	0,5	0,9	2,5

Таблица 2. Основные характеристики 10 ведущих инновационных кластеров мира. Источник: составлено автором по [15]

(формируется с 1980-х гг.), включающая производителей стали и солнечных панелей, цементные заводы, переработчиков пластика, исследовательские центры и других заинтересованных участников (правительственные организации, компании), позволила создать экологически развитый и высокотехнологичный город.

В современных условиях особое значение имеет улучшение взаимодействия субъектов в режиме реального времени с применением цифровых технологий. Пример проекта, для управления которым используется цифровая платформа, – финский промышленный симбиоз FISS, запущенный инновационным фондом Sitra [20]. В целях реализации такого подхода, например, создана платформа Materiaalitori.fi для профессионального обмена

побочными продуктами различных компаний. Участники вносят данные о своих ресурсных потоках (отходах, побочных продуктах, избыточной энергии и др.) в общую онлайн-систему. Данные анализируются и автоматически находятся наилучшие совпадения между поставщиком отходов и их потребителем с учетом логистической и экономической целесообразности. Повышение прозрачности, скорости и эффективности поиска новых возможностей делает всю систему гибкой и динамичной.

Итак, идеальной модели экосистемы для всех не существует – успех зависит от доступных ресурсов, особенностей законодательства, отраслей, готовности компаний, а также заинтересованных сторон к сотрудничеству. Тем не менее приведенные примеры демонстрируют, что

этот подход может работать в разных культурах и масштабах – от спонтанного симбиоза в Дании до государственных инициатив в Китае и Японии, а также цифровых решений в Финляндии.

В Республике Беларусь как стране с малой открытой экономикой целесообразно дальнейшее углубление и развитие промышленности с учетом экосистемного подхода; при этом можно выбрать модель «сверху вниз» в силу недостаточной развитости механизмов самоорганизации субъектов, а также с учетом культурно-исторических особенностей.

Экосистемные взаимодействия могут стать основой новой промышленной политики, обеспечивая при этом гибкость, устойчивость и конкурентоспособность участников. Однако формирование ПИЭ в любой отрасли требует комплексного

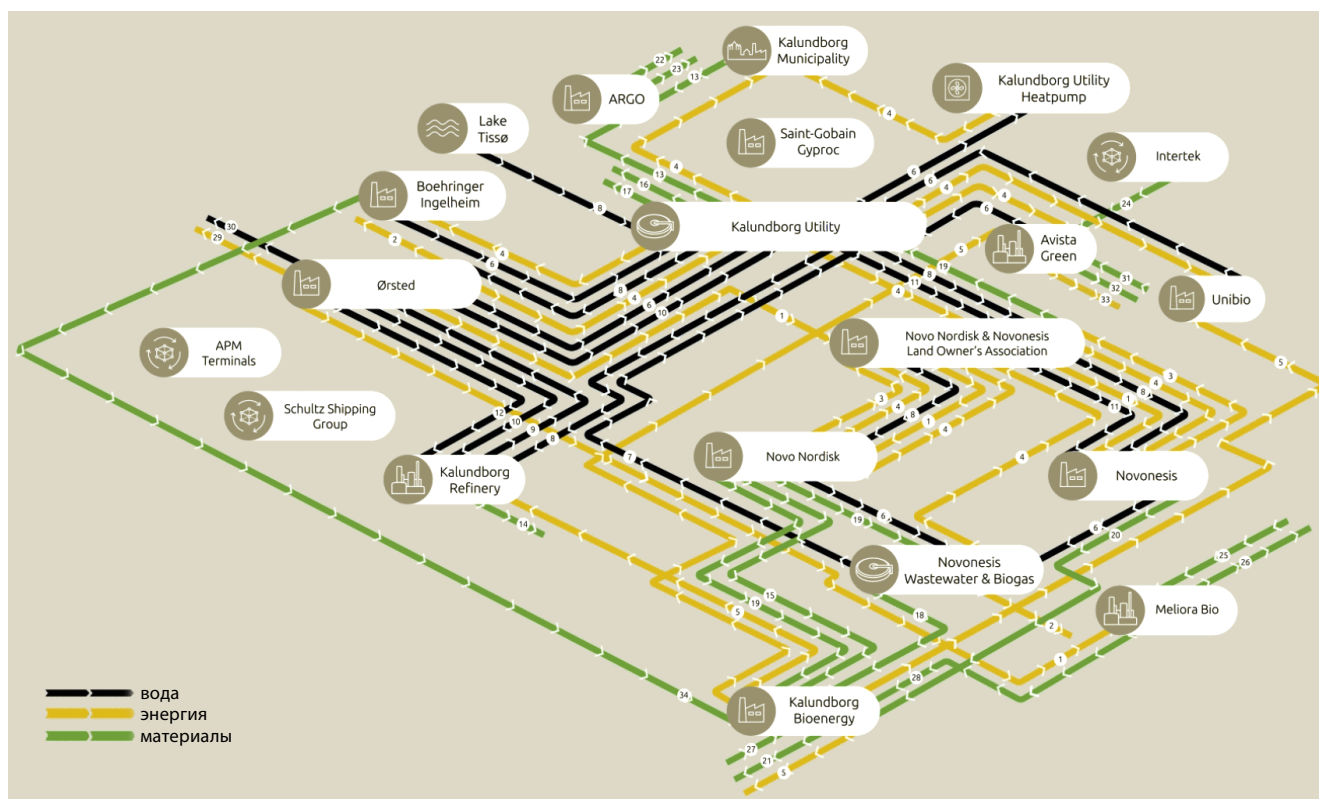


Рис. 2. Промышленная инновационная экосистема Калуннборг. Источник: [16]

подхода, терпения и готовности к экспериментам. Это не линейный процесс, а скорее «выращивание» сложной социально-экономической системы в тесной взаимосвязи со «спиралями» инноваций, то есть фактически их взаимопроникновение. При этом важны как «жесткие» (материальные), так и «мягкие» факторы: культура, доверие, общие ценности, открытость, готовность к коллаборации и др.

Для развития ПИЭ в Беларуси особую первоначальную роль играют созданные институционально-правовые условия. Концепция ПИЭ соответствует поставленным в нашей стране стратегическим целям внедрения принципов циркулярной экономики в производственные процессы, а также необходимости реализации современных механизмов инновационного развития, основанных на принципах устойчивости.

В республике имеются перспективы для формирования и развития ПИЭ, в том числе на основе существующих кластеров и симбиоза предприятий (например, в рамках свободных экономических зон). Однако необходим комплексный подход с учетом направлений инновационного развития, международного опыта, углубления цифровой трансформации, а также использования новейших технологий и информационных платформ. ■

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Промышленные платформы и экосистемы: монография / под ред. В.В. Акбердиной. – Екатеринбург, 2024.
2. Carayannis E.G. Toward industry 6.0 and society 6.0: the quintuple innovation helix with embedded AI modalities as enabler of public interest technologies strategic technology management and road-mapping // E.G. Carayannis, T. Posselt, S. Preissler // IEEE Transactions on Engineering Management. 2024. Vol. 71. P. 11238–11252.

■ **Summary.** The concept of industrial innovation ecosystems (IIEs) is examined as the most complex and promising form of organizing innovation and production activities under the conditions of Industry 5.0 and 6.0. The comparative analysis of innovation clusters, networks, and ecosystems is conducted in the context of industrial development, based on which the conclusions are drawn regarding their interrelationships and development. The research is grounded in the quintuple helix innovation model integrated with artificial intelligence, as well as the principles and features of industrial symbiosis, which makes it possible to characterize the contemporary conditions and factors for the formation of IIEs. Based on the results of the selected best foreign practices analysis (Denmark, China, Japan, and Finland), some key approaches to building IIEs and the prospects for their application in the Republic of Belarus are identified. It is noted that the ecosystem approach to implementing industrial policy is capable of ensuring greater flexibility, resilience, and competitiveness of organizations.

■ **Keywords:** industrial innovation ecosystems, industrial symbiosis, innovation clusters, innovation networks, digital transformation, quintuple innovation helix, ecosystem approach, ecosystem interactions.

■ <https://doi.org/10.29235/1818-9857-2026-09-29-35>

3. Järvenpää A.-M. Industrial symbiosis, circular economy and Industry 4.0 – a case study in Finland / A.-M. Järvenpää, V. Salminen, J. Kantola // Management and Production Engineering Review. 2012. Vol. 12, №4. P. 111–121.
4. Li X. Industrial ecology and industry symbiosis for environmental sustainability – definitions, frameworks and applications // Industrial ecology and industry symbiosis for environmental sustainability // <https://shura.shu.ac.uk/18212/>.
5. Чернова О.А. Экосистемный подход к управлению процессами инновационного развития промышленности / О.А. Чернова, Л.Г. Матвеева, Г.В. Горелова // Journal of New Economy. 2021. №2. С. 44–64.
6. Степченко О.С. Разработка экосистемной основы экономической безопасности промышленности / О.С. Степченко // Вестник ТОГУ. 2025. №3(78). С. 97–104.
7. Ковальчук Ю.А. Управление промышленными экосистемами в едином цифровом пространстве / Ю.А. Ковальчук, И.М. Степнов // Проблемы рыночной экономики. 2022. №3. С. 107–121.
8. Дорошко С. В. Промышленный симбиоз и новые возможности для энерго- и ресурсосбережения предприятий / С.В. Дорошко, А.М. Шушкевич // Бизнес. Образование. Экономика. Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 1–2 апр. 2021 г.: сб. ст. / редкол.: В.В. Манкевич [и др.]. – Мн., 2021. С. 39–43.
9. FISS – Finnish Industrial Symbiosis System // Interreg Europe // <https://www.interregeurope.eu/good-practices/fiss-finnish-industrial-symbiosis-system>.
10. Волкова Ю.А. Экосистемный подход к управлению развитием промышленных организаций / Ю.А. Волкова // Экономический рост Республики Беларусь: глобализация, инновационность, устойчивость : материалы XVI Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 19 мая 2023 г. / Бел. гос. эконом. ун-т. – Мн., 2023. С. 134.
11. Титова Н.Ю. Различия и сходства понятий «промышленные кластеры» и «промышленные экосистемы» / Н.Ю. Титова, В.Е. Зиглина // Вестник Астраханского гос. техн. ун-та. Серия: Экономика. 2021. №3. С. 7–16.
12. Жуковская О.Ю. Цифровые платформы как основа ведения бизнеса / О.Ю. Жуковская // Наука и инновации. 2024. №8. С. 4–10.
13. Смородинская Н.В. Сетевые инновационные экосистемы и их роль в динамизации экономического роста / Н.В. Смородинская // Инновации. 2014. №7 (189). С. 27–33.
14. The new economy's global digital platform power index 2023: enabling the new national economic pillar // DinarStandard: growth strategy research and advisory // https://2feea378-8f71-46c9-9424-36229a900f86.usrfiles.com/ugd/2feea3_b69dbe6fa1ea49548d3768008b168446.pdf.
15. Global innovation index 2025: ranking of world's top 100 innovation clusters // <https://www.wipo.int/documents/d/global-innovation-index/docs/en-2025-gii-2025-clusters-top100-ranking.pdf>.
16. Our ambitions. Partners. The ecosystem behind Kalundborg Symbiosis // Kalundborg Symbiosis // <https://www.symbiosis.dk/en/>.
17. Zeng X. Mapping anthropogenic mineral generation in China and its implications for a circular economy / X. Zeng, S.H. Ali, J.Tian, J. Li // Nature Communications. 2020. №11 (1544). P. 1–9.
18. Schneider A.F. Investigations into the transition toward an established e-waste management system in China: empirical evidence from Guang-dong and Shaanxi / A.F. Schneider, X. Zeng // Current Research in Environmental Sustainability. 2022. Vol. 4: 100195. P. 1–10.
19. An eco-town where resources are reused and recycled // Public Relations Office. Government of Japan // https://www.gov-online.go.jp/eng/publicity/book/hlj/html/202008/202008_02_en.html.
20. Industrial symbiosis // Sitra // <https://www.sitra.fi/en/dictionary/industrial-symbiosis/>.

Статья поступила в редакцию
12.06.2026 г.

Стремительно развивающаяся виртуальная реальность преподносит как возможность обретения государствами неведомых ранее динамики роста и конкурентных преимуществ, так и столкновение с неопознанными системными рисками, сопряженными с необходимостью поддержания странами цифрового суверенитета. Современные информационные технологии функционируют на сложном оборудовании, которое включает в себя полупроводники, облачные узлы, подводные кабели и другую сложнейшую инфраструктуру. В условиях глобализированной экономики стремление к достижению максимальной эффективности при минимальных затратах привело к высокой концентрации цепочек поставок и зависимости большинства стран мира от небольшого числа доминирующих глобальных компаний. Хотя это часто рассматривается как экономическая проблема честной конкуренции, такая квазимонополистическая концентрация также является источником геополитической уязвимости, создавая каналы для внешнего влияния и внутренней нестабильности.

Основные тенденции современного развития



Виртуальных миров



Александр Косенко,
старший научный сотрудник
Научно-исследовательского
экономического института
Министерства экономики
Республики Беларусь

К тому же технологические узкие места, такие как системные и программные зависимости, все чаще используются в качестве инструментов принуждения, а цифровые платформы эксплуатируются для скоординированных кампаний по дезинформации, подрывающих социальную сплоченность и экономическую активность субъектов хозяйствования.

В последнее время двигателями инклюзивности стали виртуальные миры, стимулирующие исследования, инновации, производительность и экономический рост, предлагая недорогое обучение, рабочие места с возможностью удаленного доступа, трансграничный и внутрирегиональный обмен знаниями, а также новые площадки для культурной и гражданской активности.

Они включают в себя расширенную реальность (XR), виртуальную (VR), дополненную (AR) и смешанную (MR). Эти технологии еще больше объединяют множество возможностей: инфраструктуру и технологические компоненты, включая искусственный

интеллект, связь следующего поколения (5G и 6G), облачные и периферийные вычисления, а также Интернет вещей. По мере ускорения глобальной гонки за создание «парадигмы следующего поколения Интернета» вопросы управления, структуры рынка и общественной безопасности стали центральными в стратегическом планировании многих крупных экономик.

Европейская комиссия определяет виртуальные миры как «постоянные, иммерсивные среды, основанные на технологиях, включая 3D и расширенную реальность, которые позволяют смешивать физический и цифровой миры в режиме реального времени для таких целей, как проектирование, моделирование, сотрудничество, обучение, общение, транзакции или развлечение».

Глобальный рынок цифровых вселенных формируется несколькими доминирующими компаниями.

Meta специализируется на масштабных платформах, представляющих собой комплексные социальные, коммерческие и иммерсивные экосистемы.

Apple Vision Pro склоняется в сторону премиальных структур смешанной реальности, делающих акцент на пространственных вычислениях и интеграции в корпоративную среду.

Sony остается крупным игроком в игровой индустрии благодаря PlayStation VR2.

Microsoft HoloLens и HTC Vive занимают передовые позиции в бизнес- и промышленном сегментах; китайские компании, такие как Pico и DPVR, являются абсолютными лидерами на рынке VR/AR-устройств, создавая мощные аналоги западных гарнитур (например, Meta Quest).

В глобальном масштабе более 68 тыс. фирм, исследовательских институтов и государственных учреждений заняты в этой сфере, публикуется более 88 тыс. научных работ по данной тематике, подаются заявки на приоритетные патенты и осуществляется коммерческая деятельность. Центральными акторами являются Китай, США, Великобритания и Южная Корея, при этом Китай и США лидируют по количеству патентов и степени деловой активности. ЕС в авангарде по количеству научных публикаций на предмет технологий виртуальных миров (30% против 16% у США и 15% у Китая), но значительно отстает по числу заявок на приоритетные патенты (чуть более 1500 из более чем 42 тыс. заявок по всему миру). Среди государств ЕС доминируют Германия (20%), Франция (14%) и Испания (10%).

В современной игровой индустрии на первых позициях находится Китай, доля субъектов хозяйствования которого составляет 46% от представленных на мировом рынке, а объем деловой активности – 45%, за ним следуют США (16% игроков и 18% активности), ЕС (11% и 9%), Южная Корея (6% и 9% соответственно). Наиболее активными экосистемами являются креативные индустрии культуры (20% в мире, 33% в ЕС), туризм (14% и 27%) и розничная торговля (13% и 24%).

Виртуальные миры предлагают существенные экономические выгоды, оптимизируя многие процессы, в следующих областях:

- **снижение затрат и ускорение инноваций с помощью цифровых двойников** позволяют производителям моделировать заводы и цепочки поставок в режиме

реального времени, улучшая прогнозируемое техническое обслуживание и оперативное планирование;

- **виртуальное проектирование и прототипирование** в строительстве и машиностроении ускоряют принятие решений и сокращают количество отходов, материалов;
- **секторы развлечений и игр**, продолжая быстро расти, стимулируют потребительское поведение и развивают базовые технологии;
- **экологическая устойчивость** усиливается благодаря виртуальным подходам к планированию, оценке воздействия на климат, моделированию состояния экосистемы, способствующим снижению углеродного следа и максимизации выгод при одновременном смягчении негативных последствий;
- **иммерсивные технологии образования** предоставляют возможность качественной подачи учебного материала, виртуального присутствия в аудитории или лаборатории, возможности проведения безопасных экспериментов, операций и т.д.;
- **экономию времени персонала** – инструменты удаленного сотрудничества сокращают необходимость деловых поездок и позволяют на системной основе повысить эффективность бизнес-процессов путем оптимизации экспертной деятельности и снижения издержек.

Виртуальные миры являются ключевым компонентом перехода к Web 4.0 – четвертому поколению Интернета, полностью объединяющему физический и виртуальный миры и обеспечивающему улучшенную связь и доступность

на разных устройствах, что побуждает переориентировать цифровую политику государств с преимущественно регулирующей задачи на ключевой стратегический приоритет, определяющий его экономическую безопасность, технологическую автономию и глобальное влияние.

Взаимодействие ключевых технологий – XR, ИИ, 5G, IoT и блокчейна – составляет основу умных экосистем и метавселенных, однако сохраняются различия по странам в их внедрении и инвестициях. Подавляющее большинство инвестиций ЕС в создание виртуальных миров связаны с расширенной реальностью (84%), за которой следуют ИИ (7%), Интернет вещей (5%), онлайн-платформы, Интернет и облачные технологии (2%), 5G и связь (2%), а также блокчейн (1%). Интернет вещей незаслуженно получает меньший процент средств, в то время как его роль в качестве вспомогательной технологии для виртуальных миров велика. По мнению экспертов, следует выделить специальные гранты на интеграцию проектов, в рамках которых внедряются агенты на основе ИИ, осуществляется обработка данных на периферии сети или вводится стандарт связи 5G в иммерсивные среды. Единая структура взаимодействия блокчейна также снизит барьеры для входа на рынок для малых и средних предприятий, желающих расширять безопасные виртуальные экономики. Благодаря согласованности государственного финансирования с частными инвестициями, содействию интеграции ИИ, 5G, IoT и блокчейна Евросоюз может преобразовать свою экосистему виртуального мира в глобально конкурентоспособный, инновационный и стратегически автономный сектор.

Практика и особенности финансирования виртуальных миров

Важнейшим каналом для прорастания новых технологий, таких как расширенная реальность, искусственный интеллект и Интернет вещей, составляющих виртуальные миры, в коммерческие приложения выступает государственное финансирование, играющее ключевую роль в преодолении разрыва между фундаментальными исследованиями и их коммерциализацией.

В период 2009–2025 гг. более 3 тыс. предприятий, научно-исследовательских и инновационных организаций и более 800 проектов получили поддержку от ЕС в области иммерсивных сред. 1-е место в списке бенефициаров занимает Италия (12%); вместе с Испанией (11%), Германией (11%), Францией (9%) и Грецией (6%) совокупная доля профинансированных Евросоюзом проектов составляет почти 50%, доля участников из третьих стран – 15%. Из них крупнейшим игроком – 6% от общего количества – является Великобритания, участник программы Horizon Europe, за ней следует Норвегия (2%).

Венчурный капитал, выступая основным двигателем масштабируемости и трансформации рынка, имеет ключевое значение для развития виртуальных миров. Венчурное финансирование предоставляет необходимые средства и стратегическую поддержку стартапам и малым предприятиям, способствуя их росту. Оно играет решающую роль в получении конкурентного преимущества в цифровой экономике, позволяя инвестировать в НИОКР и новые технологии.

На этом рынке доминируют США с объемом рискованного капитала в 16,8 млрд евро. Ранние инвестиции в виртуальные миры с 2013 по 2016 г. совпадают с периодом, когда Facebook Inc. (ныне Meta Platforms Inc.) приобрела Oculus примерно за 2 млрд долл., а Unity Technologies расширила стратегическое партнерство с Oculus, вложив значительные средства в развивающийся рынок виртуальной реальности. Венчурные вложения в иммерсивные технологии снова достигли пика в 3 млрд долл. в 2022 г. Компания Epic Games привлекла 1 млрд в 2021 г. Дополнительные 2 млрд долл. поступили от инвесторов в рамках раундов финансирования дальнейшего роста упомянутой фирмы, что свидетельствует об уверенности аналитиков в масштабном росте виртуальных сред. В то же время резко выросли корпоративные расходы на эти цели: Meta значительно расширила свои инвестиции в Reality Labs, а Microsoft приобрела Activision Blizzard.

Этот период также совпал с мощным бумом Web3/NFT, который привлек венчурное финансирование для многих проектов в сфере блокчейн-игр и виртуальных миров на основе криптовалют.

Китай занимает 2-е место в мире по объему инвестиций на эти цели: в 2009–2024 гг. в данный сектор было направлено почти 3 млрд евро. Большая часть средств, по-видимому, потрачена на аппаратное обеспечение. В этот период также наблюдался быстрый рост виртуальных аркад и центров виртуальной реальности по всей КНР.

Великобритания в период с 2009 по 2024 г. привлекла в метавселенные в общей сложности около 1,7 млрд евро инвестиций.

За ней следует ЕС: европейские компании получили наибольшие объемы финансирования в 2020 и 2021 гг., что, возможно, обусловлено ростом американских инвестиций в эту сферу, рекордными уровнями средств, направленных в технологический капитал в ЕС в целом в 2021 г., а также спросом на технологии удаленного доступа, вызванным пандемией.

На долю Европейского союза приходится 17% мировых сделок в виртуальном мире. Наибольшее их количество принадлежит Франции (19%), за ней следуют Испания (11%), Германия (8%), а также Италия и Нидерланды, доля каждой из которых составляет по 7%. За 2009–2024 гг. ЕС привлек четвертый по величине объем венчурного капитала и второй по величине объем венчурных транзакций в мире. По показателю глобальных сделок он опережает Китай (8%) и уступает только США (40%), однако по-прежнему отстает по общему объему привлеченного венчурного капитала. США лидируют в этом плане, демонстрируя сильные позиции как в привлечении инвесторов, так и в заключении крупных сделок.

Игроки виртуального мира

Компании, занимающиеся виртуальными мирами, включая разработчиков оборудования, программного обеспечения, платформ, движков, контентной инфраструктуры и иммерсивных сервисов виртуальной и расширенной реальности, больше не являются нишевыми игроками на технологическом рынке. Вместо этого они все больше играют центральную роль в таких секторах, как образование, промышлен-

ность, культура, здравоохранение и государственное управление. По мере масштабирования этих технологий собственность и контроль над корпорациями, разрабатывающими и эксплуатирующими их, будут оказывать глубокое влияние на экономическую конкурентоспособность, управление данными, безопасность, а также культурные и социальные ценности, заложенные в цифровой среде.

Право собственности на компании, работающие в области виртуальных миров, определяет, кто контролирует интеллектуальные активы, потоки данных, управление платформами, технологические стандарты и экономическую ренту, связанную с иммерсивными технологиями. Изучение тенденций в этой сфере представляет собой критически важный инструмент для оценки долгосрочной технологической автономии и стратегической устойчивости игроков данного направления. Оно позволяет понять, где создается и извлекается ценность, как меняется глобальная конкурентная динамика и какие структурные уязвимости могут возникнуть по мере повсеместного распространения иммерсивных технологий. Понимание этих закономерностей важно для разработки механизмов отбора инвестиций, стратегий НИОКР, мер промышленной политики и обеспечения устойчивого и конкурентоспособного присутствия акторов в экосистеме виртуальных миров.

Наибольшей долей зарубежных фирм виртуального сегмента владеют США (31%), на их долю приходится примерно треть всех трансграничных сделок с ними. Великобритания известна как крупный иностранный инвестор и как одно из наиболее популярных мест в мире для приобретения виртуальных миров

иностранными компаниями. Почти пятая часть всех зарубежных корпораций, владеющих метавселенными, базируется в Великобритании, а инвестиции поступают из самых разных источников. Не зря в эту страну Европейский союз вкладывает 33%, а США 25%, что отражает тесные финансовые, технологические и корпоративные связи между их экономиками. На долю Германии приходится 24%, Швеции – 13%, Франции – 11%, Люксембурга – 11% и Ирландии – 10%. Капитал ЕС также направляется в Российскую Федерацию – 7%, Норвегию – 5%, Индию – 5%, Мексику – 4%, Австралию – 4%, Канаду – 4% и Швейцарию – 4%, что свидетельствует об интересе как к развитым, так и развивающимся рынкам.

На Великобританию и США в совокупности приходится 58% иностранных компаний, работающих в сфере виртуальных миров в ЕС, при этом в Евросоюзе также наблюдаются новые потоки инвестиций в Азию, Океанию и другие регионы мира.

Тенденции, сформировавшиеся в 2009–2025 гг., иллюстрируют меняющуюся динамику этого сектора. Расширение иностранной собственности в ЕС, особенно со стороны Великобритании и США, отражает его интеграцию в глобальные технологические экосистемы. Однако диверсификация инвестиций ЕС в развивающиеся рынки, такие как Индия, Мексика и Российская Федерация, демонстрирует дальновидную стратегию, нацеленную на балансирование между традиционными партнерствами и новыми возможностями в Азии, Океании и за ее пределами. Такой двойной подход не только укрепляет глобальные экономические связи ЕС, но и снижает чрезмерную зави-

симость от какого-либо одного региона, повышая устойчивость перед лицом геополитической и рыночной неопределенности [2].

Таким образом, сектор виртуальных миров представляет собой микрокосм более широкой цифровой экономики, характеризующейся изменчивыми структурами собственности, быстрой технологической эволюцией и геополитической взаимозависимостью.

Россия и Беларусь в виртуальных мирах

Россия находится на втором месте в мире по числу разработанных метаверс-платформ. Ее присутствие охватывает как создание локальных экосистем для бизнеса, так и обширное культурно-просветительское пространство. Крупные компании активно создают собственные виртуальные инструменты для коммуникации и презентаций:

- **Метаверс ВТБ** – корпоративная платформа для проведения командных встреч и рабочих спринтов;
 - **Sber Jazz XR** – платформа для 3D-встреч и совместной работы от Сбера;
 - **МТС** – собственная метавселенная для интеграции услуг бренда.
- Российские разработчики предлагают рынку готовые решения для цифровых офисов, проведения мероприятий и ритейла:
- **виртуальные миры: Dexart, Pixity, Virtonex, Sense Tower**. Они активно применяются для проведения виртуальных мероприятий, организации удаленной работы и обучения;
 - **платформы Metaplan, Volter** для удаленного онбординга, виртуальных мероприятий

и создания цифровых копий зданий (к примеру, интерактивный проект «Виртуальное путешествие по России», позволяющий исследовать регионы страны от Владивостока до Калининграда, не покидая Москвы);

- **гейминг и образование** для проведения досуга, популяризации исторического и культурного наследия (игры Roblox, Fortnite).

В сфере образования в виртуальных мирах ключевыми проектами в России являются следующие:

- «Цифровая вселенная» – первая в России образовательная метавселенная, созданная в Нижнем Новгороде. Включает 18 локаций и интегрированные курсы, позволяющие студентам и абитуриентам посещать лекции и лаборатории без наличия физического кампуса;
- **Varwin Education** – российская 3D/VR/AR-платформа, дающая возможность школьникам и студентам самостоятельно программировать интерактивные виртуальные миры. Включает библиотеку контента для виртуальных лабораторий по физике, химии и тренажеров;
- «Стемфорд» – проект, формирующий среду STEM-образования в России. Включает цифровые форматы и виртуальное погружение для изучения технологий будущего.

Для системного развития отрасли была образована Ассоциация участников рынка метавселенных, способствующая росту и популяризации индустрии метавселенных в РФ, объединяющая участников для обеспечения ее безопасности и устойчивости.

Ассоциация устанавливает стандарты, продвигает инновации, укрепляет доверие к технологиям, проводит экспертизу, взаимодействует с государством и поддерживает совместные проекты.

По прогнозам аналитиков «Сколково», в 2026 г. метавселенные сформируют новую экономическую модель в России, сократят издержки бизнеса, а четверть населения будет проводить в них минимум час в день [3].

Присутствие Беларуси в виртуальных мирах реализуется преимущественно через производство видеоигр с национальным колоритом, развитие платформ на базе метаверсов (цифровых двойников), а также благодаря значительному вкладу отечественных разработчиков в глобальную игровую индустрию. На базе ведущих вузов (например, БГУИР, ГрГУ им. Янки Купалы) внедряются программы по изучению VR/AR-технологий и искусственного интеллекта. В профильных технопарках открываются лаборатории, создающие обучающие виртуальные симуляции для промышленности и медицины.

Инвестиции в эту сферу в республике осуществляются преимущественно через покупку криптовалют, NFT (цифровой сертификат подлинности, который закрепляет право владения уникальным объектом в Интернете) или токенов. Прямое законодательство адаптируется под цифровые активы, однако сопряжено со значительными рисками из-за волатильности и недостатка венчурного капитала для локальных стартапов.

Именно в целях поддержки и развития стартап-экосистемы страны в области виртуальных миров в апреле 2026 г. между Секретариатом Наблюдательного совета ПВТ и Клубом венчурных

инвесторов Беларуси подписано соглашение о взаимодействии и сотрудничестве. Партнерство будет направлено на проведение мероприятий и встреч с представителями инвестиционного и бизнес-сообщества, оказание информационных и консультационных услуг, популяризацию инновационного предпринимательства, укрепление кадрового потенциала экосистемы, а также содействие привлечению венчурных инвестиций, включая зарубежные. Главная задача соглашения – увеличение количества сделок и объема инвестиций, которые получают белорусские стартапы [4].

В настоящее время наибольший потенциал для разработки и внедрения базовых элементов виртуальных миров в стране имеет Парк высоких технологий. Он базируется на мощной базе пространственных вычислений и передовом правовом регулировании цифровых активов. Компании парка формируют иммерсивные среды для бизнеса, образования и медицины, расширяя инфраструктуру от метавселенных до интерактивных симуляций.

Работа ведется по следующим направлениям:

- *пространственные вычисления и VR/AR* – компании-резиденты (например, «Игры Разума Софт», Feeling Digital) создают проекты на стыке технологий и искусства, иммерсивные рекламные платформы Location-Based VR (VR-игры на базе локаций) и симуляторы;
- *социальные и образовательные проекты* – внедряются уникальные детские VR-комплексы для интерактивного обучения и формирования безопасной циф-

ровой среды, адаптированной для подростков;

- *криптовалюты и NFT-инфраструктура* – в ПВТ легализованы операции с токенами и цифровыми знаками, что позволяет безопасно разрабатывать внутренние экономические системы для метавселенных и интегрировать их с глобальными финансовыми рынками.

Внедрение виртуальных миров (VR/AR-технологий и метавселенных) в экономику Беларуси является ключевым вектором цифровой трансформации согласно Национальной стратегии устойчивого развития, поскольку они способствуют переходу от традиционного сектора к новому технологическому укладу, обеспечивая рост конкурентоспособности национальных отраслей на глобальных рынках. В настоящее время трансформация бизнеса и общественной жизни в стране активно идет в направлении перехода от простой имитации виртуальной среды к ее глубокой интеграции в экономические экосистемы. ■

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Белозеров С.А. Виртуальные миры MMORPG: Часть I. Определение, описание, классификация // Психология. Журнал Высшей школы экономики. 2015. Т. 12, №1 // <https://cyberleninka.ru/article/n/virtualnye-miry-mmorpg-chast-i-opredelenie-opisanie-klassifikatsiya>.
2. Virtual Worlds, Real Impact Mapping EU Strengths and Global Interdependencies // <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/b5098076-3df0-11f1-814f-01aa75ed71a1/language-en>.
3. Исследование: к 2026 году метавселенные сформируют новую экономическую модель в России // <https://snob.ru/news/issledovanie-k-2026-godu-metavselennye-sformiruyut-novuiu-ekonomicheskuiu-model-v-rossii>.
4. Парк высоких технологий и клуб венчурных инвесторов подписали соглашение о сотрудничестве // <https://www.park.by/press/news/park-vysokikh-tekhnologiy-i-klub-venchurnykh-investorov-podpisali-soglasenie-o-sotrudnichestve>.



СИСТЕМА КРІ

для мониторинга
результативности
научно-исследовательской
деятельности



Ирина Салтанова,
заместитель директора
по научной деятельности
ООО «АртБиоТех», кандидат
технических наук



Сектор исследований и разработок выступает драйвером инноваций, высокой добавленной стоимости, обеспечения технологического суверенитета и формирования новых каналов сбыта. В условиях высокой рыночной неопределенности, стремительного сокращения жизненного цикла продуктов и жестких бюджетных ограничений на первый план выдвигается императив кардинального повышения эффективности научных исследований и окупаемости вложенных средств. Следовательно, управление научными результатами и их измерение, особенно в качестве основы для поддержки и распределения инвестиций, занимает важное место в инновационном процессе.

Алгоритм разработки оценочной и измерительной системы КРІ

Для оценки результативности научно-исследовательской деятельности наиболее часто используются следующие показатели:

- **библиометрические** – число публикаций в международных журналах, индикатор цитирования и индекс Хириша, наличие патентов, соавторство с зарубежными учеными;
- **кадровые** – количество и степень профессиональной подготовки ученых, подготовка кадров высшей квалификации и т.д.;
- **финансовые** – расходы на науку и имеющаяся в распоряжении материально-техническая база (МТБ).

В общую модель измерения успешности научной работы включены три уровня: научно-исследовательский проект/исследовательская программа (НИР), научная организация и концепция оценки на уровне страны в целом (рисунок).

Особую аналитическую сложность в данном контексте представляет проблема измерения результативности научно-исследовательских работ. Их последствия и эффекты характеризуются значительным временным лагом. Результаты НИР редко проявляются мгновенно, что исключает возможность всесторонней оценки научно-технического потенциала проекта сразу после его завершения – для практического воплощения и анализа инновации требуется время. Поскольку НИР относится к категории высокотехнологичной и наукоемкой деятельности, ключевым условием ее успешности выступает квалификационный потенциал исследовательской группы (совокупность навыков, опыта, знаний). С точки зрения управления инвестициями в прорывные инновационные продукты важно учитывать весь комплекс факторов, влияющих на реализацию научных работ. При подготовке системы оценки их эффективности выделяют 3 ключевые цели:

- оценка новых проектных предложений на этапе планирования;
- анализ результатов постфактум на предмет эффективности вложенных средств, степени их влияния на конечные показатели;
- поддержка цикла управления инициативами НИР, гарантирующего выполнение правильных действий для достижения конечного эффекта.

Таким образом, система измерения результативности НИР может выглядеть следующим образом:

- прояснение целей, определение ключевых проблем измерения и выбор базовой методологии;
- идентификация факторов, подлежащих оценке;
- определение ключевых показателей для непрерывного мониторинга эффективности;
- постфактум-анализ долгосрочных эффектов НИР, поддающихся оценке только спустя какое-то время после завершения программы исследования.

На уровне организации оценка эффективности науки строится на синтезе результатов конкретных проектов и совокупной исследовательской активности учреждения.

Главная цель такой оценки – адекватность распределения и сосредоточения материальных, финансовых ресурсов и кадрового потенциала на приоритетных направлениях развития экономики.

Рассматриваемая система КРІ акцентирует внимание на аудите научно-исследовательской среды. Предложенные индикаторы позволяют оценить качество проводимых изысканий, востребованность полученных результатов и финансовую устойчивость научных учреждений. Кроме того, данные метрики отражают действенность государственного финансирования, уровень инфраструктуры для реализации стратегических задач, квалификации и профессиональный рост персонала, а также степень интеграции организации в глобальное научно-технологическое пространство.

При этом оценкой совокупных достижений на общегосударственном уровне должны заниматься независимые внешние эксперты, что позволит сформировать объективное представление о функционировании всей системы в целом. Для формирования полноты картины помимо количественных показателей необходимы качественные. К ним относятся интервью и опросы, тематические исследования и истории успеха инноваций, созданных по итогам реализации различных научных программ по всем профильным учреждениям.

Оценка результативности научно-исследовательских работ (научных проектов или программ)

Одной из основных форм научной деятельности является выполнение НИР, в результате которых силами научного коллектива одной или нескольких организаций создается научный продукт: идея,

концепция, экспериментальный или макетный образец и т.д. Эффективность этой работы должна оцениваться на следующих этапах:

- при подаче заявки на НИР, формировании плана работ (цель – выяснение научной новизны, обоснование целесообразности проведения исследований и принятия взвешенного решения о включении разработки в план работ научной структуры и целевого финансирования);
- по итогам НИР, для того чтобы проанализировать качество выполнения технического задания и оценить потенциал коммерциализации разработки, а также конкретных способов и каналов практического применения;
- на стадии внедрения – для прогнозирования ожидаемого социального и экономического эффекта.

Результаты научных проектов призваны оказывать долгосрочное влияние на развитие науки, способствовать решению актуальных социально-экономических задач. При этом НИР, как правило, обладают такими характеристиками, как уникальность, высокая степень методологической сложности, продолжительные сроки реализации, науч-

ная новизна. Кроме того, они всегда ограничены временными рамками, объемом финансирования. К их выполнению могут привлекаться специалисты из различных областей знаний.

Формирование результата НИР может различаться в зависимости от отраслевой принадлежности научной организации по экономическим и социальным параметрам. В первом случае важны количественные и качественные показатели деятельности, учитывающие разницу между полученным результатом и затратами на его достижение, во втором – индикаторы, влияющие на качество жизни (уровень и образ жизни, здоровье), обслуживание и т.п., то есть те, которые не поддаются количественному измерению и не связаны с возмездной реализацией НИР.

Внедрение последних в практику может осуществляться по следующим ключевым направлениям:

- **внешнее** – внедрение в реальный сектор экономики и практическую деятельность субъектов хозяйствования;
- **внутреннее** – использование в рамках дальнейших научно-исследовательских разработок и теоретических изысканий;
- **образовательное** – интеграция полученных данных в учебный процесс.



Рисунок. Модель разработки системы KPI для мониторинга результативности научно-исследовательской деятельности страны

Показатель	Пояснение
Среднегодовая выработка НИР	Отношение общей сметной стоимости всех проводимых организацией научных исследований к среднесписочному числу исполнителей проекта
Индекс цитирования	Наукометрический показатель, отражающий значимость трудов ученого или организации, который измеряется суммарным числом ссылок на их публикации
Количество публикаций	Издание статей по тематике НИР в отечественных научных и ведущих зарубежных изданиях, имеющих отношение к различным индексам цитирования
Динамика специализированных публикаций в ведущих профильных научных изданиях	Монографии, статьи, сборники научных работ, учебники и учебные пособия. Публикационный критерий – суммарное количество печатных работ. Сравниваются данные по количеству публикаций в текущем периоде с аналогичными данными прошлых периодов, выявляется тенденция, дается оценка
Конференции, семинары, диспуты	Количество и уровень (международные, национальные, межвузовские) проведенных конференций, научных семинаров и других видов научных форумов
Гранты, договоры	Участие в конкурсах на получение грантов, их получение в рамках выполнения НИР
Соблюдение сроков выполнения НИР	Сдача результатов НИР заказчику в полном объеме в установленные договором сроки
Внедрение результатов	Внедрение результатов НИР должно подтверждаться соответствующими актами и (или) справками о внедрении (практическом использовании) результатов НИР в рамках периода ее выполнения либо в течение 6 месяцев после завершения НИР
Количество оформленных объектов интеллектуальной собственности – патентов и свидетельств	Возможность практического применения научных результатов, что подтверждается наличием соответствующих зарегистрированных объектов интеллектуальной собственности.
Диверсификация источников финансирования	Обеспечение не менее 30% средств внебюджетных источников (международные фонды, средства хозяйствующих субъектов, собственные средства, средства банков и пр.) в общем объеме финансирования НИР
Наличие положительных отзывов о результатах НИР от заказчиков работ	Обоснованность качества выполненной работы в виде документально подтвержденных отзывов
Наличие докторантов, исследования которых проводятся в рамках НИР	Возможность практического применения научных результатов
Количество диссертаций, защищенных с использованием результатов НИР	Численность ученых, защитивших диссертации с использованием результатов НИР (в ходе выполнения НИР либо в срок не позднее 6 месяцев после завершения выполнения НИР), что подтверждается наличием соответствующих актов и (или) справок о внедрении (практическом использовании) результатов

Таблица 1. Перечень дополнительных показателей для оценки результативности НИР

Как стандартизованные способы измерения результатов научных исследований, так и унифицированные методы оценки их эффективности отсутствуют. Данное обстоятельство обуславливает объективную потребность в разработке оценочного инструментария, который позволил бы обеспечить возможность верификации параметров проекта на всех этапах его жизненного цикла от поиска до внедрения, а также ориентировал бы его создателей на поддержание высокого научно-технического уровня разработок.

На начальном этапе выполнения научных исследований проводится технико-экономический анализ ожидаемых результатов, выбор базы для сравнения. Расчет эффективности при этом носит прогнозный характер.

Следующий этап – внедрение результатов НИР в практику. Формально их качество оценивается в зависимости от направлений использования: для дальнейшей производственно-экономической деятельности, в последующих научных разработках или в образовательном процессе. Характеристики критериев и показателей научной результативности фундаментальных и прикладных НИР достаточно полно представлены в [1], в настоящее время документ актуализируется. Однако научные организации по решению руководства могут включать дополнительные качественные и количественные индикаторы (табл. 1). Их наличие позволяет учесть внутреннюю специфику конкретного учреждения и сформировать более гибкую, адаптированную к отраслевым особенностям модель аудита исследовательских проектов.

В каждой научной организации могут быть сформированы иные, отличные от перечисленных в таблице критерии оценки результативности НИР.

Присвоение дополнительным показателям весовых коэффициентов (отражающих важность и уровень достижений) осуществляется на локальном организационно-административном уровне с учетом имеющихся субъективных представлений о значении отдельных индикаторов как для оценки выполненных НИР, так и стимулирования научных коллективов в определенном

направлении. В частности, в зависимости от специфики учреждения акцент может быть смещен в сторону публикационной активности в международных реферативных базах данных и динамики защищенных диссертаций либо интеллектуальной собственности, наращивания патентного портфеля (авторских свидетельств) и внедрений в реальный сектор экономики и т.д.

Оценка результативности научно-исследовательской деятельности при выполнении НИР может стать базисом при определении перспективности (либо бесперспективности) научных направлений, которые проводит научная организация, а также при принятии органами госуправления решений о дальнейшем финансировании этих работ с учетом общей эффективности и значимости.

Оценка результативности научно-исследовательской деятельности организации

Для целей мониторинга результативности научно-исследовательской деятельности организации/учреждения разработан перечень 5 ключевых показателей КРІ первого (верхнего) уровня:

- *качество и востребованность научных трудов;*
- *финансовая эффективность;*
- *развитие творческого и кадрового потенциала;*
- *международное сотрудничество и академическая мобильность;*
- *исследовательская и физическая инфраструктура.*

Эти метрики выбраны как наиболее сбалансированный и согласованный набор КРІ, отражающий как академические, так и инфраструктурно-экономические аспекты функционирования учреждения. Они критически важны для успешной деятельности, имеют стратегическое значение и представляют интерес для органов государственного управления, актуальны для всех типов научных учреждений, охватывают основные стратегические направления организации, которые необходимо постоянно отслеживать.

Кроме этих 5 базовых показателей каждая организация с учетом своей специфики (научно-исследовательский институт, музей или иное) может использовать собственные КРІ для мониторинга результативности деятельности.

Параллельно с метрическим контролем применяется комплекс вопросов для самооценки. В большинстве случаев он охватывает качествен-

ные аспекты институциональной среды. Высокая степень адаптивности позволяет интегрировать его в практику управления в соответствии с внутренними регламентами и целями организации по своему усмотрению.

В дополнение к стратегическим КРІ первого уровня приводятся вспомогательные, более детализированные критерии второго порядка, иллюстрирующие потенциал каждого направления деятельности. Поскольку текущий набор из 30 метрик избыточен для проведения регулярного мониторинга организации, чтобы обеспечить оперативный контроль, систему необходимо оптимизировать. В этой связи субпоказатели второго уровня могут использоваться как вспомогательный инструмент для обоснования оценок по пяти ключевым показателям эффективности первого уровня в совокупности с другими доказательствами результативности, включая вопросы для самооценки.

КРІ 1: КАЧЕСТВО И ВОСТРЕБОВАННОСТЬ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Сбор данных о качестве и востребованности результатов научной деятельности может быть получен путем экспертного анализа. Важнейшая функция научного исследования – генерация новых знаний, о чем обычно свидетельствует публикация в признанных рецензируемых изданиях. На качество научных исследований опосредованно может указывать импакт-фактор журнала, в котором они были обнародованы. В некоторых странах востребованность результатов НИР и их уровень определяют по анализу индексов цитирования (например, индекс Хирша) [2]. Не являясь идеальным показателем, он остается действенным способом проверки «веса» в научном мире исследователей, опубликовавших статьи, так как способность презентовать результаты и привлекать внимание других ученых к своему труду является одним из ключевых показателей успешности и востребованности. При этом базовыми критериями ценности и значимости финала научных исследований служат следующие характеристики:

- **народнохозяйственное значение:** вклад в рост экономического потенциала страны;
- **перспективность:** значимость результата для решения будущих задач;
- **актуальность:** возможность и целесообразность незамедлительного использования.

Вопросы для самооценки

- Есть ли в нашей организации условия, необходимые для привлечения высококвалифицированного персонала и достижения академических целей?
- Что предпринимается для привлечения и удержания высококвалифицированных научных кадров? Угрожают ли работе нашей организации нехватка навыков или другие проблемы с кадрами?
- Какая помощь оказывается новым и/или менее активным научным сотрудникам в их развитии?
- Эффективно ли управление технологиями, информационными системами и инновациями, для выполнения задач и целей, определенных стратегией развития организации?
- Показывает ли наш собственный сравнительный анализ, что мы (в целом) идем в ногу с организациями, которых считаем своими коллегами или конкурентами?
- Существуют ли угрозы нашей жизнеспособности (например, из-за роста заработной платы, инфляции, устаревшей МТБ, пенсионных обязательств, давления со стороны конкуренции) и есть ли у нас убедительные стратегии для управления ими?
- Способен ли наш научный потенциал идти в ногу с быстро меняющимися мировыми технологическими тенденциями и оперативно адаптироваться к изменяющимся условиям?
- Как мы можем оценить эффективность и результативность научной деятельности? Как нам измерять результаты?
- Что мы делаем для улучшения результатов исследований с точки зрения качества и востребованности?
- Как обеспечивается связь между проводимыми научными исследованиями и трансфером знаний, и в каких практических формах это реализуется?

Вспомогательные индикаторы

Развитием макропоказателей первого уровня служит пул вспомогательных критериев, обладающих повышенной степенью детализации. Ниже представлены показатели, используемые для содержательного обоснования оценок:

- ◆ число публикаций организации, индексируемых в национальных и международных информационно-аналитических системах научного цитирования;

- ◆ совокупная цитируемость таких публикаций;
- ◆ интегральный импакт-фактор журналов, в которых опубликованы статьи организации;
- ◆ общее количество научной, конструкторской и технологической продукции;
- ◆ количество созданных и использованных результатов интеллектуальной деятельности (по видам);
- ◆ число малых инновационных предприятий (спин-оф-компаний), образованных с участием организации.

КРІ 2: ФИНАНСОВАЯ РЕЗУЛЬТАТИВНОСТЬ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Лучшим подтверждением рыночной востребованности и коммерческого успеха научных изысканий является получение дохода от НИР, отражающих их финансовую результативность. Данная область касается экономического благополучия учреждения в краткосрочной перспективе.

Успешность заявок на исследовательские гранты (по источникам финансирования, областям науки или направлениям исследований) указывает на качество грантовых заявок и, следовательно, показывает, насколько организация применяет серьезный стратегический подход к надлежащей поддержке ученых или позволяет им просто «разбрасываться» в погоне за грантами. В качестве репрезентативного индикатора академической производительности целесообразно использовать показатель объема научно-исследовательских доходов в расчете на одного научного сотрудника, а также коэффициент ликвидности – отношение текущих активов к пассивам, характеризующий уровень финансовой устойчивости.

Вопросы для самооценки

- Насколько сильна в финансовом отношении наша организация и что мы делаем для ее поддержания и улучшения?
- Какой уровень профицита нам необходимо генерировать (создавать) на постоянной основе, чтобы обеспечить денежные средства для инвестиций и финансовый запас на случай непредвиденных обстоятельств?

- Как соотносятся с этим наши сегодняшние финансовые показатели? Что мы делаем, чтобы при необходимости их улучшить?
- Насколько мы зависим от бюджетного финансирования? Что нам следует делать, чтобы диверсифицировать источники дохода?
- Есть ли в нашем портфеле значимые убыточные направления? Оправдано ли это? Что мы должны с этим делать?
- Удовлетворены ли мы финансовым управлением учреждения?
- Как мы используем дополнительные средства, полученные в рамках коммерческих договоров?
- Генерируем ли мы достаточно денежных средств для стратегических инвестиций?
- Удовлетворены ли мы обоснованием и стратегией нашей политики в отношении займов, а также эффективности и использования активов?
- Как мы можем сравнивать себя с другими релевантными учреждениями, которые считаем конкурентами, по таким показателям высокого уровня, как рентабельность активов, доход на одного ученого, профицит/дефицит?

Вспомогательные индикаторы

- ◆ Финансовая результативность научной организации по источникам дохода по видам выполненных работ и оказанных услуг.
- ◆ Совокупный профицит/дефицит.
- ◆ Финансовая устойчивость (отношение текущих активов к пассивам).
- ◆ Ликвидность.
- ◆ Займы (заемные средства).
- ◆ Успешность заявок на исследовательские гранты.

КР 3: РАЗВИТИЕ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ПОТЕНЦИАЛА И ВОСПРОИЗВОДСТВО НАУЧНЫХ КАДРОВ

Уровень мотивации и академической продуктивности сотрудников имеет решающее значение для устойчивого развития научного учреждения. На первый план выходит систематическое повышение квалификации научных кадров. Важную роль в этом процессе выполняет система послевузовского

образования, призванная сохранять и приумножать интеллектуальный потенциал организации. Качество генерируемых ею результатов напрямую зависит от инвестиций в человеческий капитал. В связи с этим мониторинг структуры кадрового состава (в первую очередь научных работников высшей квалификации) становится особенно актуальным. Системный аудит в данном контексте выступает обязательным условием для объективной оценки воспроизводства интеллектуального капитала и укрепления конкурентных позиций учреждения на рынке.

Одним из наиболее эффективных инструментов повышения квалификации научных кадров являются международные научные стажировки. Этот формат академической мобильности позволяет ученым осваивать передовой опыт управления научными, экономическими и иными процессами, адаптировать успешные зарубежные кейсы для их последующей имплементации в отечественную (внутрихозяйственную) практику. Кроме того, стажировки способствуют презентации организации международному экспертному сообществу (компаниям), профессиональному росту и формированию новых компетенций. Не меньшую ценность представляет и создание устойчивых партнерских связей, расширение географии контактов, служащих базисом для реализации совместных научно-исследовательских проектов в будущем.

Вопросы для самооценки

- Претендуем ли мы на то, чтобы быть эксклюзивным (лучшим) институтом в профильном секторе исследований? Какими доказательствами мы можем это подтвердить?
- Достаточно ли у нас профессиональных научных кадров для решения стратегических задач развития организации?
- Предоставляем ли мы сотрудникам необходимую поддержку и осуществляем эффективное руководство?
- Насколько состоятельна наша кадровая стратегия относительно магистрантов и докторантов? Существует ли связь между обучением и исследованиями?
- Есть ли у нас четкая структура планирования преемственности кадров?
- Выявляем ли мы наших лучших исполнителей, поддерживаем их и инвестируем в них?

- Продуктивна ли наша политика поощрения сотрудников стажировками в зарубежных организациях?
- Сколько докторских диссертаций было защищено за последние 3 года в рамках совместного руководства со стороны института и промышленных партнеров?

Вспомогательные индикаторы

- ◆ Численность обучающихся в магистратуре и докторантуре, выполняющих квалификационные работы на базе организации.
- ◆ Доля магистрантов и докторантов.
- ◆ Численность исследователей, направленных на стажировки и работу в международные научные и научно-образовательные организации.
- ◆ Количество защищенных диссертационных работ.

КР4: МЕЖДУНАРОДНОЕ СОТРУДНИЧЕСТВО И МОБИЛЬНОСТЬ

Наиболее доступным способом интернационализации деятельности организации выступает обмен результатами исследований в рамках совместных программ, что обеспечивает как получение новых знаний, так и формирование компетенций мирового уровня для конкретных исследовательских проектов. В качестве показателей мобильности, помимо трансграничных перемещений ученых, можно рассматривать долю зарубежных специалистов в штате организации и число сотрудников, направленных в командировки. Уровень кооперации также оценивается по количеству совместных публикаций с участием иностранных авторов, что отражает синергический эффект обоюдных усилий. При этом сам процесс их взаимодействия служит эффективным механизмом трансфера знаний между исследователями. Дополнительным критерием оценки взаимодействия выступает ежегодное число участников международных программ.

Вопросы для самооценки

- Какие действия нами предприняты за последний год для расширения знаний о нашей организации за пределами страны?

- Сколько сотрудников института участвовало в программах международного обмена в прошлом и текущем году?
- Какое количество месяцев (в рамках текущего года) проведено за границей сотрудниками института, а иностранными сотрудниками – в нашей организации?
- Что было сделано для освещения в зарубежной прессе международных семинаров, проводимых в нашей организации?
- Какие стратегии можно разработать для увеличения трафика на веб-сайте организации с целью привлечения внимания как действующих, так и потенциальных международных партнеров?

Вспомогательные индикаторы

- ◆ Число опубликованных научных статей, подготовленных совместно с коллегами из зарубежных организаций.
- ◆ Численность иностранных ученых, работающих в научной организации.
- ◆ Число научных конференций с международным участием, проведенных организацией.
- ◆ Количество научно-популярных публикаций, выполненных сотрудниками организации совместно с иностранными коллегами.
- ◆ Количество положительных упоминаний организации в средствах массовой информации государственного уровня.
- ◆ Количество обращений (посещаемость) официальных сайтов и/или страниц организации, размещенных в сети Интернет.

КР5: ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ И ФИЗИЧЕСКАЯ ИНФРАСТРУКТУРА НАУЧНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Научно-технический персонал использует в своей работе материальные активы: здания, общецелевое оборудование, специальную учебную и исследовательскую базу. Все они связаны с расходами на амортизацию, техническое обслуживание и модернизацию, что требует обеспечения их окупаемости, достаточной для покрытия возникающих издержек.

Важное значение в этой связи имеют последовательные и стратегические инвестиции в инфраструктуру научно-исследовательских учреждений. При этом наибольшие трудности возникают с субсидированием

общественно-институциональной инфраструктуры: библиотек, IT-сетей или инженерных коммуникаций и т.д. Подобные объекты обычно финансируются по остаточному принципу, поскольку ими легче пожертвовать в пользу создания профильных лабораторий или закупки передового научного оборудования и приборов. Здесь необходимо учесть качественный анализ состояния материально-технической базы, включая оценку методик, применяемых в центрах коллективного пользования (ЦКП), особенно уникального оборудования. Это обусловлено тем, что для признания результатов проведения испытаний и измерений на современном уровне требуется наличие аттестованных подходов.

Для указанных целей предлагается проводить мониторинг доли современного научного оборудования (не старше 5 лет) в общем количестве основного научного оборудования ЦКП и объем стандартизованных, аттестованных и валидированных методик измерений в общем перечне используемых методик ЦКП. Мониторинг технологического возраста парка оборудования и приборов является важным моментом при планировании участия в международных проектах, так как в ряде случаев к публикации в международных журналах не принимаются результаты, полученные на оборудовании старше 5 лет от выпуска. Этот показатель предлагается отражать в динамике, то есть его повышение свидетельствует об оснащении ЦКП современной приборной базой, что, в свою очередь, позволит повысить уровень и качество проводимых исследований и рейтинг научной организации.

Данный раздел включает оценку субкритериев, детализирующих структуру внутренних и внешних текущих затрат на научные исследования и разработки (включая расходы на оплату труда персонала). Указанные параметры формируют доказательную базу при расчете общего показателя наукоемкости ВВП.

Вопросы для самооценки

- Определено ли, сколько нам нужно ежегодно инвестировать в устойчивую инфраструктуру?
- Разработана ли десятилетняя стратегия капитальных вложений?
- Удовлетворены ли мы экономическим обоснованием внутренних и внешних затрат на научные исследования и разработки?
- Эффективно ли мы используем наши активы, в том числе помещения учреждения? Какова рентабельность активов нашей организации в сравнении с референтным учреждением?

- Каково состояние инфраструктуры для исследований? Соответствует ли наша МТБ своему назначению и дает ли она реальную отдачу от уже вложенных инвестиций? Удовлетворены ли мы управлением капитальными проектами и плановым техническим обслуживанием?
- Существуют ли угрозы нашей жизнеспособности (например, из-за падения заработной платы, инфляции, устаревшей МТБ) и есть ли у нас убедительные стратегии для управления ими?
- Эффективно ли управление инфраструктурой, включая затраты на коммунальные услуги?

Вспомогательные индикаторы

- ◆ Численность работников, выполнявших исследования и разработки (по категориям).
- ◆ Удельный вес научных сотрудников в общей штатной численности.
- ◆ Стоимостная оценка основных фондов и нематериальных активов в разрезе их видов.
- ◆ Развитие МТБ ЦКП.
- ◆ Внутренние и внешние текущие затраты на научные исследования и разработки.
- ◆ Затраты на оплату труда работников.

Научные учреждения вправе самостоятельно выбирать, сколько и какие КРП использовать, чтобы отразить результативность своей деятельности.

Таким образом, каждая оценка представляет собой совокупность как числовых, так и качественных данных и базируется на анализе динамики показателей, межорганизационном сравнении, аудите степени достижения учреждением собственных целевых ориентиров. Вместе с тем агрегированные оценки не могут быть представлены простым числовым индексом. Эффективной альтернативой выступает концепция графического мониторинга (по аналогии со светофорной системой контроля исследований в программе Horizon Europe). Ее суть в том, что категоризация КРП верхнего уровня отражается с помощью четырехцветной матрицы индикаторов: от критического (красный, янтарный, янтарно-зеленый) до нормативного (зеленый) (табл. 2). Многие организации, в том числе некоторые государственные, для оценки результативности применяют составные качественные показатели, в которых комбинация оценок или мер объединена в одну метрику эффективности. Научные организации могут ограничиться трехкомпонентной шкалой индикации (например, красный, желтый, зеленый), хотя это и сопряжено с риском утраты

Цвет	Описание (результат, уровень риска)
Зеленый	Хорошо. Все идет по плану, низкий риск
Желто-зеленый	Удовлетворительно. В целом работа удовлетворительна, но есть некоторые вопросы, требующие решения
Желтый	Комплексное состояние. Существуют некоторые серьезные проблемы, которые могут нанести вред, если не будут устранены, средний риск
Красный	Серьезная опасность. Высокий риск для общей эффективности учреждения

Таблица 2. Определения «светофора» в рамках оценки результативности научно-исследовательской деятельности организации

Качество и востребованность научных исследований	Зеленый
Финансовая результативность научно-исследовательской деятельности	Желто-зеленый
Развитие исследовательского потенциала	Желто-красный
Международное сотрудничество и мобильность	Желтый
Исследовательская и материальная инфраструктура научной организации	Желто-зеленый

Таблица 3. Пример одностраничной сводки ключевых КРІ при оценке результативности научно-исследовательской деятельности организации

части значимой информации. Существуют и другие варианты расширения матрицы до 5 позиций (включая переходные сегменты «желто-красный» и «желто-зеленый»), что обеспечивает большую детализацию, но усложняет оценку.

Зеленый цвет означает, что конкретная политика или деятельность успешно развиваются без каких-либо серьезных рисков. Красный указывает на проблемную область, которая может угрожать результатам работы организации, если не будут приняты меры по исправлению положения. Менее значительные проблемы или те, которые не определены или все еще развиваются, могут быть обозначены желтым, желтым/зеленым или желтым/красным цветовыми сегментами.

Агрегированная оценка основывается на совокупности результатов самообследования, выбранных организацией КРІ для данного направления деятельности, а также на других релевантных внешних источниках информации по мере необходимости. Эта итоговая оценка переносится на одностраничный сводный лист визуализации (табл. 3).

Оценка результативности научно-исследовательской деятельности страны

Систематическое использование индикаторов КРІ поможет научным организациям сосредоточить свои усилия на действиях, необходимых для достижения целей и расширения масштабов исследований. С помощью представленных показателей работы может быть создан механизм, который позволит перенаправить бюджетное финансирование от слабых научных групп к сильным и конкурентоспособным, тем самым повышая общую эффективность науки. Для мониторинга деятельности научных организаций государственными органами необходимо утвердить регламент сбора и анализа сведений о результатах научно-исследовательских работ. Например, ежегодно по итогам календарного года научная организация должна прислать краткий отчет по каждому из 5 ключевых показателей эффективности первого уровня, включая таблицу самооценок (ответы на вопросы для самооценки) и вспомогательных критериев эффективности с соответствующими примечаниями и оценкой для каждого.

На основе анализа этих данных надзорные органы (например, ГКНТ) могут классифицировать научные учреждения по условным 3 категориям: лидеры (высокие показатели), стабильные структуры (удовлетворительная результативность) и аутсайдеры (отсутствие перспектив для дальнейшего роста). К внедрению системы оценки научных результатов необходимо подходить взвешенно, так, чтобы это действительно увенчалось повышением эффективности научной деятельности в масштабах государства, качества и значения научной сферы в социально-экономическом пространстве и не привело к механическому увеличению (без улучшения) надзора и регулирования, к усилению роли бюрократического аппарата. ■

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Постановление Государственного комитета по науке и технологиям Республики Беларусь от 20.04.2017 г. №9 (ред. от 19.11.2018) «Об утверждении Методических рекомендаций по оценке эффективности научных, научно-технических и инновационных разработок и их внедрения».
2. Еремина Г.А. Системы оценки эффективности деятельности: принципы создания и применения, освещение в научной литературе / Г.А. Еремина // <https://naukovedenie.ru/PDF/117EVN617.pdf>.



Как преодолеть ловушки стереотипов, или Методы повышения результативности НИР



Андрей Сартори,
главный специалист ОКБ им. А. Люльки –
филиала ПАО «ОДК-УМПО», кандидат
физико-математических наук, доцент



Анастасия Соловьева,
главный конструктор ОКБ
им. А. Люльки – филиала
ПАО «ОДК-УМПО» (г. Москва)

За последние годы в России разработан ряд мер стимулирования кооперации науки и промышленности с целью укрепления технологического суверенитета страны [1]. Они ориентированы, в частности, на повышение результативности НИР при разработке критических технологий. Их своевременность обусловлена тем, что, согласно недавнему анализу Счетной палаты, несмотря на значительную государственную поддержку, результативность исследований остается невысокой [2]. При этом внутренние затраты на исследования и разработки в процентах от ВВП за последние 20 лет снизились с 1,18 до 1,02% [3]. Для того чтобы догнать и перегнать технологических лидеров, нет иного пути, как повысить результативность науки. Несмотря на то, что такая задача ставилась еще 5 десятилетий назад [4], она остается актуальной и в наши дни [2, 5, 6]. Стоит отметить: устойчивое повышение результативности требует системного подхода, переосмысления стереотипов, трансформации системы управления НИР и внедрения единого понятийного базиса, направленного на сближение целей исполнителя и заказчика. В данном контексте перспективной представляется модель «квалифицированного заказчика» (КЗ) – инициатора высокотехнологичного проекта, четко формулирующего технологический запрос, требования к качеству на всех этапах реализации и его контроль, рассматриваемая в рамках нового формата государственного финансирования фундаментальных исследований «Госзадание 2.0», ориентированного на поддержку прикладных интересов бизнеса [7].

Этот проект, предложенный Минобрнауки Российской Федерации, интересен для анализа тем, что дает возможность квалифицированного заказчика (КЗ) на ранней стадии подключиться к формированию целей и критериев достижения планируемых результатов, осуществлять направленный поиск решения. Начальные этапы разработки инновационных подходов сопряжены с высокими рисками, а финансовые ограничения заказчика не благоприятствуют таким затратам. В этих условиях государственная поддержка призвана способствовать преодолению высокорисковых этапов НИР, чтобы по успешным проектам перейти к стадии ОКР с более обоснованным привлечением ресурсов заказчика.

Тем не менее простое выделение средств, как показал опыт, не решает проблему. В рамках программы «ГЗ 2.0» просматривается разноречивость целей, задач, этапов, критериев готовности и достоверности предлагаемых проектов. Исполнители нередко придерживаются стереотипных, но неоднозначных формулировок и не всегда готовы внедрять новые формы управления НИР для повышения их эффективности. Преодоление сдерживающих шаблонов возможно при условии разработки прозрачного пути трансформации, начинать который следует с общих правил выполнения НИР в интересах промышленного заказчика, что потребует кропотливой и системной работы. В первую очередь это должно касаться выявления наиболее распространенных стереотипов, препятствующих внедрению результатов научно-исследовательских работ, разработки мер по их преодолению.

В информационном пространстве недостаточно внимания уделяется собственно методикам и практикам повышения результативности НИР как способу получения большего результата при меньших затратах [8, 9]. Анализ зарубежной практики не эффективен по причине того, что все действующие подходы создания инновационного продукта строго охраняются компаниями в режиме ноу-хау и, являясь составляющей частью мер обеспечения конкурентоспособности, не публикуются. Пробелы отечественных методик особенно заметны в ходе выполнения поисковых НИР в модели «квалифицированный заказчик» при разработке новых технологических решений в его интересах [10]. Разбор некоторых из них дан в работах [11, 12].

Стоит отметить, что роль КЗ на этапе НИР также содержит ряд системных неопределенностей, пре-

пятствующих эффективной реализации прикладных проектов. К числу проблемных зон относятся отсутствие четкой регламентации форм участия заказчика в процессе выполнения НИР, недостаточная детализация прав на результаты интеллектуальной деятельности (РИД) и обязанностей сторон, механизмов распределения затрат на проведение испытаний (верификацию практической значимости), а также отсутствие правовых гарантий долгосрочного спроса на ожидаемые результаты разработок. Дополнительным фактором выступает размытость формулировок, а также зачастую необоснованное смешение фундаментальных и поисковых исследовательских задач в рамках одного проекта.

Для преодоления указанных ограничений предлагается трансформация существующей модели взаимодействия, базирующаяся на системной корректировке подходов к формированию технического задания, методике управления НИР. Она предполагает усиление роли заказчика в оперативном руководстве, конкретизацию целевых установок и цифровизацию критериев оценки промежуточных и итоговых результатов. Принципиально важным аспектом является создание единых как для исполнителя, так и для заказчика индикаторов выполнения НИР на разных этапах не только через призму академической значимости, но и с позиции практической применимости. Таким образом, одним из путей повышения результативности научно-исследовательских работ является устранение стереотипов во взаимодействии между заказчиком и исполнителями. В узком контексте речь идет о формировании единого понятийного базиса для построения на его основе методики бережливого управления НИР (адаптированной концепции бережливого производства для сферы инноваций и разработок) – «больше результата с меньшими ресурсами». Введение единой терминологической базы – первый и необходимый шаг для перехода к детальной проработке процессов планирования, реализации и контроля научно-исследовательской деятельности, обеспечения прозрачности и управляемости жизненного цикла разработки.

Стереотипы и привычки ученых затрудняют выполнение проектов КЗ, направленных на повышение конкурентоспособности изделий, поиск наилучших решений. Одно из наиболее устойчивых заблуждений – тезис о достаточности нормативной регламентации технического задания исключительно положениями государственных стандартов (ГОСТ Р 15.101-2021, <https://files.stroyinf.ru/Data/733/73306.pdf>).

Несмотря на то, что в них установлены базовые требования к оформлению документации, они не способны охватить все нюансы и особенности конкретного проекта. В реальности техническое задание должно быть гибким и адаптированным к специфике научной работы, стратегическим целям и прикладным задачам заказчика. Практика свидетельствует о том, что существующие нормативные процедуры допускают вариативность, необходимую для обеспечения прозрачности и целостности инновационного цикла «наука – технологии – инновационный продукт». Тем не менее отсутствие четких объективных критериев определения уровней технологической готовности, дефицит единого терминологического аппарата для гармонизации управленческих процессов между заказчиком и исполнителем создают серьезные риски для достоверности получаемых результатов. Следствием указанных методологических пробелов является снижение доверия со стороны промышленного сектора к результатам НИР. Зачастую индустриальные партнеры получают «сырые» технологии с низким уровнем готовности, что закономерно ведет к кратному увеличению сроков реализации и стоимости проектов [13]. В масштабах национальной экономики данная проблема приобретает стратегический характер, негативно отражаясь на темпах достижения технологического суверенитета страны.

Преодоление каждого из представленных ниже стереотипов послужит достижению главной цели – повышению конкурентоспособности изделия квалифицированного заказчика и в конечном счете росту его прибыли на основе внедрения инноваций. Главное требование к результату НИР в контексте исследования состоит в повышении его вклада в достижение конкурентоспособности, а точнее – вероятности ее достижения. С этой точки зрения творческого переосмысления требуют базовые, хорошо известные термины «инновации», «новизна», «эффективность», «технологии», «критические факторы», «превосходство», «инновационная концепция достижения превосходства» (гипотезы, идеи), «воронки технологий», «количественная оценка рисков», «объективные критерии готовности», «полнота и достаточность испытаний для верификации результатов» и пр.

Отдельно отметим, что поисковый НИР в интересах заказчика не следует отождествлять с фундаментальными исследованиями. В данном контексте критерии УГТ 1 – УГТ 3 уже ориентированы на решение специфической задачи заказчика.

Фундаментальные работы могут вестись параллельно, но они не в состоянии подменить поисковые. Причина проста. Она более полно раскроется в дальнейшем описании, но предварительно заметим, что все инструменты управления поисковым НИР в значительной степени зависят от требований к изделию, в интересах которого проводится поиск инновационных решений, в том числе условий, при которых они должны реализовываться. Постановка задачи фундаментального исследования на получение новых знаний об основных закономерностях природы может смещать фокус ученого от решения реальных задач КЗ, снижая тем самым результативность.

Существует опасное заблуждение, что во многих высокотехнологичных отраслях технологии уже достигли своего технического предела. В условиях жесткой конкуренции с мировыми промышленными гигантами традиционные методы роста производительности труда становятся недостаточными. Поэтому ключевым драйвером конкурентоспособности сегодня выступают инновации, основанные на результатах поисковых НИР и надежно защищенные в качестве объектов интеллектуальной собственности. Если на рынке появляются более эффективные аналоги, перспективное изделие мгновенно переходит в категорию «догоняющих», утрачивая рыночный потенциал. Смещение такой роли к лидерству не происходит автоматически – оно требует системных усилий.

Поисковые НИР – это всегда инновации, новые знания. С точки зрения конкурентоспособности важно не повторять опыт зарубежных коллег, а разработать собственный инновационный подход, опередить рынок. НИР – это шаг на территорию, которая еще не исследована. Раз так, никто не может гарантировать результат. Целесообразнее исходить из вероятностной модели успеха инноваций. На базисе цифровой оценки рисков предлагается построить критерии отбора альтернативных решений.

Поисковые НИР часто рождаются из фундаментальных работ, но живут по иным законам. Согласно жизненному циклу, успешные переходят в стадии проектирования, испытания, сертификации, подготовки и освоению производства и т.д. (ГОСТ Р 58849-2020, <https://files.stroyinf.ru/Data/733/73306.pdf>).

При этом зачастую одной из основных технологических причин задержки создания новой техники является переоценка полноты и достоверности результатов научно-исследователь-

ских работ, использование «сырых» решений при конструировании, возвраты на доработку критических технологий [13]. Причины представляются очевидными. Однако неясно то, как их преодолеть, осуществить бесшовный переход от НИР к ОКР и далее по жизненному циклу. Как отмечалось выше, простого решения, «золотой пули», пока не найдено. Скорее всего, необходима серьезная трансформация всех составляющих управления, в том числе определение критических элементов, постановка задач для повышения их характеристик, планирование по результатам и цифровая оценка технологических рисков, единообразие терминологии, выбор наименее рискованных альтернативных решений, интеграция технологии в изделие (систему), полнота и достаточность поэтапной верификации решения и др. [8, 9]. Каждая из них имеет важное значение, однако для целей исследования выделим наиболее существенные части: понятийный базис, принципы и критерии объективной оценки результатов НИР.

Специфика требований заказчика к результатам разработок во многом определяется жесткой ответственностью конструкторов за эксплуатационную надежность внедряемых новаций. Данное обстоятельство обуславливает консервативный подход к проектированию, исключающий использование недостаточно верифицированных технических решений, что особенно актуально для результатов поисковых НИР на ранних стадиях. Конструкторские службы зачастую не выступают в роли непосредственных потребителей научно-технической продукции и не располагают апробированными методиками оценки практической значимости результатов фундаментальных изысканий. Возникающий вследствие этого разрыв между учеными и конструкторами приводит к снижению результативности НИР, а также подрыву доверия промышленного сектора к результатам исследований вузов и научных учреждений, что зачастую является следствием неудачных попыток внедрения «незрелых» технологий в конечные изделия.

В следующей статье нами будут рассмотрены другие составляющие «Бережливого НИР», построенные на изложенном базисе, такие как выделение критических элементов, функциональный анализ, воронка технологий, полнота и достаточность испытаний, правила оценки рисков и отбор наименее рискованных концепций, планирование по результатам, детальные объективные критерии, независимая оценка уровней готовности, оперативное управление НИР и другие аспекты.

Актуальность темы

Повышение результативности научно-исследовательских работ – амбициозная задача, стоящая перед российскими и зарубежными учеными. В условиях ограниченного финансирования и растущей конкуренции перед каждым высокотехнологичным предприятием и квалифицированным заказчиком встает вопрос: как усилить роль НИР в повышении конкурентоспособности промышленной продукции? На кону значительные ресурсы, инвестируемые государством и частным бизнесом в инновационные разработки, в экосистему которых вовлечены вузы, исследовательские институты, отраслевые НИИ, технопарки, инженерные школы, стартапы и частные компании.

Дизайн исследования

Дизайн исследования базируется на комбинации качественных и количественных методов. Первые используются для формулировки общих закономерностей, целей и методов взаимодействия науки и бизнеса, основ для разработки теорий и концептуальных моделей, вторые – для практических рекомендаций по снижению рисков путем отбора альтернативных решений. Для выявления причинно-следственных связей и закономерностей, влияющих на результативность поисковых НИР, применен ретроспективный анализ процесса подготовки проектов технических заданий (ПТНИ).

Цель исследования – проанализировать «ловушки», создаваемые стереотипами базовых понятий в сфере поисковых НИР, выполняемых по запросам инновационных предприятий, и формулировка путей их преодоления.

Гипотеза: преодоление негативных последствий стереотипного мышления участников процесса поисковых исследований возможно на основе согласования прозрачных базовых понятий и реализации методики «Бережливый НИР». В частности, это достигается путем планирования и объективной оценки технологических рисков в совокупности с дополненными критериями уровней готовности технологии (УГТ, TRL – Technology Readiness Level) и производства (УГП, MRL – Manufacturing Readiness Level).

Детальное описание дополненных уровней готовности и их пошаговое применение для повышения результативности НИР будет описано в последующей статье.

Выборка

Для анализа стереотипов использован опыт подготовки проектов поисковых работ по запросам КЗ на бюджетные циклы 2026–2028 и 2027–2029 гг.

Для статистического обоснования применялись данные по рискам внедрения технологий с различным уровнем готовности, а также «воронки технологий» (на основе S-кривой и методики «Бережливый НИР») [8, 9]. Фундаментальные исследования и ОКР выходят за рамки данной работы и являются предметом отдельных изысканий.

Методы

При разработке мер по преодолению стереотипов и формировании методологии «Бережливого НИР» за основу взят синтез следующих подходов:

- *методы управления проектами (PMBOOK, Waterfall, Agile, Stage-Gate) [14, 15] – для структурирования работы, применения принципов поэтапного снижения рисков при прохождении контрольных точек по метрикам оценки результатов;*
- *методы практической системной инженерии (принципы декомпозиции и интеграции V-модели, функционального анализа и разработки альтернатив) [16]; для обеспечения междисциплинарного подхода, фокусирующегося на потребностях заинтересованных сторон, верификации и валидации результатов, а также рассмотрения жизненного цикла системы от замысла до утилизации (на основе методологии трансфера технологий [ГОСТ Р 71726–2024]);*
- *нормативная база и авторские методики: ГОСТ Р 71726–2024 «Трансфер технологий. Методические указания по оценке уровня готовности технологий (TRL, MRL)»; авторские методики «Бережливого НИР» (TRL+, MRL+); рекомендации GAO (General Accounting Office, US Government); статистические данные по результативности НИР в авиакосмической отрасли [17, 18].*

Обеспечение верификации методов основано на результатах экспертного обсуждения с исполнителями НИР и внесением корректировок в ТЗ с учетом выработанных рекомендаций по минимизации рисков.

Стереотипы и новые взгляды

СТЕРЕОТИП: «ИННОВАЦИИ – ЭТО ЛЮБОЕ НОВОЕ, УНИКАЛЬНОЕ РЕШЕНИЕ»

В литературе встречается более десятка определений инноваций. В рамках данной работы предлагается рассматривать их не как самоцель, а как результат НИР, обладающий подтвержденной ценностью для жизненного цикла изделия КЗ. Следовательно, в рамках нашего исследования вводится уточняющая классификация инноваций, опирающаяся на фильтр результативности, где новизна – обязательное, но не достаточное условие. Для квалифицированного заказчика она служит лишь средством получения преимуществ на рынке, достижения временной монополии за счет предложения изделия с высоким соотношением «цена – качество». Определим инновации как новое решение, позволяющее существенно повысить конкурентоспособность изделия заказчика, без которого это невозможно. Новизна выступает гарантом отсутствия возможности быстрого копирования такого продукта конкурентами. В этом случае резко ограничивается класс новых решений, которые можно признать инновациями, поскольку добавляются другие критерии, например себестоимость производства, ресурс, надежность, интеграция в изделие КЗ и др. Ключевое отличие предложенного определения в том, что если решение является новым, но не встраивается в цепочку создания стоимости ключевого заказчика или не обеспечивает измеримого отрыва от конкурентов, его следует классифицировать не как инновацию, а как изобретательскую активность или научный задел.

СТЕРЕОТИП «ИСПОЛНИТЕЛЬ И КЗ В РАВНОЙ СТЕПЕНИ ЗАИНТЕРЕСОВАНЫ В ПРАКТИЧЕСКОМ РЕЗУЛЬТАТЕ»

При подготовке заданий на НИР заказчик зачастую исходит из того, что неполная формулировка впоследствии будет скорректирована исполнителем, который так же, как и он, стремится к внедрению результатов. Как правило, итог данного подхода – частичное выполнение работ, формальная приемка разработки, недостаточная обоснованность технологии для использования при конструировании нового изделия, невозможность внедрения.

По факту приемка осуществляется по пунктам технического задания, и у квалифицированного заказчика нет аргументов требовать большего.

На наш взгляд, более продуктивен подход, когда отношения «исполнитель – заказчик» рассматриваются как конфликтные, поскольку интересы сторон разные: первому нужно «закрыть договор», второму – получить инновационное решение. Как и в иных спорных ситуациях, КЗ целесообразно опираться на единый понятийный аппарат и с его помощью скрупулезно прописать все условия договора, в том числе подготовить техническое задание, план, сформулировать проверяемые результаты этапов, убедиться, что участники трактуют их одинаково. Практические пути реализации изложены в методологии «Бережливый НИР».

СТЕРЕОТИП «ТРЕБОВАНИЯ К ТЕХНИЧЕСКОМУ ЗАДАНИЮ ОПРЕДЕЛЕННЫ В ГОСТАХ»

Эту установку можно признать верной в части формата технического задания ГОСТ Р 15.101–2021. Но когда речь идет о его содержании, то нормативные документы оставляют полную свободу действий заказчику. В процессе его реализации возникает совокупность вопросов, в том числе о том, как провести декомпозицию задачи на последовательные этапы, определить ожидаемый итоговый результат, методику, разработать и обосновать подходы к верификации с указанием соответствующих критериев, оценить достаточность доказательной базы, а также приоритизировать варианты технических решений, с тем, чтобы минимизировать риск возникновения тупиковых ситуаций на более поздних стадиях и предотвратить неэффективные траты ресурсов. Все эти проблемы напрямую влияют на результативность работ. Поэтому важно выработать простые пошаговые алгоритмы.

Попыткой детализировать задание в рамках данного стереотипа является требование исполнителя дать четкое задание на объект разработки. Однако такой подход справедлив на этапе ОКР, когда все основные технологические риски преодолены. В стадии НИР существует, как правило, дерево решений с высокими рисками, и неизвестно заранее, какая его ветвь будет успешной. Невозможно сразу сформулировать полный перечень исходных данных, критических факторов, так как они зависят от той концепции, которую только предстоит выбрать из технологической воронки в результате поэтапных испытаний.

СТЕРЕОТИП «ДОГНАТЬ, А ПОТОМ ПЕРЕГНАТЬ»

Зачастую в научной среде формулируются аргументы в пользу отказа от постановки амбициозных целей и предлагается подход, предусматривающий вначале воспроизведение уже полученных другими субъектами результатов, а затем – ускоренное «догоняющее» развитие с целью превзойти конкурентов. Данная логика, однако, не выдерживает критики. Действительно, известное решение доступно всем конкурентам, поэтому о преимуществах результатов НИР говорить сложно. Более того, пока оно будет внедрено, соперники уйдут далеко вперед. Этому факту нужно придать особое значение в условиях того, что инновации в некоторых странах развиваются вдвое быстрее, чем в РФ. Следовательно, к моменту повторения опыта других отставание удваивается [19].

СТЕРЕОТИП «НАША ЛАБОРАТОРИЯ ЗАНИМАЕТСЯ ДАННОЙ ТЕХНОЛОГИЕЙ 20–30–40 ЛЕТ, ПОЭТОМУ МЫ РЕШИМ ЗАДАЧУ КЗ ЛУЧШЕ ДРУГИХ»

Здесь и далее развивается тезис о том, что нет смысла рассчитывать на высокий уровень готовности технологии как таковой. Без привязки к конкретным условиям квалифицированному заказчику невозможно оценить ее реализуемость в продукте. Так, к примеру, международный опыт показывает, что вероятность внедрения технологии с уровня УГТ 1 [17, 18] в среднем не превышает 5%. Даже самая замечательная разработка может быть абсолютно неприемлема для решения конкретной задачи КЗ.

Следует подчеркнуть, что подход «от технологии/идеи», без учета требований заказчика, часто является основой развития стартапов, которые, как правило, занимаются созданием собственной инновационной задумки. Как свидетельствует статистика, 97% из них умирают в первые три года своего существования [20]. Идея, не учитывающая требований бизнеса, с большой вероятностью может оказаться тупиковой, не пройдя проверку на изделии КЗ.

Для решения проблемы КЗ больше подходит принцип «от задачи», когда тестируются и выбираются наиболее эффективные концепции, часто выходящие за пределы одной лаборатории. Таким образом обеспечивается современный уровень техники для цели, которая заявлена заказчиком, либо демонстрируется, что решение пока не найдено,

в том числе потенциальными конкурентами. Такой негативный результат может быть полезен КЗ для смены стратегии.

Квалификация исполнителя в контексте данной статьи определяется с точки зрения возможности решить проблему КЗ. При этом не столь важны научные публикации и диссертации, сколь умение довести технологию до высокой степени готовности. Это показатель обладания комплексом знаний по разработке под конкретное внедрение в интересах КЗ.

СТЕРЕОТИП «ИЗВЕСТНО БОЛЬШОЕ ЧИСЛО МЕТОДИК УПРАВЛЕНИЯ ПРОЕКТАМИ, НАШИ СОТРУДНИКИ ИМЕЮТ ДИПЛОМЫ (НАПРИМЕР, МВА), ЗАЧЕМ НУЖНА ЕЩЕ ОДНА?»

Вопрос важный. Действительно, существует более двух десятков методик управления проектами. Часть из них перечислена в разделе «Дизайн исследования». Лучший опыт их применения использован в «Бережливом НИР». Однако все они описывают организационные мероприятия, но не раскрывают специфику содержания самих поисковых работ, планирование по результатам, цифровое управление рисками и оценку выполнения задач для ранних НИР. В силу этого они не могут рассматриваться как полноценные практические рекомендации по выполнению наукоемких работ.

Противоречие заключается также в том, что имеющиеся методики построены на основе минимизации рисков. Но природа инновации парадоксальна: чем выше степень новизны и потенциал конкурентоспособности технологии, тем масштабнее сопутствующие риски. Вероятность успеха на начальных этапах (УГТ 1) составляет всего лишь несколько процентов. Поэтому нужны новые подходы и дополнения к существующим практикам, инструментарий, позволяющий управлять высокими рисками.

СТЕРЕОТИП «НИР – ЭТО ПРО ЧИСТУЮ НАУКУ, УЧЕНЫЕ ПОЛУЧАЮТ НОВЫЕ ЗНАНИЯ, А БИЗНЕС ПОТОМ ИХ ВНЕДРЯЕТ»

Разработка научных основ представляет собой исследование закономерностей природы. Даже при наличии четко сформулированной цели от КЗ ученые зачастую планируют не достижение цели, а проведение процесса исследований, предполагая впоследствии доработать решение для удовлетворения остальных критериев в последующих НИР.

С точки зрения чистой науки ученым не следует учитывать все критические факторы, касаться вопросов технологичности, себестоимости, ресурса, доступности материалов, интеграции в реальные условия эксплуатации изделия КЗ, правовых ограничений, конкуренции и ряда других критериев.

Воспользуемся доказательством от обратного. Допустим, что указанная позиция справедлива. Тогда КЗ, интегрировав разработанный без дополнительных требований макет критического элемента в свое изделие, с высокой вероятностью обнаружит, что оно не соответствует условиям конкурентоспособности по совокупности признаков. Возможно, будут выявлены и стоп-факторы, преодолеть которые эволюционным путем развития технологии невозможно. В таком случае потребуются возврат на более раннюю стадию создания критического элемента. Следовательно, проект задержится, а его стоимость возрастет, что фактически приведет к сдвигу сроков, удорожанию работ, отставанию от конкурентов.

Формирование долгосрочных бизнес-планов с применением дисконтирования и критериев эффективности в условиях, когда риски достижения результата велики, приводит к ложным завышенным ожиданиям и с большой вероятностью ведет к финансовым потерям КЗ.

С другой стороны, если тупиковый путь изготовления критического элемента по критерию «выгода/затраты» может быть выявлен на ранних этапах разработки, еще не поздно совершить разворот и смену инновационной концепции.

Важно отметить, что конструктор применяет в работе не закономерности, а экспериментальный образец, являющийся результатом оптимизации и воплощения этих закономерностей с учетом особых условий эксплуатации изделия.

Интересы КЗ более полно отражают постулаты системного менеджмента, требующие проведения анализа критических факторов, воронку решений, планирования по проверяемым результатам [16].

СТЕРЕОТИП «НОВИЗНА ИССЛЕДОВАНИЯ – ЭТО ОТКРЫТИЕ НОВЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ»

Существует важный момент, кардинально отличающий содержание поисковых исследований от привычных фундаментальных. Если рассматривать новизну как то, что никто ранее не делал, то КЗ

может резонно возразить: это не его задача. Новизна представляет собой необходимое, но далеко не достаточное условие.

Уникальность разработки часто сопряжена с дополнительными рисками, поскольку на данный момент отсутствуют обоснование, технологии, оборудование и компетенции для ее реализации. При этом ее ценность важна не сама по себе, а только как составная часть более широкого понятия конкурентоспособности, которое включает элементы производства, материалы, компетенции, себестоимость, ресурс, контролепригодность и другие аспекты.

На практике конкурентоспособность может быть обеспечена новым, неизвестным конкурентам или надежно защищенным решением, которое существенно повышает критерий «качество/цена» изделия КЗ. В таком случае КЗ может воспользоваться преимуществами временной монополии на рынке, увеличивая маржинальность при продаже продукта и, следовательно, компенсируя затраты на его разработку. Именно это создает финансовую основу для поддержки инноваций от бизнеса.

СТЕРЕОТИП «РЕЗУЛЬТАТИВНОСТЬ НИР – ЭТО ВЫПОЛНЕНИЕ ТЗ, ПУБЛИКАЦИЯ НОВЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ»

Разберем стереотип по частям. Нет сомнения, что выполнение технического задания – это обязательное условие завершения научно-исследовательских работ. Однако в отличие от ОКР конструкторам заказчика очень сложно прописывать ТЗ для НИР с конкретными техническими требованиями и составом работ. КЗ надеется на квалификацию исполнителя по анализу альтернативных решений, определению критических факторов и критериев успешного решения. Для повышения результативности ТЗ должно быть нацелено не на конкретные, как правило, уже достигнутые характеристики, а на определение выбора наилучшего инновационного решения на современном уровне техники. Некоторые критические и стоп-факторы могут проявляться только при углубленном изучении основ технологии по ходу выполнения работ. Поэтому формирование набора критических факторов становится одной из постоянных задач именно исследователя, а не КЗ, особенно на первых этапах НИР.

Несмотря на самостоятельную научную значимость выявленных закономерностей, для обеспечения прикладной эффективности в интересах заказ-

чика необходимо демонстрировать их реализацию при создании макетов и моделей критических элементов изделия. Только практическая апробация позволяет обосновать конкурентоспособность предлагаемых решений. При этом их верификация должна осуществляться в строгом соответствии с нормативными требованиями заказчика, с использованием его испытательной базы и специализированных образцов.

Публикация результатов, закрепляя научный приоритет авторов, не должна снижать конкурентоспособности разработок. Следствием этого является сохранение режима ноу-хау на способы реализации критических характеристик продукции КЗ. Таким образом, стремление опубликовать как можно больше статей может не соответствовать приоритетам заказчика.

Аналогичная ситуация с патентами. Раскрытие сути инновационных решений, контроль за нарушением прав сложен и не входит в интерес КЗ. Патентование – важная составляющая инноваций, повышения результативности, но его стратегия должна разрабатываться в зависимости от уровней готовности технологии по специальным требованиям. Это предмет отдельного исследования.

Наиболее важным проверяемым результатом поискового НИР является повышение уровня готовности технологии, определяемое по объективным критериям.

СТЕРЕОТИП «ТЕХНОЛОГИИ ВОЗМОЖНО ПРИСВОИТЬ ЕДИНЫЙ УГТ»

Часто в заявках на проведение НИР встречается требование оценить текущий уровень готовности технологии, чтобы охарактеризовать начальную точку исследований. Данный подход, несомненно, представляет собой серьезный шаг вперед по направлению к результативности, поскольку он ограничивает затраты на повторную разработку и верификацию, если уровень готовности уже был подтвержден ранее. Вместе с тем еще в первых ГОСТ (ГОСТ Р 58048-2017, <https://digital.gov.ru/uploaded/files/urovni-gotovnosti-tehnologii-gost-58048-2017.pdf>) по трансферу технологий отмечено, что одна и та же разработка для различных применений может иметь разные уровни готовности. Это в значительной степени справедливо для изделий КЗ, для которых УГТ должен удовлетворять специальному набору признаков. Именно они будут составлять основу для определения результатов на каждом этапе.

Следовательно, даже если технология в некотором воплощении достигла определенного уровня готовности, то для выполнения запроса заказчику нужно переоценить начальную точку применительно к специфическому набору критических факторов, характерных для его продукции.

СТЕРЕОТИП «УРОВЕНЬ ГОТОВНОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ОПРЕДЕЛЯЕТ РАЗРАБОТЧИК»

Данный подход тесно связан с комментариями к предыдущему пункту. Уровень готовности определяется верификацией по критическим факторам изделия КЗ, по полноте и достаточности испытаний. Опыт показывает, что исполнители завышают оценку УГТ на несколько ступеней. Однако как завышение, так и занижение УГТ снижают результативность НИР, поскольку служат ошибочной основой для планирования по времени и ресурсам.

Таким образом, путь к повышению готовности заключается в формулировке полного набора объективных критериев, прозрачности описания результатов для исполнителя, квалифицированного заказчика, внешнего независимого органа сертифицированной оценки УГТ.

СТЕРЕОТИП «НЕЛЬЗЯ РАЗРАБОТАТЬ ПЛАН НИР ПО СОЗДАНИЮ ТОГО, ЧЕГО ЕЩЕ НЕТ»

Существует устоявшийся шаблон подготовки плана работ с разбивкой по годам. По истечении этого периода исполнитель присылает КЗ отчет с формальным подтверждением выполнения заданий, указанных в техническом задании. Часто выясняется, что заказчик имел в виду совсем другое. Налицо различное толкование итоговых результатов. Но менять состав работ уже поздно.

Ранние уровни готовности характеризуются очень высокими рисками того, что результат будет полезен при конструировании нового изделия КЗ. При правильном управлении эти риски уменьшаются с возрастанием уровня готовности разработки. Для этого важно выполнение следующих основных условий:

- *пошаговая верификация по УГТ с возрастанием степени соответствия реальным условиям эксплуатации изделия КЗ;*
- *отбор наименее рискованных решений из воронки технологий;*

- *эволюция испытаний от только критических факторов до максимально возможной в лаборатории имитации реальных условий;*
- *факт достижения каждого уровня готовности определяется по расширенным объективным критериям, отражающим подтверждение конкурентоспособности в условиях КЗ.*

СТЕРЕОТИП «ТЕХНОЛОГИЯ – ЭТО ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА НА ОСНОВАНИИ ХАРАКТЕРИСТИК ЕДИНИЧНЫХ ОБРАЗЦОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЛАБОРАТОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ»

Ввиду особой важности в контексте задачи рассмотрим отдельно определение технологии. Есть ее общее понятие: «Совокупность методов, процессов и средств, используемых при производстве, изготовлении чего-либо» [21].

С точки зрения повышения результативности НИР такая трактовка может быть неоднозначно истолкована исполнителем и заказчиком, каждый из которых вправе интерпретировать результат разработки технологии в свою пользу.

С позиции КЗ, планирующего повысить конкурентоспособность своего изделия, технология должна использовать инновации для существенного повышения качества и снижения себестоимости составных частей изделия применительно к критическим факторам его эксплуатации. Однако, как уже отмечалось, она может иметь разные уровни готовности для применения в зависимости от эксплуатации. Исходя из этого верификация технологии для квалифицированного заказчика заключается в подтверждении свойств составной части изделия, изготовленной с ее применением. Она проводится на основе совокупности виртуальных и экспериментальных данных в соответствии с программой и методиками испытаний, зафиксированными в плане работ. Программа испытаний должна обеспечивать их необходимую и достаточную полноту, причем степень полноты возрастает по мере перехода на более высокие уровни технологической готовности.

Несмотря на некоторые различия, для простоты будем опираться на привычный термин «технология» для описания разработки всех инновационных продуктов (новых элементов конструкции, материалов, производственных процессов, алгоритмов, САЕ), понимая его необходимую коррекцию и специфическую терминологию для каждого продукта.

СТЕРЕОТИП «НАТУРНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ МОЖНО ЗАМЕНИТЬ ИСПЫТАНИЕМ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА»

Заявления о такой возможности встречаются все чаще, но при этом не учитывается тот факт, что любая виртуальная модель применима только в области, где она верифицирована достоверным экспериментом. За ее пределами корректность результата не гарантирована, иными словами, результат будет ошибочным. Таким образом, виртуальная модель должна быть надежно подтверждена на новых экспериментальных данных в определенном диапазоне изменения, в условиях влияния специфических внутренних и внешних критических факторов. Из сказанного следует, что для испытаний цифрового двойника нужно модель обучить на новых данных. После такой верификации ее можно использовать для прогнозирования уже изученных эффектов в заданных диапазонах изменения параметров. Предсказать новые инновационные свойства виртуальная модель не в состоянии.

СТЕРЕОТИП «РЕЗУЛЬТАТ ЭТАПА – МАКЕТ-ДЕМОНСТРАТОР»

В откликах исполнителей на проведение работ для КЗ встречается множество терминов, имеющих размытое определение. Например, результат – это макет-демонстратор. Для КЗ демонстратор – полномасштабный полнофункциональный элемент/составная часть изделия, верифицированный на все критические и второстепенные факторы, доступные для испытаний в лабораторных условиях, готовый к испытаниям в составе демонстратора изделия.

Не всегда исполнитель понимает данный термин так же полно. Есть ряд других важных определений, потенциально по-разному воспринимаемых исполнителем и заказчиком. Это приводит к различным толкованиям результата (образец, технология, работоспособность, уникальность, новизна, инновация и др.), часто выясняемым только при приемке, что в конечном счете приводит к тому, что КЗ не получает от НИР того, на что рассчитывал, к снижению эффективности.

Следовательно, путь к повышению результативности лежит в согласованных формулировках, единой управленческой терминологии, привязке определений к критериям уровней готовности.

СТЕРЕОТИП «УГТ 1, УГТ 2 И УГТ 3 – ЭТО ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ»

Данная позиция весьма распространена. Она является одной из основных причин снижения результативности НИР. В классическом определении уровень готовности технологий 1 – это формулировка концепции. Встает вопрос: концепции чего? Для исследований в интересах промышленности ответ очевиден: концепции решения задачи заказчика, не решенной другими доступными методами в условиях воздействия критических факторов нового изделия. В противном случае ученый предложит КЗ тратить внутренние ресурсы на НИР, в котором не учтены ключевые технические риски создания нового изделия, не выявлены стоп-факторы, наличие которых моментально может умножить на ноль вероятность внедрения. Более того, результатом называется изучение зависимостей некоторых параметров, а не подтверждение использования технологии в критическом элементе конструкции.

Из этого однозначно следует, что, начиная с УГТ 1, управление НИР должно содержать в критериях условия функционирования изделия заказчика, а это не свойственно фундаментальным наукам. Уровни технологической готовности могут развиваться параллельно с теоретическими исследованиями, но не отождествляться с ними. Такое часто встречается на практике, когда технология уже применяется промышленно, а теоретическое обоснование еще не найдено. В таких случаях эмпирический опыт и инженерные наработки опережают объяснение физических или химических процессов, лежащих в основе технологии. Однако в модели КЗ, ориентированной на создание инновационного продукта с заданными характеристиками, подобный разрыв допустим лишь как временное явление. Параллельные исследования помогут объединить усилия и компетенции конструкторов и ученых для ускорения разработок по сравнению с линейной моделью «научный задел, а потом производство».

СТЕРЕОТИП «КРИТЕРИИ УГТ ХОРОШО ИЗВЕСТНЫ, ОПИСАНЫ В ГОСТАХ»

Особую значимость приобретает проблема цифровизации критериев оценки уровней технологической готовности. Применяемые в ГОСТ Р 58048-2017 и Постановлении Правительства РФ №1552 [22] формулировки носят качественный характер, что

допускает их широкое толкование. Следствием этого является существенный разброс экспертных оценок: известны случаи, когда один и тот же результат квалифицировался специалистами в диапазоне от УГТ 2 до УГТ 6.

Необходимо подчеркнуть, например, что в соответствии с авиастроительными стандартами достижение уровня УГТ 6 свидетельствует о преодолении всех ключевых технологических рисков и служит достаточным основанием для применения технологии при конструировании. Напротив, ошибочная оценка технологии на более низких уровнях (УГТ 2, УГТ 3 или даже УГТ 4-5) при фактическом декларировании УГТ 6 неизбежно влечет негативные последствия внедрения неотработанных технологических решений, перечисленные ранее.

В нормативной практике предусмотрен механизм самооценки уровней готовности [22]. Однако отсутствие единого объективного базиса и достаточного набора верифицируемых критериев приводит к систематическому завышению результатов самооценки – например, с фактического УГТ 2 до заявленного УГТ 5. Как следствие, «сырые» технологии допускаются к применению в изделиях конечного назначения, что влечет за собой недоверие КЗ к результатам НИР и все сопряженные риски, в том числе задержки и повышение стоимости проектов при использовании инноваций.

Таким образом одна из задач, поставленных при разработке «Бережливого НИР», заключалась в детализации критериев готовности, повышении степени их прозрачности и объективности. Результаты будут изложены в последующих публикациях. ■

Продолжение следует.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Постановление Совета Федерации, Федерального собрания Российской Федерации «О мерах по обеспечению технологического суверенитета Российской Федерации». 2025 // <http://council.gov.ru/activity/legislation/decisions/168319/>.
2. Счетная Палата РФ. 2020. Отчет о результатах экспертно-аналитического мероприятия «Определение основных причин, сдерживающих научное развитие в Российской Федерации: оценка научной инфраструктуры, достаточность мотивационных мер, обеспечение привлекательности работы ведущих ученых» // <https://ach.gov.ru/upload/iblock/89d/89d7d756dab6d050a260ecc55d3d5869.pdf>.
3. Теряем позиции, помогая прямому врагу. Царьград 2026 // https://tsargrad.tv/articles/terjaem-pozicii-pomogaia-prjamomu-vragu-rossii-gotovjat-strashnoe-akademik-ne-vyderzhal-politika-prestupnaja_1650297.
4. Н.С. Хрущев. Доклад на Пленуме ЦК 1958 г. «Об ускорении развития химической промышленности и особенно производства синтетических материалов и изделий из них для удовлетворения потребностей населения и нужд народного хозяйства СССР» // <https://docs.historyrussia.org/ru/nodes/355264-postanovlenie-plenuma-tsk-kpss-7-maya-1958-g-ob-uskorenii-razvitiya-himicheskoy-promyshlennosti-i-osobennno-proizvodstva-sinteticheskikh-materialov-i-izdeliy-iz-nih-dlya-udovletvoreniya-potrebnostey-naseleniya-i-nuzhd-narodnogo-hozyaystva-sssr-izvlechenie>.
5. Заседание Совета по науке и образованию под председательством Президента, 2024, Дубна // <http://www.kremlin.ru/events/president/transcripts/deliberations/by-date/13.06.2024>.
6. Тенденции, факторы и механизмы повышения результативности отечественной науки: сборник статей Всероссийской научно-практической конференции с международным участием (13 июня 2023 г., г. Омск). – Уфа. 2023 // <https://aeterna-ufa.ru/arh-conf>.
7. В Минобрнауки России обсудили механизмы реализации проекта «Госзадание 2.0». 2026 // <https://minobrnauki.gov.ru/press-center/news/nauka-i-obrazovanie/99818/>.
8. Сартори А.В., Манцевич Н.М. Модель бережливого управления инновационными проектами на основе учета рисков и численной оценки экономической целесообразности выполнения этапов работ // Вопросы инновационной экономики. 2020. – Т.10. №4.
9. Сартори А.В. Повышение результативности исследований: планирование по уровням готовности в бережливом НИОКР. Экономика науки. 2022. №8 (1). С. 4–21 // <https://doi.org/10.22394/2410-132X-2022-8-1-4-21>.
10. Федеральный закон от 28.12.2024 №523-ФЗ «О технологической политике в Российской Федерации и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации». 2024 // https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_494804/b4e035586a7ae2621b918f302694294e912ef184/?ysclid=mq3mlmxrse723590690.
11. Потапова Е.В., Брянцева О.С. Институт квалифицированного заказчика как новый феномен промышленной политики России // AlterEconomics. 2025. №22 (4). С. 683–703 // <https://doi.org/10.31063/AlterEconomics/2025.22-4.7>.
12. Клыпин А.В., Агамирова Е.В., Жарова Е.Н. Модель «квалифицированного заказчика» в сфере НИОКР в России: определение основных свойств и характеристик // Управление наукой и наукометрия. 2019. Т. 14, №2. С. 224–247.
13. ИПУ РАН. Итоги Второй научно-практической конференции «Управление созданием научно-технического задела в жизненном цикле высокотехнологичной продукции – 2017» // <https://www.ipu.ru/press-center/42971>.
14. PMBOK GUIDE - A Guide To The Project Management Body of Knowledge (Sixth Edition) (6th ed.). 2017. Project Management Institute // <https://project-management.com/pmbok-guide-6-sixth-edition-a-book-review/>.
15. Wątróbski J., Jankowski J., Ziemia P., Karczmarczyk A., Ziolo M. Generalised framework for multi-criteria method selection // Omega (United Kingdom). 2019. №86. P. 107–124 // <https://doi.org/10.1016/j.omega.2018.07.004>.
16. Системная инженерия. Принципы и практика. Пер. с англ. под ред. В.К. Батовина. – М., 2014.
17. Mankins J.C. Technology Readiness And Risk Assessments: A New Approach. // Acta Astronautica. (2009b). V. 65. Issue 9. P. 1208–1215. // <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2009.03.059>.
18. Mavris D.N., Bandte O., Brewer J.T. (n.d.). A Method for the Identification and Assessment of Critical Technologies Needed for an Economically Viable HSCT. Retrieved April 20, 2021 // <https://smartechnology.gatech.edu/handle/1853/6364>.
19. «Если технология уже на хайпе – значит, вы опоздали». Коммерсант. Технологии. 2026 // <https://www.kommersant.ru/doc/8514281#teaserId=16355209&teaserType=articles&columnType=articles&screenKey=primaryColumnScreen>.
20. И. Голова. Только 3 процента малых предприятий России «живут» более трех лет // Российская Газета // https://rg.ru/2014/01/22/biznes-site-anons.html?ysclid=mq3ppw1bcq758526198&utm_referrer=https%3A%2F%2Fya.ru%2F.
21. Большой толковый словарь русского языка // [https://gramota.ru/poisk?query=технология&mode=slovari&dicts\[\]=42](https://gramota.ru/poisk?query=технология&mode=slovari&dicts[]=42).
22. Постановление Правительства РФ №1552 «О планировании технологической политики в Российской Федерации» // <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/412711715/>.

Республика Беларусь, наиболее пострадавшая от последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС, пожалуй, как ни одна страна в мире заинтересована в стабильном и безопасном функционировании объектов атомной энергетики. К этому прилагаются серьезные усилия государства в законодательном, техническом и кадровом направлениях. Безопасная работа Белорусской АЭС – результат труда огромной команды профессионалов. В этот процесс вовлечены все: ученые, спроектировавшие реактор и осуществляющие экспертизу безопасности, медики, экологи, строители, возводившие станцию, дежурные смены на пультах управления, а также представители регулирующего органа, следящие за соблюдением строгих стандартов.



Алексей Лукашевич,
заместитель генерального директора по научной работе Объединенного института энергетических и ядерных исследований – «Сосны» НАН Беларуси, кандидат технических наук

Безопасность современных АЭС:

совершенствование технологий в ядерной сфере



Безопасность на законодательном уровне

Национальная система нормативно-правового регулирования в сфере использования атомной энергии, ядерной и радиационной безопасности имеет иерархическую структуру, которая предусматривает подчинение требований документов более низкого уровня соответствующим пунктам нормативных актов, относящихся к высшим иерархическим ступеням (рис. 1) [1].

Главенствующими в этом смысле являются такие документы, как Закон Республики Беларусь №208-З «О регулировании безопасности при использовании атомной энергии» от 10.10.2022 г., Закон Республики Беларусь №198-З «О радиационной безопасности» от 18.06.2019 г., Указ Президента Республики Беларусь №137 «О регулировании деятельности в области использования атомной энергии и источников ионизирующего излучения» от 05.04.2021 г. и др. [2–4].

В частности, Законом «О регулировании безопасности при использовании атомной энергии» устанавливаются принципы, основными из которых являются:

- *приоритет обеспечения ядерной и радиационной безопасности и защиты жизни и здоровья населения и окружающей среды перед иными аспектами деятельности в области использования атомной энергии, в том числе экономическими;*
- *предоставление полной, достоверной и своевременной информации, связанной с регулированием безопасности при использовании атомной энергии, если эта информация не относится к той, распространение и (или) предоставление которой ограничено;*
- *обеспечение эффективного отделения регулирующих функций от других функций, связанных с содействием использованию атомной энергии;*
- *независимость органов государственного регулирования в области обеспечения безопасности при использовании*

- атомной энергии при принятии ими решений и осуществлении своих полномочий;*
- *ответственность за обеспечение безопасности;*
- *развитие атомной энергетики в мирных целях, в том числе запрет на производство ядерного оружия и других ядерных взрывных устройств;*
- *приверженность культуре безопасности на всех уровнях управления субъектами отношений в области обеспечения безопасности при использовании атомной энергии;*
- *обеспечение превышения выгод для населения от использования атомной энергии над вредом, который может быть причинен;*
- *участие юридических и физических лиц в общественных слушаниях на стадии принятия решений по регулированию деятельности в области обеспечения безопасности при использовании атомной энергии;*
- *защита жизни и здоровья населения и окружающей среды от негативного воздействия радиоактивных отходов в настоящее время и в будущем, невозложения чрезмерного бремени на будущие поколения;*
- *предотвращение ядерной и (или) радиационной аварий, обеспечения аварийной готовности.*

Далее рассмотрим, как эти базовые принципы реализуются на практике применительно к атомной электростанции (АЭС).

Итак, что же такое безопасность АЭС (ядерная и радиационная)? Это свойство такой станции при нормальной эксплуатации, а также при ее нарушениях, до проектных аварий включительно, ограничивать радиационное воздействие на персонал, население и окружающую среду установленными пределами, ослаблять указанное воздействие при запроектных (возникших по заранее не учтенным в проекте причинам) авариях, а также уменьшать степень вероятности возникновения любой аварии – то есть обеспечивать надежную защиту людей и природы от недопустимого радиационного воздействия в соответствии с действующим законодательством [5].



Рис. 1. Национальная система нормативно-правового регулирования Республики Беларусь

Концепция глубокоэшелонированной защиты

Безопасность АЭС должна обеспечиваться за счет последовательной реализации глубокоэшелонированной защиты, основанной на применении системы физических барьеров на пути распространения ионизирующего излучения и радиоактивных веществ в окружающую среду, и комплекса технических и организационных мер по защите барьеров и их эффективности, а также защите людей, работающих на станции или проживающих в зоне досягаемости выбросов, и природных объектов.

Система физических барьеров современных АЭС состоит из 4 составляющих, надежно защищающих от утечек излучений и радиоактивных веществ (рис. 2) [6]:

- **топливной матрицы, предотвращающей выход продуктов деления под оболочку тепловыделяющего элемента;**
- **оболочки тепловыделяющего элемента, не дающей продуктам деления попасть в теплоноситель главного циркуляционного контура;**

- **главного циркуляционного контура, препятствующего выходу продуктов деления под защитную герметичную оболочку;**
- **системы защитных герметичных оболочек, исключающих загрязнение продуктами деления природной среды.**

Система технических и организационных мер должна образовывать 5 уровней глубокоэшелонированной защиты.

Уровень 1. Условия размещения АЭС и предотвращения нарушений нормальной эксплуатации. Относится к этапу, когда осуществляется оценка и выбор оптимальной площадки, а также установление границ защитных и аварийных зон. Проектирование реакторной установки базируется на принципах консервативного подхода и внутренней самозащитности. Эксплуатация систем ведется в строгом соответствии с регламентами. Надежность оборудования поддерживается за счет непрерывного мониторинга, профилактического обслуживания и своевременной замены выработавших ресурс элементов. Проводится формирование штата АЭС из компетентных специалистов, способных обеспечить



Рис. 2. Система физических барьеров и системы безопасности

надежное функционирование объекта и оперативно реагировать на любые отклонения от нормы, включая аварии. Ключевым элементом подготовки является создание и поддержание высокого уровня культуры безопасности.

Уровень 2. Предотвращение проектных аварий системами нормальной эксплуатации. Проводится оперативный контроль для фиксации и ликвидации технологических отклонений. Реализуются меры по управлению энергоблоком при нарушении регламентных параметров с целью недопущения перерастания сбоев в аварийную ситуацию.

Уровень 3. Предотвращение запроектных аварий системами безопасности. Активация систем безопасности для блокирования цепочки развития аварии (исходных событий – в проектные аварии, а тех – в запроектные). При невозможности купировать инцидент – приведение в действие мер по локализации радиоактивных веществ для минимизации радиационного воздействия.

Уровень 4. Управление запроектными авариями. Обеспечение возврата энергоблока в контролируемое состояние с прекращением цепной реакции, непрерывным теплосъемом и удержанием радиоактивных веществ в установленных границах. Предотвращение развития аварийных процессов обеспечивается за счет интеграции специальных технических средств, а также систем нормальной эксплуатации и безопасности, сохранивших работоспособность. Особое внимание уделяется поддержанию прочности и герметичности защитной оболочки реакторной установки.

Уровень 5. Противоаварийное планирование. Организационно-техническая подготовка и практическая реализация мер экстренного реагирования. Направлены на защиту здоровья персонала АЭС и гражданского населения в зоне возможного радиационного воздействия.

Целевые ориентиры безопасности

Целевыми ориентирами безопасности АЭС являются 3 показателя непревышения суммарной вероятности (рассчитываются за временной интервал в 1 год) [5]:

- тяжелых аварий (для каждого блока АЭС) – 10^{-5} ;
- большого аварийного выброса (также для каждого блока) – 10^{-7} ;
- тяжелых аварий с хранилищами ядерного топлива (не входящих в состав энергоблоков) – 10^{-5} .

Приведенные цифры означают, что авария на блоке атомной электростанции или хранилище ядер-

ного топлива может произойти не чаще чем 1 раз в 100 тыс. лет, а большой аварийный выброс – не чаще 1 раза в 10 млн лет. Следует обратить внимание, что вероятность последнего в 100 раз меньше, чем самой тяжелой аварии. Это значит, что даже если реактор внутри разрушится, защитные барьеры (ловушка расплава, двойной купол) обязаны в 99% случаев удержать радиацию внутри здания.

Еще один интересный момент. Если бы на Земле одновременно работало 10 тыс. ядерных реакторов, то подобная авария могла бы произойти – теоретически – один раз в 1000 лет. На практике, по информации МАГАТЭ, во всем мире всего 515 реакторов – функционирующих, приостановленных или строящихся.

Эволюция реакторов (поколение III+)

Безопасная эксплуатация новейших АЭС обеспечивается за счет внедрения современных технических решений, направленных на предотвращение аварий и минимизацию последствий любых инцидентов.

Ключевые особенности реакторов поколения III+:

- **пассивные системы безопасности.** Реакторная установка способна охлаждать себя сама без участия человека и источников внешнего питания (за счет естественной циркуляции, силы тяжести и испарения-конденсации). В проекте Белорусской АЭС заложены 2 пассивные системы отвода тепла: через парогенераторы – СПОТ ПГ и от защитной оболочки – СПОТ ЗО (рис. 3). Первая из них предотвращает плавление активной зоны при любых тяжелых авариях, таких как полное обесточивание, полная потеря питательной воды, аварий с течью теплоносителя из первого контура и других, обеспечивает уменьшение радиоактивных последствий при возникновении протечек. Вторая (СПОТ ЗО) осуществляет долговременный отвод тепла от защитной оболочки при любых аварийных ситуациях, в том числе и при полном обесточивании АЭС;
- **система удаления водорода** (рис. 4). Она представляет собой множество небольших металлических приборов – пассивных каталитических рекомбинаторов водорода, которые расставлены по разным помещениям под куполом АЭС в зонах возможного скопления газа. Внутри рекомбинатора установлены пластины со специальным катализатором (обычно это платина или палладий). Когда водород соприкасается с ним, запускается экзотермическая химическая реакция: он соединяется с кислородом воздуха, превращаясь в обычный водяной пар без какого-либо пламени, искр или детонации;

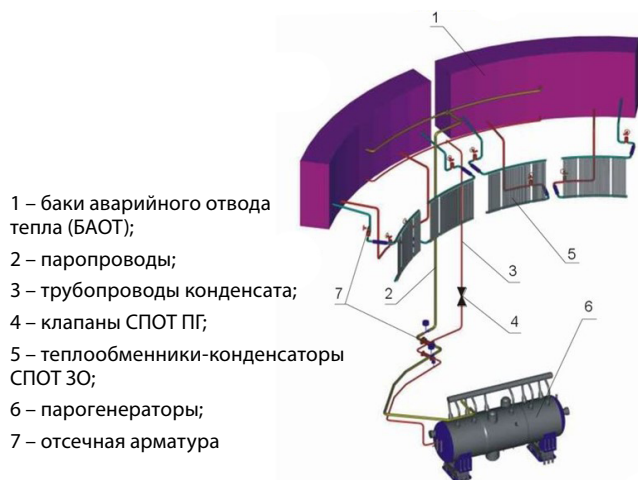


Рис. 3. Принципиальная схема СПОТ ПГ и СПОТ ЗО



Рис. 4. Рекомбинатор водорода

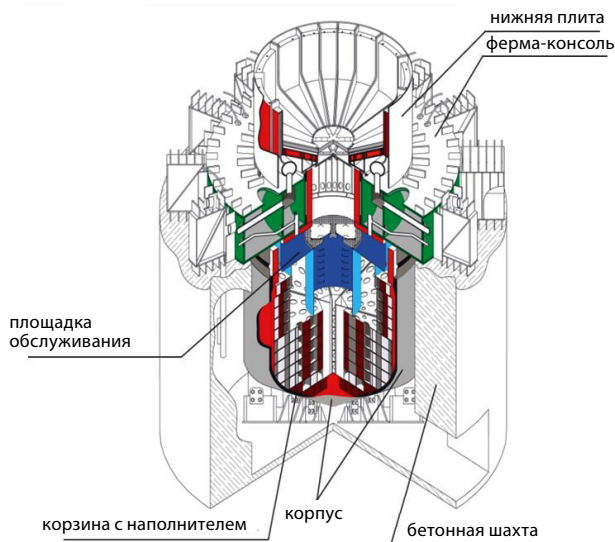


Рис. 5. Ловушка расплава

- **ловушка расплава (кориум-ловушка) (рис. 5).** Устройство локализации, представляющее собой металлическую конструкцию, наполненную особой смесью – «жертвенным материалом», которая позволяет в случае гипотетической аварии с плавлением топлива обеспечить охлаждение и отверждение расплава, а также удержание внутри себя радиоактивных газов и аэрозолей. При этом топливо и осколки элементов конструкции реактора находятся в условиях, исключающих образование цепной реакции. Впервые этим устройством была оснащена АЭС «Тяньвань» в Китае, построенная по российскому проекту, а сейчас оно предусмотрено также в проекте «АЭС-2006» [6];
 - **двойная защитная оболочка (контейнмент).** Внутренний купол удерживает радиацию, а внешний – защищает реактор от воздействий извне: землетрясений, ураганов, смерчей и даже прямого падения самолета;
 - **увеличенный срок службы.** Такие реакторы проектируются на 60 лет эксплуатации с возможностью продления еще на 20 лет;
 - **экономическая эффективность.** Повышенное выгорание топлива, сниженное количество отходов и высокий КПД энергоблока.
- Белорусская АЭС обладает всеми характеристиками поколения III+. Более того, для отечественной атомной станции указанные выше целевые ориентиры безопасности выполняются с запасом: показатель вероятности тяжелых аварий за 1 год составляет $8,57 \cdot 10^{-7}$ (1/год), среднее значение суммарной вероятности большого аварийного выброса за такой же период – $8,61 \cdot 10^{-8}$ (1/год) [7].

Международные инициативы, стресс-тесты и концепция практического исключения

В июне 2011 г. Республика Беларусь присоединилась к Совместной декларации Европейского союза и государств-соседей по проведению всеобъемлющей оценки рисков и безопасности АЭС (стресс-тестов) и приняла на себя обязательства по их осуществлению [8].

Авария на японской АЭС «Фукусима-1», произошедшая 11 марта 2011 г. из-за землетрясения и цунами, заставила операторов и регуляторов пересмотреть стандарты безопасности. Возникла необходимость детально изучить причины катастрофы, извлечь уроки и внедрить комплекс мер для предотвращения подобных (хотя и маловероятных) ЧС,

а также для защиты населения и экологии от их последствий.

Реакцией на события в Японии стали масштабные международные инициативы. Так, 25 марта 2011 г. Европейский совет инициировал пересмотр безопасности АЭС в Европе. Вслед за этим, в апреле 2011 г., участники 5-го совещания по Конвенции о ядерной безопасности приняли совместное заявление по аварии на «Фукусима-Дайити», в котором зафиксировали обязательства по переоценке надежности атомных станций и внедрению дополнительных защитных механизмов.

13 мая 2011 г. Европейская группа регуляторов ядерной безопасности (ENSREG) и Европейская комиссия согласовали технические требования для стресс-тестов для европейских АЭС (Декларация ENSREG, Приложение 1: «Спецификации стресс-теста ЕС»). В соответствии с техническими требованиями это меры целенаправленной переоценки атомных электростанций в свете произошедшего на Фукусиме-1. Они должны включать подробный анализ экстремальных природных явлений и их комбинаций, которые оказывают влияние на функции безопасности атомной станции и могут привести к тяжелой аварии.

Национальный доклад Республики Беларусь [8] содержит информацию о законодательной и регулирующей основе для обеспечения безопасности ядерных установок, характеристиках АЭС и ее защитной концепции. Стресс-тесты в рамках документа охватывают устойчивость станции к природным катаклизмам (землетрясениям, затоплениям, экстремальной погоде), а также сценарии с потерей электропитания и охлаждения. Отдельно проанализировано управление тяжелыми авариями и сформирован перечень практических шагов по повышению надежности АЭС.

Над докладом работала межведомственная группа при поддержке европейских экспертов. Результаты стресс-тестов показали, что системы безопасности Белорусской АЭС учитывают весь спектр внешних воздействий, а ее инфраструктура и оборудование спроектированы в соответствии с действующей нормативной базой.

Международные инициативы по повышению безопасности продолжились с введением Международной консультативной группой по ядерной безопасности (INSAG) и МАГАТЭ Концепции (принципа) «практического исключения».

Она состоит в том, что в проекте АЭС должно быть обосновано, что аварийные последовательности или явления, способствующие или приво-

дящие к неприемлемым радиологическим последствиям для населения или окружающей среды, физически невозможны, либо с высоким уровнем достоверности показано, что их реализация крайне маловероятна.

В 2024 г. МАГАТЭ впервые опубликовало руководство по безопасности №SSG-88 «Запроектные условия и применение концепции практического исключения при проектировании атомных станций». Результаты детерминистического и вероятностного анализа безопасности должны подтверждать практическое исключение ранних и больших аварийных выбросов в условиях запроектных и тяжелых аварий на АЭС.

Поколение IV. Будущее ядерной энергетики

Международный форум по ядерным системам IV поколения (The Generation IV International Forum – GIF), основанный в 2001 г., был создан для международного сотрудничества в этой сфере, а также обеспечения промышленного внедрения таких систем к 2030 г. В качестве технического секретариата организации выступает агентство по ядерной энергии OECD (NEA) [9].

GIF объединяет представителей различных стран для координации исследований и разработок в области этих систем. Специалисты остановили свой выбор на 6 реакторных технологиях: газоохлаждаемом быстром реакторе (GFR), свинцовоохлаждаемом быстром реакторе (LFR), реакторе на расплавленной соли (MSR), натриевоохлаждаемом быстром реакторе (SFR), реакторе с охлаждением сверхкритической водой (SCWR) и высокотемпературном реакторе (VHTR).

Для систем четвертого поколения определены 8 технологических целей в 4 широких областях: устойчивое развитие, экономика, безопасность и надежность, а также нераспространение и физическая защита. Эти амбициозные стремления разделяет большое количество государств, поскольку они направлены на удовлетворение экономических, экологических и социальных требований XXI в., создают основу и определяют конкретные задачи для сосредоточения усилий в области совершенствования реакторов.

В сфере устойчивого развития:

- *атомные энергетические системы IV поколения обеспечат устойчивую выработку энергии, отвечают целям по улучшению качества*

воздуха, а также гарантируют долгосрочную доступность систем и эффективное использование топлива для мирового производства энергии;

- позволять минимизировать и оптимизировать обращение с ядерными отходами, а также существенно снизить долгосрочную нагрузку на систему утилизации, тем самым улучшив защиту здоровья населения и окружающей среды.

В сфере экономики такие системы будут:

- обладать явным преимуществом в стоимости жизненного цикла по сравнению с другими источниками энергии;
- иметь уровень финансового риска, сопоставимый с другими энергетическими проектами.

Безопасность и надежность:

- эксплуатация ядерных энергетических систем IV поколения будет отличаться высочайшей безопасностью и надежностью;
- вероятность и степень повреждения активной зоны реактора в них будут очень низкими;
- применение таких систем устранил необходимость в выездных службах реагирования на чрезвычайные ситуации.

Нераспространение и физическая защита:

- системы атомной энергетики IV поколения не смогут быть использованы для кражи материалов, пригодных для создания оружия, а также обеспечат усиленную физическую защиту от террористических актов.

Все решения, касающиеся разработки новых реакторов, направлены на повышение их производительности, возможность применения атомной энергии в новых областях и/или более устойчивые подходы к управлению ядерными материалами. Высокотемпературные системы предоставляют возможность эффективного использования технологического тепла и, в конечном итоге, производства водорода. Повышение устойчивости достигается главным образом за счет внедрения замкнутого топливного цикла, включающего переработку и рециркуляцию плутония, урана и минорных актинов в быстрых реакторах, а также за счет высокой тепловой эффективности. Такой подход обеспечивает значительное сокращение образования отходов и потребности в урановых ресурсах.

Дополнительными характеристиками систем четвертого поколения будут:

- **цифровизация и кибербезопасность.** Переход на полностью цифровые автоматизированные

системы управления технологическим процессом (АСУ ТП). Изоляция критических сетей от Интернета для защиты от хакерских атак;

- **малые модульные реакторы.** Инновационные реакторы меньшей мощности. Их элементы производят на заводах, что повышает качество сборки и снижает риски при транспортировке и эксплуатации;
- **толерантное топливо (ATF).** Разработка новых видов ядерного топлива, устойчивого к потере теплоносителя. Оно предотвращает выделение водорода и исключает риск водородных взрывов.

Реакторы IV поколения станут ключевым элементом перехода к низкоуглеродной экономике после 2040 г. благодаря замкнутому топливному циклу и совместной генерации. В постнефтяной экономике ядерная энергетика обеспечит одновременное производство электричества и высокотемпературного тепла, необходимого для экологически чистой выработки водорода. Технологии IV поколения гарантируют максимальное использование урана за счет воспроизводства топлива, минимизируют объемы долгоживущих отходов путем рециклирования актинов и позволяют максимально соблюдать принципы нераспространения. ■

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Описание системы нормативно-правового регулирования ядерной и радиационной безопасности – 2026 // <https://gosatomnadzor.mchs.gov.by/zakonodatelstvo/opisanie-sistemy-normativno-pravovogo-regulirovaniya-yadernoy-i-radiatsionnoy-bezopasnosti/>.
2. Закон Республики Беларусь №208-З «О регулировании безопасности при использовании атомной энергии» от 10 октября 2022 г. // <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=H12200208>.
3. Закон Республики Беларусь №198-З «О радиационной безопасности» от 18.06.2019 г. // <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=H11900198>.
4. Указ Президента Республики Беларусь №137 «О регулировании деятельности в области использования атомной энергии и источников ионизирующего излучения» от 05.04.2021 г. // <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=P32100137>.
5. Нормы и правила по обеспечению ядерной и радиационной безопасности «Общие положения обеспечения безопасности атомных электростанций». Утверждены постановлением Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь №15 от 13.04.2020 г. // <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=W22035399p>.
6. Обеспечение безопасности АЭС – 2026. // https://www.rosenergoatom.ru/safety_environment/obespechenie-bezopasnosti/bezopasnost-aes/.
7. Национальный доклад Республики Беларусь о выполнении Конвенции о ядерной безопасности к 10 совещанию договаривающихся сторон, Минск, 2025 // <https://gosatomnadzor.mchs.gov.by/upload/iblock/5cc/kdul0t8vq01zgk4b83j7hbhysmgcbo30/Natsionalnyy-doklad-RB-2025-ru.pdf>.
8. Национальный доклад Республики Беларусь о целевой переоценке безопасности (стресс-тесты) Белорусской АЭС, Минск, 2017 // https://gosatomnadzor.mchs.gov.by/upload/iblock/88c/national-report-on-belarusian-npp-stress_tests.pdf.
9. The Generation IV International Forum – 2026 // <https://www.gen-4.org/>.



Татьяна Ковальчук-Рабчинская,
декан химического факультета БГУ,
кандидат химических наук, доцент

Фото Елизаветы Юшко-Садовской

Наука рождается там, где встречаются преданность делу, талант и мудрое наставничество. Мой собственный путь – тому подтверждение. Я глубоко убеждена, что состояться в науке, как и в семейной жизни, можно лишь тогда, когда встретишь «своего», близкого по духу человека. Здесь речь идет об особом родстве душ, и мне в этом плане очень повезло.

Понять химика может только химик: *о науке, любви и поиске баланса*

С начала таинственный мир химии мне открыла школьный учитель Лилия Халиловна Полуян, после чего я поняла, что не представляю себя без погружения в этот предмет. А позже настоящей «химической семьей» стал наш небольшой научный коллектив в БГУ во главе с доктором химических наук, профессором Натальей Васильевной Логиновой.

Началом своей жизни в науке считаю 2002 год. Тогда я, студентка пятого курса химфака, пришла писать дипломную работу под руководством Натальи Васильевны – в то время доцента кафедры неорганической химии. Нашу встречу нельзя назвать случайной, до этого она преподавала нам фармацевтическую химию, и я была потрясена ее профессионализмом, глубокой эрудицией, знанием современных научных тенденций и редкими человеческими

качествами. Признаюсь, несмотря на отличную учебу в университете, связывать жизнь с наукой я изначально не собиралась. Но у судьбы были свои планы. Наталья Васильевна разглядела во мне потенциал и предложила вместе с ее первой аспиранткой Анной Чернявской заняться разработкой абсолютно нового научного направления.

После окончания университета я поступила в аспирантуру. Мы начали исследования в области

синтеза и изучения свойств биологически активных комплексов переходных металлов с органическими соединениями дифенольного ряда. Основной целью было выявление перспективных субстанций для создания лекарственных средств широкого спектра действия. Через три года я успешно защитила диссертационную работу и стала кандидатом химических наук.

Сегодня нашему научному направлению исполнилось 25 лет. За это время были получены значимые фундаментальные и практические результаты, защищены кандидатские и докторская диссертации, которые в свое время были признаны лучшими. На моем счету более 180 научных публикаций, в том числе в 8 коллективных зарубежных монографиях, выступаю соавтором трех патентов на изобретения. Однако все эти достижения – плод нашего совместного, командного труда.

Принцип мудрой черепахи

Путь в настоящей науке никогда не бывает гладким, и я знаю это по собственному опыту. Когда я только начинала исследования, весь первый год мне казалось, что ничего не происходит, ежедневная работа сводилась к рутинным экспериментам и поиску информации. Только со временем я осознала, что сделанное в тот период можно сравнить с зернами пшеницы, прорастающими в земле, когда на поверхности всходов еще нет, а в глубине уже протекают важнейшие процессы. Наука – это терпение, скрупулезность и готовность к долгому ожиданию результата. Бывало, в наш коллектив приходили победители олимпиад, настроенные на быстрый триумф. Но, окунувшись в реальную «химическую кухню», как правило, через несколько месяцев они теряли запал и уходили.

Должна признаться, что химическая наука – это прежде всего поиск, который порой уводит на ложный путь. Так случилось у нас в самом начале, когда мы были уверены, что синтезировали новые соединения, а на деле оказалось, что получили слегка модифицированные исходные реагенты. В такой ситуации главное – разобраться, понять причину ошибки, не бояться пробовать вновь, не опускать рук. Не зря лозунгом нашей научной группы стала фраза: «У мудрой черепахи ничуть не меньше шансов дойти до финиша первой, чем у зайца».

Хорошо помню, как один из рецензентов престижного зарубежного журнала, куда мы отправили нашу первую научную статью, прислал отрицательный отзыв с множеством некорректных замечаний. Однако редактор, понимая несправедливость такого вердикта, посоветовала нам аргументированно ответить на все вопросы. Дискуссия длилась полгода, но мы смогли доказать свою правоту – эффекты действительно существовали, за ними стояло настоящее открытие. Впоследствии в этом журнале мы опубликовали более 18 статей, а наш руководитель Наталья Васильевна Логинова была приглашена туда в качестве рецензента.

Рецепт счастья, или Здоровая одержимость

Справляться со сложностями мне помогала невероятно теплая и семейная атмосфера в нашем научном коллективе. У нас никогда не было жесткой дистанции между руководителем и подчиненными. Отношения скорее напоминали семью, где старшие поддерживают младших, а любые неудачи –



С любимым руководителем Натальей Васильевной Логиновой

и в лаборатории, и в личной жизни – становятся общей заботой. Это помогало воспринимать трудности не так остро и болезненно. И к промахам, и к успеху я привыкла относиться спокойно, потому что для меня это лишь очередная ступень, подтверждение верного или не совсем правильного курса. В одном я уверена: сам путь намного интереснее конечной точки. Научный поиск вообще схож с работой детектива, где важен каждый факт. Даже отрицательный результат бесценен, ведь именно из таких деталей в итоге складывается пазл под названием «открытие». Я глубоко убеждена: чтобы достичь успеха в любой сфере, каждое твое действие должно быть безупречным. Именно скрупулезная точность в мелочах, внимание к едва заметным нюансам формируют настоящий профессионализм.

Наукой невозможно заниматься «немножко», эта сфера требует полной самоотдачи. Так было и в моей жизни. Я буквально жила в лаборатории, проводила там все выходные дни... Порой казалось, что, если бы на химфаке разрешили оставаться на ночь, я бы с радостью

пользовалась такой возможностью. Пожалуй, без определенной доли здоровой одержимости большой результат просто невозможен. При этом я всегда занималась любимым делом и никогда не воспринимала его как тяжелую работу. Сегодня, вручая дипломы выпускникам нашего факультета, я часто желаю им найти призвание по душе. Ведь если ты искренне любишь то, что делаешь, тебе не придется преодолевать извечное «через не могу» ни одного дня. И этот рецепт счастья я проверила на личном примере.

Химия любви

Конечно, при таком невероятно интенсивном режиме работы на личную жизнь времени практически не оставалось. Казалось, встретить человека, который разделит и примет этот безумный ритм, почти нереально. Однако жизнь и здесь оказалась мудрее: моим мужем стал коллега по кафедре – такой же одержимый наукой ученый. В этот момент я окончательно осознала, что только химик по-настоящему поймет химика. И муж-коллега –

это невероятный дар судьбы! Даже вне работы, оставив за порогом лабораторию, мы можем вести жаркие научные дискуссии, вместе искать выходы из сложных ситуаций, и главное – с глубоким пониманием относиться к бесконечной занятости друг друга. И все же самый сложный поиск в моей жизни продолжается – это поиск хрупкого баланса между любимой работой и временем, которое я могу уделять детям. Их у меня двое – сыну и дочке 8 и 9 лет. Они с младенчества привыкли к маминной занятости, но, когда в 2023 г. меня назначили заместителем декана химического факультета по учебной работе, нагрузка возросла лавинообразно, и времени стало не хватать катастрофически. Дети с глубокой обидой воспринимали этот внезапный дефицит внимания. Но мы учимся проходить этот путь вместе, ведь любовь, как и наука, требует терпения и умения слышать друг друга, поддерживать и принимать все как есть.

Руководящая должность в тандеме с исследовательской работой – это колоссальная ответственность. Именно поэтому сейчас эта сфера требует моего максимального внимания. За мной стоит большая команда, от решений руководителя зависят судьбы многих людей, и для меня принципиально важно оправдывать их доверие. Даже в редкие выходные мозг продолжает непрерывно прокручивать варианты решения накопившихся дел и проблем. Порой плата за это слишком высока – случается, что из-за неотложных задач я пропускаю дни рождения собственных детей. Поиск той самой золотой середины все еще продолжается.

На мой взгляд, сочетание руководящей должности и научной деятельности неизбежно воспитывает жесткую самодисциплину,



Умение слышать друг друга – главное в семье

предельную организованность и четкость – без этого выжить в таком ритме невозможно. При этом я остаюсь сомневающимся человеком, которому прекрасно знаком так называемый синдром самозванца. Я глубоко убеждена, что руководитель не может быть прав абсолютно во всем. Все ключевые решения должны приниматься с учетом мнения коллег и в диалоге с ними. Только так рождается здоровая, уважительная атмосфера в коллективе, когда люди с удовольствием по утрам идут на работу. А настоящая сила лидера – в умении открыто признавать свои ошибки и первому брать за них ответственность.

Без вдохновения нет результата

Мои источники энергии – моя семья, научный коллектив и хобби, бесконечно далекое от формул и отчетов. Знаменитая фраза «отдых – это смена деятельности» для меня не просто слова, а настоящее спасение. Готовить я обожаю еще со школы, а вот печь торты – почти профессионально, с азартом, начала после рождения детей. И знаете, это безумно похоже на химический синтез комплексов переходных металлов, которым я занимаюсь больше двадцати лет. В обоих процессах магия рождается одинаково: без терпения, четкого расчета и вдохновения ничего не получится. Вот уже много лет мои близкие задувают свечи только на моих кондитерских шедеврах.

Мощный драйв и чистую, до слез, радость мне подарило волонтерство. Долгое время я пекла торты для детей, которые проходят тяжелейшее лечение в онкологическом центре. Видеть, как загораются глаза этих мужественных ребят, когда они получают торт



Хобби, которое дарит радость не только себе, но и другим

своей мечты, созданный моими руками, – это ни с чем не сравнимое счастье. В такие моменты ты понимаешь, ради чего стоит творить и двигаться дальше.

Второе мое увлечение – танцы, которыми я начала заниматься еще в аспирантуре. Эта активность дарила мне потрясающую вечернюю разрядку и эмоциональное обновление после дня напряженного интеллектуального труда. К сожалению, в определенный момент жизнь поставила передо мной выбор, и я сделала его в пользу химии. Совмещать серьезную науку и многочасовые ежедневные репетиции оказалось просто невозможно. Пути разошлись, но я искренне горжусь тем, что коллеги по паркету впоследствии стали чемпионками мира в групповом выступлении.

Оглядываясь назад, я понимаю: в каких бы сферах я ни пробовала реализовать себя, секрет успеха во всех начинаниях оставался неизменным. Каждое мое достижение соткано из упорства, искреннего трудолюбия и стремления к безупречности в каждой детали. ■

Правила жизни

- *Делать работу качественно на всех ее этапах и уровнях.*
- *Не ждать благодарности и признания окружающих за свою деятельность, но благодарить их за коммуникацию и любую помощь.*
- *Уважать окружающих и коллег, осознавать ценность любого труда, пусть даже и не интеллектуального.*
- *Спокойно относиться к успехам, высоким должностям, оценивать это как правильность выбранного пути, но не конечный результат.*

Прадпрымальніцкая дынастыя Пуслоўскіх на тэрыторыі Беларусі ў канцы XVIII – пачатку XX ст.



Аляксандр Бурачонок,
дэкан факультэта
сацыякультурных камунікацый
Беларускага дзяржаўнага
ўніверсітэта, кандыдат
гістарычных навук, дацэнт

Сямейныя капіталы, назапашаныя пакаленнямі прадпрымальнікаў, – гэта не толькі фінансавыя рэсурсы, але і ўнікальны багаж ведаў, вопыту і традыцый. Укладзеныя ў развіццё бізнесу, адукацыю і дабрачыннасць, такія сродкі зазвычай становяцца магутным рухавіком эканамічнага і сацыяльнага прагрэсу. У гісторыі сусветнага прадпрымальніцтва адным з яскравых перыядаў распаўсюджвання сямейнай справы з’яўляецца перыяд генезісу і развіцця капіталістычных адносін у грамадстве. Менавіта тады быў закладзены фундамент найбуйнейшых сусветных карпарацый, каля вытокаў якіх сталі Ротшыльды, Апенгеймы,

Валенбергі, Берынгі і інш. Прыкладна ў гэты ж час істотныя трансфармацыі ў прамысловай, гандлёвай, фінансавай сферах Расійскай імперыі адбываліся дзякуючы намаганням Траццяковых, Рабушынскіх, Марозавых, Бахрушыных. Прадстаўнікі названых і шматлікіх іншых прадпрымальніцкіх сем’яў паднялі на новы ўзровень не толькі расійскую эканоміку, але і адукацыю, культуру і сацыяльную сферу.

Уваходжанне беларускіх зямель у склад Расійскай імперыі ў выніку трох падзелаў Рэчы Паспалітай і ўключэнне іх у сістэму агульнарасійскага рынку сталі каталізатарам фармавання капіталістычных дачыненняў ва ўсіх сферах эканомікі Беларусі. Адначасова адбывалася транс-

фармацыя не толькі дзелавага, але і сацыякультурнага асяроддзя. Асаблівасць беларускіх губерняў у тым, што першапачаткова заснавальнікамі новых прадпрымальніцкіх дынастый тут выступалі выхадцы не з сялянства і купецтва, а са шляхты, паколькі ў канцы XVIII – першай трэці XIX ст. прадстаўніцтва вышэйшага саслоўя ў сацыяльнай структуры на гэтых тэрыторыях было больш значным, чым у цэнтральных губернях Расійскай імперыі. Менавіта ў гэтым атачэнні фарміраваліся новыя тагачасныя сямейныя бізнесы, заснавальнікі якіх падзялялі сістэму каштоўнасцей Расійскай імперыі і былі падрыхтаваны да ажыццяўлення актыўнай эканамічнай дзейнасці ва ўмовах агульнарасійскага рынку.

Аналізуючы вынікі працы такіх дынастый на тэрыторыі Беларусі ў перыяд станаўлення і развіцця капіталізму, варта спыніцца на сям’і Пуслоўскіх, розныя пакаленні якой зрабілі істотны ўнёсак у дынаміку эканамічнага, сацыяльнага і культурнага жыцця нашай краіны. І ў першую чаргу варта звярнуцца да бацькі-заснавальніка бізнес-імперыі Пуслоўскіх – чалавека, які валодаў унікальным



Выява герба Шэліга, якім карыстаўся род Пуслоўскіх



Войцэх і Уладзіслаў Пуслоўскія.
Фрагменты партрэтаў

прадпрымальніцкім талентам, энергіяй і бачаннем перспектывы.

Са школьных падручнікаў вядомы той факт, што прадвадзіцель дваранства Слонімскага павета, сапраўдны стацкі саветнік Войцэх Францавіч Пуслоўскі быў піянерам механізаванай вытворчасці на тэрыторыі Беларусі. Ён паходзіў са старажытнага беларускага роду герба «Шэліга», вядомага на Слонімсчыне прыкладна з XV ст. Нягледзячы на тое, што ў розныя часы прадстаўнікі гэтага сямейства прыклалі шмат намаганняў, каб яго праславіць [1], сапраўдную вядомасць род атрымаў дзякуючы здольнасцям Войцэха Францавіча. Менавіта ён заклаў падмурак для будучага росквіту дынастыі і прывіў сваім дзецям любоў да занятку прадпрымальніцтвам.

Пасля трэцяга падзелу Рэчы Паспалітай Войцэх Пуслоўскі набыў маёнтак Хомск у Кобрынскім павеце Гродзенскай губерні, у якім у 1798 г. заснаваў найбуйнейшую на той час на тэрыторыі Беларусі суконную мануфактуру. У 1819 г. на прадпрыемстве працавала звыш 340 чалавек, а ў 1828 г. тут з'явілася паравая машына – такім чынам, мануфактура перайшла на наступную ступень прамыс-

ловага развіцця, ператварыўшыся ў фабрыку. Прыкладна ў гэты ж час прадпрыемства было аснашчана 54 ткацкімі станкамі, 35 прадзільнымі машынамі і іншым абсталяваннем. Штат супрацоўнікаў на той момант налічваў ужо 550 чалавек, сярод якіх у вытворчасці былі задзейнічаны тры майстры з ліку замежных падданных, адзін інспектар і адзін механік. У выніку пералічаных удакладненняў фабрыка за 1828 г. вырабіла амаль 30 тыс. м розных тканін, большасць якіх была рэалізавана ў цэнтральных губернях Расійскай імперыі [2].

Больш чым за тры дзесяцігодзі плённай дзелавой актыўнасці Войцэх Францавіч стаў буйным землеўласнікам. У Віленскай, Гродзенскай, Магілёўскай і Мінскай губернях сям'і Пуслоўскіх належаў шэраг населеных пунктаў з колькасцю жыхароў амаль 15 тыс. чалавек мужчынскага полу. Толькі ў Слоніmsкім павеце Гродзенскай губерні ва ўласнасці прадпрымальніка знаходзіліся шэсць маёнткаў, два фальваркі і адна вёска. Гаспадарчыя ўгоддзі В. Пуслоўскага ўяўлялі сабой своеасаблівы камбінат, дзе сельскагаспадарчая сыравіна перапрацоўвалася ў гатовую прадукцыю, якая

потым паступала на агульнарасійскі рынак. З гэтай мэтай у шматлікіх маёнтках былі заснаваны вінакурныя заводы; для камплектавання дадзеных прадпрыемстваў медным посудам быў арганізаваны яго выраб на мануфактуры ў маёнтку Шыдлаўцы Слонімскага павету Гродзенскай губерні. На вытворчасці тканін, акрамя ўжо названай Хомскай фабрыкі, спецыялізаваліся яшчэ два прадпрыемствы В. Пуслоўскага ў Слоніmsкім павеце: адно размяшчалася ў фальварку Альбы, другое – у мястэчку Косава. Для забеспячэння суконных фабрык сыравінай ва ўладаннях прадпрымальніка развівалася танкарунная авечкагадоўля. На той час яму належала найбуйнейшая на тэрыторыі Беларусі гаспадарка па развядзенні мерыносовых авечак – статак налічваў каля 40 тыс. галоў [2, 3].

Войцэх Пуслоўскі, ствараючы ўласную прамысловую імперыю ў заходняй частцы тэрыторыі Беларусі, думаў не толькі пра задавальненне ўласных амбіцый і патрэб, але і пра тое, каб стварыць фінансавы фундамент для сваіх нашчадкаў. У 1799 г. ён паклаў пачатак новай дынастычнай лініі, ажаніўшыся з Юзефай Францаўнай – прадстаўніцай

старажытнага княжацкага роду Друцкіх-Любецкіх. Існуе меркаванне, што менавіта паспяховая прадпрымальніцкая дзейнасць і інтэлектуальныя здольнасці забяспечылі імклівы ўзлёт эканамічнай і палітычнай магутнасці фамільнага клана Пуслоўскіх і Любецкіх у першай палове XIX ст. [4]. У шлюбе ў Войцэха і Юзэфы нарадзілася сямёра дзяцей. Менавіта пра іх лёс клапаціўся галава сямейства, калі выбудоўваў траекторыі свайго бізнесу. Так, Войцэх і Юзэфа Пуслоўскія ў сваім лісце ад 30 жніўня 1828 г. да члена Дзяржаўнага савета, часова выконваючага абавязкі міністра ўнутраных спраў Расійскай імперыі Ф.І. Энгеля адзначалі, што іх спадкаемцы будуць карыстацца атрыманымі з прадпрыемстваў Пуслоўскіх даходамі, але адначасова з гэтым застанецца памяць аб дзейнасці прамысловых устаноў на карысць жыхароў расійскай дзяржавы [3].

Пераемнасць – ключавы аспект існавання і росквіту прадпрымальніцкіх дынастый. Валодаючы шэрагам дзелавых якасцей, Войцэх Пуслоўскі добра разумеў, што перадача бізнесу прадстаўнікам новага пакалення – складаны і шматгранны працэс, які патрабуе стараннай падрыхтоўкі і планавання. Важна не толькі пера-

даць актывы і рэсурсы, але і прывіць спадкаемцам прадпрымальніцкі дух, любоў да сваёй справы і гатоўнасць да інавацый. Аднак гаворка ідзе не толькі аб перайманні фармальнай улады, але і захаванні каштоўнасцей і традыцый прадпрыемства. Неабходна, каб новыя гаспадары не проста працягвалі справу сваіх продкаў, але і прыўносілі ў яе нешта новае, сваё, захоўваючы пры гэтым пераемнасць дынастыі.

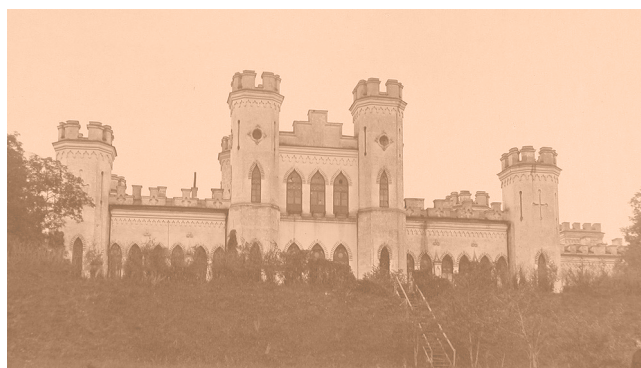
Умелае спалучэнне традыцый і інавацый – залог доўгатэрміновага поспеху. Гэта добра бачна ў далейшай дзейнасці другога сына Войцэха і Юзэфы Пуслоўскіх – Уладзіслава. У 1825 г. ён атрымаў ад бацькі маёнтак Таўрагіні ў Ковенскай губерні, дзе пасля заканчэння вайскавой службы спасцігаў асновы прадпрымальніцтва, займаючыся сельскагаспадарчай вытворчасцю [5].

Напрыканцы свайго жыцця, у 1832 г., Войцэх Пуслоўскі заснаваў яшчэ адну суконную мануфактуру ў маёнтку Шыдлаўцы. У 1840 г., калі гэтымі землямі ўжо валодаў Уладзіслаў, на прадпрыемстве працавалі амаль паўтысячы чалавек, а яго гадавая вытворчасць ацэньвалася ў 96,5 тыс. руб. [6]. Прадстаўнік новага пакалення Пуслоўскіх на месцы пашкоджанага пажарам сядзібнага дома

ў Шыдлаўцах пабудаваў новы, а саму сядзібу перайменаваў у Альберцін у гонар свайго бацькі (другое імя Войцэха было Адальберт). У Пуслоўскі павялічыў вытворчасць на прадпрыемствах, якія перайшлі да яго ў спадчыну, а таксама пашырыў прамысловую імперыю, заснаваўшы новыя суконную і папяровую фабрыкі. Машыны для іх працы ён набываў у Англіі і Францыі, дзякуючы чаму прадукцыя была высокай якасці і, як вынік, карысталася вялікім попытам па ўсёй Расійскай імперыі, у тым ліку і на найбуйнейшым у той час Ніжагародскім кірмашы. У 1857 г. вырабы Альберцінскай суконнай фабрыкі ўпершыню былі адзначаны малым срэбным медалём на Варшаўскай мануфактурнай выставе. Удзел прадпрымальнікаў у такога кшталту мерапрыемствах з'яўляўся немалаважнай умовай дасягнення поспеху, паколькі там можна было і зрабіць сабе рэкламу, і пераняць вопыт іншых гаспадароў. Уладзіслаў Пуслоўскі працягваў справу свайго бацькі па распаўсюджванні паравых машын. Ён быў адным з пайшчыкаў «Общества пароходства по Волге», якое было заснавана ў 1843 г.; апроч таго, яму належаў параход «Вісла», які курсіраваў паміж Пінскам і Крэменчугом [5, 7].



Выява прамысловага комплексу ў Альберціне на этыкетцы прадукцыі Пуслоўскіх



Косаўскі замак падчас Першай сусветнай вайны

Характэрная рыса сапраўдных прадпрымальніцкіх дынастый – клопат не толькі пра ўласны дабрабыт, але і пра будучыню родных мясцін і іх жыхароў, унёсак у развіццё сацыякультурнага асяроддзя таго рэгіёну, дзе праяўляецца дэлавая актыўнасць. І тут варта ўзгадаць самага малодшага сына Войцэха Пуслоўскага – Вандаліна, які атрымаў у спадчыну мястэчка Косава ў Слоніміскім павеце Гродзенскай губерні і працягваў у гэтай мясцовасці справу свайго бацькі. У 1838 г. па яго ініцыятыве тут пачалося будаўніцтва неагатычнага палацу ў выглядзе абарончага замка па праекце Францішка Яшчалда. Кожная зала ў палацы мела індывідуальна аформлены інтэр’ер з пэўным дамінуючым колерам, які вызначаў назву той ці іншай залы. У іх размяшчаліся дэкаратыўныя каміны, дарагія габелены, дываны, скульптуры. Вакол палаца быў закладзены парк, які налічваў звыш 150 найменняў дрэў і кустоў. Вандалін працягваў таксама справу бацькі па фарміраванні кніжнага збору. Ва ўрочышчы Мерачоўшчына, якое ўваходзіла ў склад Косаўскага палацава-паркавага комплексу, размяшчалася багатая бібліятэка. У ёй захоўваліся разнастайныя выданні – хронікі, статуты Вялікага Княства Літоўскага

і кнігі па яго гісторыі, дзённікі, успаміны, нататкі навукоўцаў, слоўнікі і шматтомныя энцыклапедыі, у тым ліку і выданне Вялікай французскай энцыклапедыі. Варта адзначыць, што нашчадкі Вандаліна Пуслоўскага не пайшлі па слядах свайго бацькі, а Косаўскі палацава-паркавы комплекс пасля смерці яго заснавальніка быў прададзены за 700 тыс. руб. Частка багатай бібліятэкі была перавезена ў мястэчка Свіслач Ваўкавыскага павету Гродзенскай губерні і стала ўласнасцю дачкі Вандаліна – Марты Красінскай [8, 9].

Вяртаючыся да асобы Уладзіслава Пуслоўскага, варта адзначыць, што ён не толькі заснаваў у Альберціне магутны прамысловы комплекс, але і здолеў ператварыць гэты маёнтак у сапраўдны помнік культуры. На месцы былога сядзібнага дома быў пабудаваны новы, які ўвабраў у сябе характэрныя рысы позняга класіцызму. У сядзібе мелася багатая бібліятэка, у якой налічвалася некалькі дзясяткаў тысяч тамоў кніг, архіў дакументаў, якія ўтрымлівалі інфармацыю аб прадстаўніках роду Пуслоўскіх і іншых блізкіх родаў пачынаючы з XV ст. Асаблівае месца ў сядзібным доме займала карцінная галерэя, у якой былі прадстаўлены эскізы Леанарда да Вінчы і Пітэра Рубенса,

карціны Пітэра Брэйгеля, Давіда Тэнірса [10] і іншых знакамітых італьянскіх і галандскіх майстроў XVII–XVIII ст. Уладзіслаў працягваў традыцыі дабрачыннасці, якія былі закладзены яго бацькам. Войцэх Пуслоўскі, у свой час узначальваючы Віленскае дабрачыннае таварыства, штогод выдаткоўваў сродкі для магчымасці атрымання адукацыі хлопчыкамі з сям’яў сваіх служачых і дробнай шляхты. Уладзіслаў таксама штогод накіроўваў пэўную частку прыбытку сваіх маёнткаў на выхаванне ад 16 да 20 маладых людзей з малазабеспечаных сямей, утрыманне навучальных устаноў пры яго прадпрыемствах, развіццё медыка-сацыяльнай сферы і інш. [5].

Пасля смерці Уладзіслава Пуслоўскага ў 1859 г. адзін з яго сыноў, Франц, узяў у свае рукі кіраўніцтва прамысловым комплексам і працягнуў традыцыі, закладзеныя яго дзедам. Важнае значэнне па-ранейшаму мела Альберцінская суконная фабрыка, якая адчула на сабе мадэрнізацыю: напрыканцы 1870-х гг. тут налічвалася 22 часальных і 15 прадзільных машын, 80 ручных і 50 механізаваных ткацкіх станкоў. У вытворчым працэсе было задзейнічана 475 працоўных, намаганнямі якіх было выраблена прадукцыі агульным коштам амаль 255 тыс. руб. [11]. Трэба



Сядзіба ў Альберціне
(пачатак XX ст.)



Бібліятэка Пуслоўскіх у Альберціне
(пачатак XX ст.)

дадаць, што вырабы Альберцінскай суконнай фабрыкі падчас кіравання ёй Ф.У. Пуслоўскім экспанаваліся на Сусветнай выставе 1873 г. у Вене (адзначаныя медалём заслугі), Усерасійскіх выставах 1882 і 1896 гг. (на абедзвюх узнагароджаныя срэбнымі медалямі) [7].

Варта заўважыць, што жыццёвыя шляхі прадстаўнікоў дзевяці дынастыяў – гэта не толькі гісторыя поспехаў і росквіту, але і чарада ўзлётаў і падзенняў, трыумфаў і крызісаў. У гісторыі прадпрыемства можна знайсці мноства прыкладаў, калі сямейныя прадпрыемствы, здавалася б, дасягнуўшы небывалых вышынь, нечакана аказваліся на мяжы банкруцтва. Прычыны маглі быць рознымі: неэфектыўнае кіраванне, састарэлыя тэхналогіі, змена рынкавай кан'юнктуры, палітычныя ўзрушэнні і інш. Аднак, нягледзячы на ўсе цяжкасці, многія дынастыі здолелі ўстаць на ногі і пайсці далей. Сакрэт іх выжывання – у гнуткасці і адаптыўнасці. Яны своечасова мянялі стратэгію, укаранялі інавацыйныя тэхналогіі, асвойвалі новыя рынкі і г.д. І пры гэтым – захоўвалі вернасць сваім каштоўнасцям і традыцыям, што дапамагала ім пераадолюваць любыя цяжкасці.

Падобнае здарылася і ў прадпрыемствах Пуслоўскіх. З цягам часу аб'ёмы вытворчасці на суконным прадпрыемстве ў Альберціне зніжались, што было звязана з развіццём унутранага рынку і ростам попыту на больш танныя і якасныя тканіны (у тым ліку баваўняныя). У гэтых умовах Ф.У. Пуслоўскі ў 1894 г. перапрафіляваў суконную фабрыку ў шоўкакруцільню, на якой у 1900 г. было створана прадукцыі на суму 24,6 тыс. руб. [12]. Зразумела, што нават на пачатак XX ст.

гэта быў зусім не высокі даход для такога прадпрыемства. У сувязі з гэтым Франц Уладзіслававіч здаў фабрыку ў арэнду дасведчаным вытворцам шоўку, якія ў 1903 г. заснавалі паявое «Товарищество “Якогама” Альбертинской шелкокрутильни». У склад праўлення гэтай кампаніі ўваходзілі маскоўскія купцы Дзмітрый Блюм і Іван Дзмітрыеў, а таксама Сейго Камейчы Натсуакі – японскі падданы, прадстаўнік таварыства «Хара» ў г. Якагама. Чысты прыбытак фірмы за першы аператыўны год склаў 27,1 тыс. руб. [13] – крыху больш, чым даход прадпрыемства пры кіраванні ім Ф.У. Пуслоўскім. Аднак руска-японская вайна і расійская рэвалюцыя 1905 г. унеслі свае карэктывы ў далейшае маскоўска-якагамскае супрацоўніцтва, у выніку чаго было прынята рашэнне аб ліквідацыі бізнесу. На змену паявому таварыству ў маёнтак Альберцін у 1906 г. прыходзіць французскі капітал у асобе таварыства акцыянернага – «Ж. Боньфуа і К°», пры гэтым кампаніяй працягвае валодаць сям'я Пуслоўскіх [14], кіраванне справамі якой перайшло ў 1908 г. да Уладзіслава Францавіча.

Прадпрыемствы, якія належалі Пуслоўскім, не спынялі сваю працу да Першай сусветнай вайны, а іх гаспадары і арандатары памяталі аб тых традыцыях, якія былі закладзены Войцэхам Францавічам і падтрымліваліся наступнымі пакаленнямі гэтай прадпрыемстваў дынастыі. ■

Артыкул падрыхтаваны ў межах выканання НДР «Дынаміка сацыяльна-культурнага асяроддзя Беларусі пад уплывам росту прадпрыемстваў актывнасці ў другой палове XIX – пачатку XX ст.» (№ дзярж.рэгістрацыі 20250994), якая выконваецца па дагаворы з БРФФД №Г25-073 ад 02.05.2025 г.

СПІС ВЫКАРЫСТАНЫХ КРЫНІЦ

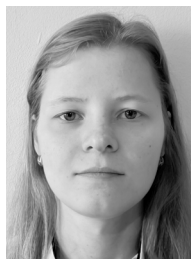
- Семенюга Т. Пусловские: магнаты-промышленники / Т. Семенюга // Плана: Беларусь и мир // 2022. №1. С. 40–47.
- Матэрыялы да гісторыі мануфактуры Беларусі ў часы распаду феадалізму / Беларуская акадэмія навук, Ін-т гісторыі імя М.Н. Пакроўскага; адказны рэд. В.К. Шчарбакоў; тэхнічны рэд. і кар. Д.І. Даўгяля. – Мн., 1934–1935. №1: 1796–1840; Мн., 1934. С. 198, 201, 202, 250.
- Матэрыялы да гісторыі мануфактуры Беларусі ў часы распаду феадалізму / Беларуская акадэмія навук, Ін-т гісторыі імя М.Н. Пакроўскага; адказны рэд. В.К. Шчарбакоў; тэхнічны рэд. і кар. Д.І. Даўгяля. – Мн., 1934–1935. №2: I. Статыстыка 1841–1864. II. Урадавыя мерапрыемствы 1793–1861; Мн., 1935. С. 274.
- Раяк А.Р. Неформальныя сувязі паміж дваранствам Гродзенскай губерні ў 1801–1863 гг. / А.Р. Раяк // Пытанні мастацтвазнаўства, этналогіі і фалькларыстыкі / Цэнтр даследаванняў беларускай культуры, мовы і літаратуры НАН Беларусі; навук. рэд. А.І. Лакотка. – Мн., 2016. Вып. 21. С. 240–246.
- Сборник биографий кавалергардов [1724–1899] по случаю столетнего юбилея Кавалергардского Ея Величества Государыни Императрицы Марии Федоровны полка. Т. 3: 1801–1826. – СПб., 1906. С. 380, 381.
- Улащик Н.Н. Предпосылки крестьянской реформы 1861 г. в Литве и Западной Белоруссии / Н.Н. Улащик; [отв. ред. В.Т. Пашуто; АН СССР, Ин-т истории]. – М., 1965. С. 273.
- Киштымов А.Л. Школа капитализма: очерки истории предпринимательства Беларуси конца XVIII – начала XX в. / А.Л. Киштымов; науч. ред. С.П. Витязь; НАН Беларуси, Центр исследований белорусской культуры, языка и литературы. – Мн., 2025. С. 56.
- Федорук А.Т. Старинные усадьбы Берестейщины / А.Т. Федорук; ред. Т.Г. Мартыненко. – Мн., 2004. С. 398–399.
- Березкина Н.Ю. Библиотеки и распространение научных знаний в Беларуси: XVI–XX вв. / Н.Ю. Березкина. – 2-е изд., испр. и доп. – Мн., 2013. С. 174.
- Федорук А.Т. Старинные усадьбы Гродненщины: Свислочьский район, Слонимский район / А.Т. Федорук; авт. предисловия, послесловия, науч. ред. О.Н. Попко. – Мн., 2022. С. 59–60, 62.
- Указатель фабрик и заводов Европейской России с Царством Польским и Великим княжеством Финляндским: материалы для фабрично-заводской статистики / под ред. П.А. Орлова. – СПб., 1881. С. 17.
- Список фабрик и заводов Европейской России / под ред. В.Е. Варзара. – СПб., 1903. С. 81.
- Указатель действующих в Империи акционерных предприятий и торговых домов / под ред. [и с предисл.] В.А. Дмитриева-Мамонова [в 2 т.]. – СПб., 1905. Т. 2 [Торгово-промышленные предприятия]. С. 1244–1245.
- Список фабрик и заводов России / Министерство финансов и Министерство торговли и промышленности. – М., 1910. С. 81.

Аннотация. На примере генетически модифицированных химерным антигенным рецептором (CAR) естественных киллерных клеток (NK) рассмотрены достижения последних лет в области иммунотерапии онкологических заболеваний. С учетом биологических особенностей NK-клеток определены основные преимущества и особенности активно развивающегося направления в области медицинской генной инженерии – технологии CAR-NK. В отличие от CAR-T, CAR-NK демонстрируют сниженный риск побочных реакций, что позволяет создавать универсальные аллогенные конструкции. Врожденная способность NK-клеток распознавать опухолевые клетки независимо от комплекса МНС усиливается за счет дополнительных генетических модификаций, включая вставку генов провоспалительных цитокинов. Перспективным направлением остается преодоление иммуносупрессивного микроокружения солидных новообразований, а также повышение устойчивости NK-клеток к апоптозу. Текущие клинические испытания подтверждают безопасность и эффективность CAR-NK при злокачественных новообразованиях, что стимулирует дальнейшие разработки в этом направлении.

Ключевые слова: химерный антигенный рецептор (CAR), CAR-NK, цитокины, иммунотерапия, генная инженерия.

Для цитирования: Лебедева Ю., Вашкевич Е., Белевцев М. Технология CAR-NK: новые шаги в лечении онкологических заболеваний // Наука и инновации. 2026. №9. С. 79–83.

<https://doi.org/10.29235/1818-9857-2026-09-79-83>



Юлия Лебедева,
младший научный сотрудник
лаборатории иммунологических
исследований РНПЦ детской
онкологии, гематологии и
иммунологии;
lebedevaula859@gmail.com



Екатерина Вашкевич,
старший научный
сотрудник РНПЦ
детской онкологии,
гематологии и
иммунологии;
immunology@oncology.by



Михаил Белевцев,
заместитель директора
по науке РНПЦ детской
онкологии, гематологии и
иммунологии, кандидат
биологических наук, доцент;
belevtsev_m@mail.ru

Технология CAR-NK:

новые шаги в лечении онкологических заболеваний

УДК [616:155.33:577.175.14]:57.08

Значительный прогресс в области генетической инженерии привел к разработке принципиально нового подхода в лечении онкологических заболеваний, основанного на применении модифицированных химерным антигенным рецептором иммунных клеток, в частности Т и NK, – наиболее изученными объектами для применения этой технологии. Для получения CAR-продукта можно использовать клетки пациента, однако в данном случае и CAR-T, и CAR-NK объединяет общий недостаток – сниженный пролиферативный потенциал после лечения с помощью химиотерапии. Решением данной проблемы выступает переход на аллогенный продукт. Преимущество в данном случае принадлежит NK-клеткам, применение которых, в отличие от CAR-T, сопряжено с существенно более низким риском развития таких побочных эффектов, как реакция «трансплантат против хозяина», синдром высвобождения цитокинов, нейротоксичность, вторичный гемофагоцитарный лимфогистиоцитоз [1].

NK-клетки могут быть получены из различных источников. Наиболее доступный среди них – периферическая кровь. Выделенные из нее экземпляры имеют зрелый фенотип, характеризующийся наличием готовых к активации KIR-рецепторов. Около 90% данных клеток относятся к субпопуляции CD56dimCD16bright, что

обуславливает их высокую цитотоксическую активность и степень дегрануляции после встречи с мишенью. Более низкая цитотоксичность свойственна NK-клеткам пуповинной крови. Они обладают большим пролиферативным потенциалом, характеризуются высокой экспрессией хемокина CXCR3 и низкой – CD16, KIR, DNAM, гранзима B.

Важно отметить, оба эти типа требуют времени для экспансии, которая длится от 7 до 21 дней в присутствии интерлейкинов IL-2 или IL-15, стимулирующих рост и активацию NK-, или в присутствии фидерных клеток: линии K562, HFWT, периферической крови и др. [2].

Также применяются для получения CAR-NK стволовые клетки: они легко подвергаются модификации, но этап их дифференцировки считается трудозатратным. В свою очередь клеточные линии (например, NK-92, NKG, YT) опухолевого происхождения как один из источников NK-клеток имеют свои преимущества – высокий уровень экспансии и простоту модификации – и недостатки: дефектный фенотип (отсутствие рецептора CD16, обеспечивающего антителозависимую клеточную цитотоксичность) и сниженную персистенцию вследствие облучения перед инфузией [3].

С учетом перечисленных особенностей каждого из источников их выбор определяется возможностями лаборатории. Полученные CAR-NK можно хранить, подвергнув криоконсервации, и использовать по принципу «off-the-shelf», который подразумевает создание банка готовых к применению клеток от универсального донора, минуя этап индивидуальной подготовки клеточного продукта.

Одно из преимуществ CAR-NK – способность проявлять реакцию «трансплантат против лейкоза» (РТПЛ), но возможное отторжение аллогенных NK-клеток, вызванное распознаванием CD8+ Т-лимфоцитами пациента чужеродных HLA-I, может снижать эффективность их применения. В работе [4] в 2025 г. была реализована попытка устранить данный недостаток с помощью технологии CRISPR/Cas9. В результате были получены CAR-NK клетки с нокаутированными HLA-I генами. Они дополнительно экспрессировали молекулу PD-L1, которая при связывании с рецептором PD-1 на поверхности CD8+ и других субпопуляциях Т-лимфоцитов реципиента запускала их апоптоз.

Противоопухолевая активность CAR-NK может быть подавлена ингибирующими KIR (Killer-cell immunoglobulin-like Receptor) донора (KIR2DL1, 2DL2/3, 3DL1, 3DL2), связавшись с лигандами на клетках-мишенях пациента – HLA-I (HLA-A, HLA-C1/C2, HLA-Bw4). KIR могут быть заблокированы при помощи моноклональных антител, например Lirilumab (связывается с KIR2DL1/2/3). Предпочтительнее выбирать донора, набор ингибирующих KIR которого не распознает HLA-I пациента, при этом имеются активирующие KIR2DS1, KIR2DS2, KIR3DS1. Принцип несоответствия пары ингибирующих KIR/HLA используется и при трансплантации гемопоэтических стволовых клеток реципиенту. Однако в одном из ретроспективных исследований было показано, что у детей с острым миелоидным и лимфоидным лейкозами (ОМЛ и ОЛЛ) данный подход, в отличие от взрослых, не снижал риск рецидива. В другом случае при изучении гаплоидентичной трансплантации несовме-

стимость по KIR способствовала 65% выживаемости в сравнении с 51% у совместимой по KIR/HLA, а присутствие у донора гаплотипа KIR с активирующим рецептором KIR2DS2 повышало выживаемость больных до 69%.

Можно отметить, что при исследовании экспрессии генов KIR реципиента после трансплантации уровень мПНК, ингибирующих KIR (KIR2DL1/2, и KIR3DL1), возростал, а активирующих KIR донора (KIR2DS1, 3, 4, 5) варьировал, постепенно повышаясь в течение 3 мес. после трансплантации [5].

Подбор донора и выбор источника NK-клеток подводит к задаче конструирования и оптимизации CAR-рецептора. Любой CAR состоит из обязательных компонентов: внеклеточного домена (scFv, Single-chain variable Fragment), обеспечивающего распознавание несущей его клеткой молекулы-мишени; трансмембранного домена, функционирующего как якорь в мембране и обуславливающего гибкость и кластеризацию рецептора; внутриклеточного домена, передающего активационный сигнал внутрь клетки, вызывая ответ. Домен scFv отвечает за специфичность несущих его клеток к поверхностным молекулам и, следовательно, определяет уклон получаемого продукта в определенную нозологию.

С помощью данных сайта www.clinicaltrials.gov нами было проанализировано разнообразие мишеней, против которых создавались CAR-NK. Среди 69 исследований, находящихся на стадии набора пациентов, в сумме на мишени-маркеры В-клеточных лимфом и лейкозов CD19, CD22 и CD70 приходится 34,8% клеточных продуктов; против мишени множественной миеломы (BCMA) – 13%; против мишеней миелоидного

происхождения CD123, CD33 и CLL-1 – суммарно 11,6%; против антигена эпидермального фактора роста (протоонкоген HER2) – 8,6%; антигена трофобластных клеток (TROP2) – 7,2%. Также встречаются единичные испытания, где были получены CAR-NK против маркеров нейробластомы (GD2, B7H3), рака предстательной железы (PSMA) и рака яичника (CLDN6). Можно заключить, что, несмотря на многообразие мишеней, наиболее эффективными для терапии CAR-NK по-прежнему являются антигены гемобластозного происхождения (CD19/22/70, BCMA и др.), что обусловлено их доступностью для иммунных клеток и отсутствием репрессирующего опухолевого микроокружения, как в случае с терапией солидных опухолей.

Не менее широк и выбор других компонентов CAR-рецептора. К его внеклеточной части относится шарнирный домен (участки IgG1/4, CD8a, CD28), способству-

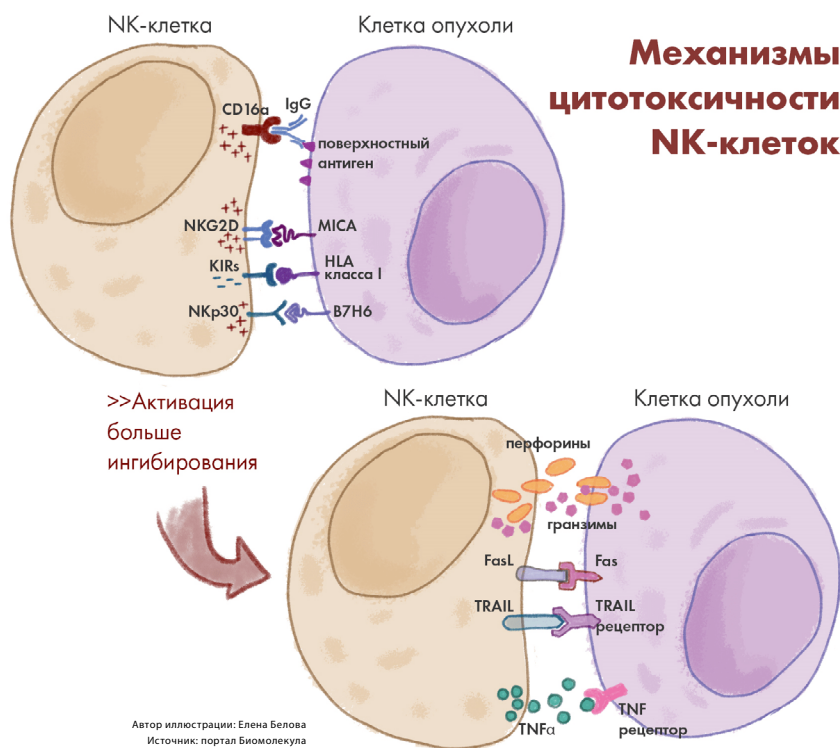
ющий гибкости и подвижности scFv, а также димеризации CAR. Выбор данного домена зависит от особенностей структуры эпитопа (антигена для CAR) на клетке-мишени: как правило, чем дальше от мембраны располагается эпитоп (или чем больше он экранирован гликопротеинами мембраны), тем более короткий шарнирный участок нужен для его распознавания scFv [6].

Внутриклеточная структура CAR включает сигнальные (CD3ζ, CD28, DAP10/12) и костимулирующие (2B4, 4 1BB, OX40) домены. Первые содержат последовательности ITAM, обеспечивающие запуск и передачу активационного сигнала к ядру клетки, вторые – мотивы, специфичные к киназам (YMNМ, YMXMXPxP, TRAF). Их присутствие активирует и продлевает персистенцию клеток после связывания scFv с мишенью. Известно, что CAR, разработанные для Т-клеток и содержащие домены CD3ζ и CD28

или 4-1BB, являются функциональными и в NK-клетках [7]. Конструирование CAR-NK выполняется способом, идентичным описанному.

Структура CAR-рецептора искусственна, она представляет собой «химеру» и легко подвергается модификациям. В связи с этим интерес представляют молекулы, присущие исключительно NK-клеткам: 2B4, NKG2D, NKp44/NKp46, DAP10 и др. Возможность использования DAP10/DAP12 и 2B4/CD28 в качестве эффективных аналогов CD3ζ и 4 1BB соответственно была подтверждена исследованиями. Например, CAR, содержащие конструкцию 2B4-DAP12, усиливали цитотоксическую активность NK-клеток в сравнении с вариантом, включающим домены 4 1BB-CD3ζ [8]. Также было показано, что CAR-NK, в структуре рецептора которых есть сигнальный домен DAP12, превосходят CD3ζ по уровню цитотоксичности [9]. В другой работе CAR-NK с конструкцией DNAM-1-2B4 имели более высокий уровень цитотоксичности против гепатоцеллюлярной карциномы, чем вариант с сигнальным доменом CD3ζ вместо 2B4. Сравнение 7 комбинаций доменов CAR показало, что наиболее эффективной была конструкция CAR-NK, содержащая CD8TM-OX40-CD3ζ, (или CAR1) [10]. Добавление трансмембранного и сигнального доменов молекулы CD28 в структуру CAR инициирует цитотоксическую активность и пролиферацию CAR-NK-клеток посредством активации протеинкиназы ZAP70 [11].

Одним из лимитирующих факторов для реализации технологии CAR-NK, помимо оптимизации структуры CAR, выступает проблема эффективной модификации NK-клеток. Она может



происходить непосредственно путем внедрения ДНК или РНК, несущих трансген (трансфекция), либо при помощи вирусных частиц (трансдукция). Многочисленные попытки оптимизировать эти методы, предпринятые разными исследовательскими группами, позволили выявить ряд существенных их особенностей.

Трансфекция наиболее часто реализуется путем физической пермеабилзации клеток под воздействием электрического поля электропорации и является временной модификацией. Экспрессия трансгена с трансферной мРНК ограничена 72 ч, но в случае с ДНК она может длиться до 15 дней. В обоих случаях после электропорации наблюдается низкая жизнеспособность НК-клеток. Как было показано в одном из исследований, уровень трансфекции НК-клеток донора мРНК может достигать 81%, в случае с линией NK-92 – 47%, при помощи ДНК клеток – 40%.

Для ленти-, ретровирусной трансдукции характерна длительная экспрессия, поскольку трансген встраивается непосредственно в геном НК-клетки. Вследствие того, что последние имеют естественные механизмы защиты от проникновения вирусной РНК и кДНК, были изучены возможности повышения уровня их трансдукции при помощи ингибиторной молекулы класса аминопиримидинов – ВХ795, блокирующей PDK1 и сигнальный путь ТВК1/IKK ϵ . Повторная трансдукция вирусными частицами также повышает выход НК-клеток, экспрессирующих трансген.

Помимо этого, требуется нейтрализация отрицательного заряда вирусных частиц, который в естественных условиях мешает им проникать в клетку.

Для этого применяют катионные полимерные молекулы, например полибрен или сульфат протамина. Для повышения вероятности соприкосновения вируса и клеток используют трансдуцирующие агенты ретронектин и/или вектофузин-1. Ретронектин, или рекомбинантный фибронектин, повышает эффективность трансдукции при помощи закрепления и стабилизации вирусных частиц. Вектофузин-1 – катионный амфифильный пептид, который способствует адгезии и слиянию вирусных частиц с клетками-мишенями. Активированное состояние НК-клеток также существенно влияет на уровень их трансдукции. Например, было показано, что при трансдукции неактивированных НК-клеток с помощью ВХ795 и ретронектина экспрессия CAR составила 14–22%, тогда как у предварительно активированных клеток, трансдуцированных вышеупомянутыми агентами, эффективность трансдукции была 79–89%. Повысить ее уровень также можно при помощи длительного центрифугирования НК-клеток совместно с вирусными частицами при низких оборотах и определенной температуре (спинокуляция) [12].

Чаще всего для трансдукции задействуют лентивирусные частицы, и эффективность процесса зависит от псевдотипа (VsV-g, BaEV, RD-114) самого вируса, выбор которого определяется аффинностью рецепторов целевых клеток [13]. Известно, что вирусные частицы, несущие гликопротеины вируса оболочки бабуина (BaEV), способны эффективно проникать в НК-клетки, поскольку на их поверхности присутствуют требуемые для этого лиганды – рецепторы ASCT1 и ASCT2. К тому же, в отличие от RD-114, вирус оболочки бабуина

способен связываться с гликозилированным ASCT1. Уровень трансдукции такими вирусными частицами варьирует от 10 до 70% в зависимости от протокола и источника NK-клеток [14].

Полученные CAR-NK, даже с учетом применения описанных выше нововведений, имеют низкий уровень персистенции после инфузии. Однако в настоящий момент популярна такая стратегия, как внедрение в состав несущего CAR вектора последовательности гена IL-15.

IL-15 секретируется НК-клетками в очень низких количествах. Известно, что синтез данного цитокина дендритными клетками, моноцитами и гранулоцитами способствует развитию НК-клеток, улучшает их выживаемость и поддерживает активированное состояние [15]. Это обусловлено присутствием на поверхности НК-клеток рецепторов для IL-15 – IL-15R α и IL-2/15R $\beta\gamma$. Наличие на мембране указанных клеток комплекса IL-15/IL-15R α (после связывания с экзогенным IL-15) позволяет им взаимодействовать с соседними клетками, несущими рецептор IL-2/15R $\beta\gamma$, в то числе и с другими НК.

Известно, что активированные при помощи IL-15 НК-клетки проявляют более высокую цитотоксическую активность в отношении бластов при ОМЛ в сравнении с контрольными [4], а также обладают повышенной выживаемостью – их уровень после инфузии пациенту детектировался в течение 12 мес. [16]. Несмотря на это, экспрессия IL-15 в секретируемой форме может быть летальной, что было показано на примере мышинной модели с ОМЛ. В данном исследовании CAR-NK, содержащие сигнальный домен 2B4 и секреторный IL-15, дольше находились в активированном

состоянии и персистировали *in vivo* в сравнении с контрольными, не экспрессирующими цитокин. Однако было показано, что IL-15 способствовал проявлению цитокинового шторма, чрезмерной инфильтрации NK-клетками костного мозга и селезенки, что вызывало повреждение упомянутых органов [17]. Вследствие этого факта поздние работы ориентированы на применение IL-15 в мембраносвязанной форме. Так, в работе 2025 г. было показано, что заякоренное в мембране положение комплекса IL-15/IL-15Ra предотвращает секрецию IL-15 во внеклеточное пространство, что проявлялось в отсутствии выраженных побочных эффектов после инфузии CAR-NK против мишени B7H3 [18].

Таким образом, при разработке технологии CAR-NK необходимо учитывать следующее:

- в качестве объекта модификации допустимо использовать аллогенные NK-клетки, однако в этом случае можно принимать в расчет репертуар KIR-рецепторов донора и HLA-лигандов пациента;
- выбор источника NK-клеток зависит от поставленных задач исследования и возможностей лаборатории;
- оптимизация структуры CAR для NK-клеток оказывает решающее влияние на их активацию и выживаемость при встрече с антигеном, однако во многих случаях уже существующие для T-клеток конструкции CAR эффективны и для NK-клеток;
- варьирование параметров трансфекции или трансдукции значительно влияет на выход CAR-NK.

В сравнении с CAR-T, применение CAR-NK более безопасно,

■ **Summary.** Using genetically modified natural killer (NK) cells expressing a chimeric antigen receptor (CAR) as an example, recent advances in the field of cancer immunotherapy are reviewed. Taking into account the biological characteristics of NK cells, the main advantages and features of CAR-NK technology, an actively developing area of medical genetic engineering, are identified. Unlike CAR-T, CAR-NK cells demonstrate a reduced risk of adverse reactions, which enables the creation of «universal» allogeneic constructs. The innate ability of NK cells to recognize tumor cells independently of the MHC complex is enhanced through additional genetic modifications, including the insertion of genes encoding pro-inflammatory cytokines. Overcoming the immunosuppressive tumor microenvironment of solid malignancies remains a promising direction, as does increasing the resistance of NK cells to apoptosis. Current clinical trials confirm the safety and efficacy of CAR-NK cells in malignant neoplasms, which stimulates further developments in this field.

■ **Keywords:** chimeric antigen receptor, CAR-NK, cytokines, immunotherapy, genetic engineering.

■ <https://doi.org/10.29235/1818-9857-2026-09-79-83>

а недостаток, связанный со сниженной персистенцией, может быть решен путем их дополнительной модификации геном IL-15 в секретируемой форме. Однако его бесконтрольный синтез может стать причиной побочных эффектов и привести к летальному исходу, поэтому ведутся исследования мембраносвязанной формы IL-15, синтез которого не связан с проявлением токсических эффектов. ■

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Efficacy and safety of natural killer cell therapy in patients with solid tumors: a systematic review and meta-analysis / H. Park [et al.] // *Frontiers in Immunology*. 2024. Vol. 15. P. 1454427.
2. NK-cell based cancer immunotherapy: from basic biology to clinical development / S. Liu [et al.] // *Journal of Hematology & Oncology*. 2021. Vol. 14, №7. P. 17.
3. Wu X. Gene-edited and CAR-NK cells: Opportunities and challenges with engineering of NK cells for immunotherapy / X. Wu, S. Matosevic // *Molecular therapy oncolytics*. 2022. Vol. 27. P. 224–238.
4. Selective HLA knockdown and PD-L1 expression prevent allogeneic CAR-NK cell rejection and enhance safety and anti-tumor responses in xenograft mice / F. Liu [et al.] // *Nature communications*. 2025. Vol.16, №1. P. 8809.
5. KIR Receptors as Key Regulators of NK Cells Activity in Health and Disease / J. Dębska-Zielkowska [et al.] // *Cells*. 2021. Vol. 10, №7. P. 1777.
6. The IgG4 hinge with CD28 transmembrane domain improves VHH-based CAR T cells targeting a membrane-distal epitope of GPC1 in pancreatic cancer / N. Li [et al.] // *Nature communications*. 2023. Vol. 14, №1. P. 1986.
7. Herrera L. Adult peripheral blood and umbilical cord blood NK cells are good sources for effective CAR therapy against CD19 positive leukemic cells / L. Herrera // *Scientific Reports*. 2019. Vol. 9. P. 18729.
8. 2B4 co-stimulation and dasatinib modulation enhance anti-CD19 CAR-NK-92 cell cytotoxicity / M.H. dos Santos [et al.] // *Frontiers in Immunology*. 2025. Vol. 16 P. 1675877.
9. DAP12-based activating chimeric antigen receptor for NK cell tumor immunotherapy / K. Töpfer [et al.] // *The Journal of Immunology*. 2015. Vol. 194, №7. P. 3201–3212.
10. Comparison of seven CD19 CAR designs in engineering NK cells for enhancing anti-tumour activity / Y. Wang [et al.] // *Cell Proliferation*. 2024. P. 13683.
11. CD28 Costimulation Augments CAR Signaling in NK Cells via the LCK/CD3ζ/ZAP70 Signaling Axis / S. Acharya [et al.] // *Cancer Discovery*. 2024. Vol. 14. №10. P. 1879–1900.
12. Efficient NK cell transduction with VSV-G-pseudotyped lentiviral vectors / E. Järvälä [et al.] // (Preprint). 2026. P. 710988.
13. Schmidt P. Engineering NK Cells for CAR Therapy-Recent Advances in Gene Transfer Methodology / P. Schmidt, M.J. Raftery, G. Pecher // *Frontiers in Immunology*. 2021. Vol. 11. P. 611163.
14. Colamartino Efficient and Robust NK-Cell Transduction With Baboon Envelope Pseudotyped Lentivector / B. L. Aurelien [et al.] // *Sec. Cancer Immunity and Immunotherapy*. 2019. Vol. 10. P. 2873.
15. Wang X. Transcription Factors Associated With IL-15 Cytokine Signaling During NK Cell Development / X. Wang, X.Y. Zhao // *Frontiers in Immunology*. 2021. Vol. 12. P. 610789.
16. Use of CAR-Transduced Natural Killer Cells in CD19-Positive Lymphoid Tumors / E. Liu [et al.] // *The New England Journal of Medicine*. 2020. Vol. 382, №6. P. 545–553.
17. Engineering CAR-NK cells to secrete IL-15 sustains their anti-AML functionality but is associated with systemic toxicities / I. Christodoulou [et al.] // *Journal for ImmunoTherapy of Cancer*. 2021. Vol. 9, №12. P. 3894.
18. Signaling intact membrane-bound IL-15 enables potent anti-tumor activity and safety of CAR-NK cells / X. Xu [et al.] // *Frontiers in Immunology*. 2025. Vol. 16. P. 1658580.

Статья поступила в редакцию
26.05.2026 г.



ИНЖИНИРИНГОВО- СЕРВИСНЫЙ ЦЕНТР ПО СВЕРХТВЕРДЫМ МАТЕРИАЛАМ





УНП 100029036

Лаборатория физики высоких
давлений и сверхтвердых
материалов предлагает
решения для различных отраслей
промышленности

Республика Беларусь, 220072,
г. Минск, ул. Петруся Бровки, 19
Тел.: +375 (17) 379-13-16
Email: priemnaya@physics.by
<https://physics.by>



Международный
выставочный
проект

БЕЛОРУССКИЙ ПРОМЫШЛЕННЫЙ ФОРУМ

29-я международная специализированная выставка
оборудования и услуг для промышленного инжиниринга



INDUSTRY EXPO

10-я международная специализированная выставка
оборудования и технологий для сварки и резки



ПРОФСВАРКА

25-я международная специализированная выставка
химической и нефтегазовой промышленности и науки



**ХИМИЯ. НЕФТЬ
И ГАЗ**

3-я международная специализированная выставка
контрольно-измерительных, диагностических
и метрологических решений



LABTech

9-я международная специализированная выставка
оборудования и технологий для производства
полимеров и композитов



**ПОЛИМЕРЫ
И КОМПОЗИТЫ**

7-я специализированная выставка-конференция
цифровых технологий и решений для промышленности

**EXPO SMART
industry**

14–16 ОКТЯБРЯ 2026
Минск, пр. Победителей, 20/2

16+

