



СЕРИЯ
«ИСТОЧНИКИ НОВЫХ
ИНДУСТРИЙ»

ВЫПУСК 2

Синтетическая биология

Синтетическая биология — новая страница в истории развития биотехнологий. Наука, которая обеспечит будущее целого ряда жизненно важных отраслей и позволит решить глобальные задачи человечества.

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

2022

ИСТОЧНИКИ НОВЫХ ИНДУСТРИЙ. ВЫПУСК 2. СИНТЕТИЧЕСКАЯ БИОЛОГИЯ.

Экспертно-аналитический доклад

Авторы: В. Н. Княгинин, М. С. Липецкая, Д. В. Санатов, Е. Ю. Тибина, А. С. Пургин, С. В. Губин, Н. К. Петухова

Научные редакторы: С. В. Шитяков, Е. Ю. Кириченко

Консультации в форме интервью: С. Н. Головин, Т. Б. Тенникова, В. А. Коржиков-Влах, О. А. Гусев, К. С. Саркисян, И. Д. Клабуков, И. А. Никитин

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

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

Методологическая база доклада основана на анализе результатов проведенной форсайт-сессии с участием ведущих и молодых ученых, обработке научных данных, серии интервью с ведущими исследователями из СПбГУ, Университета ИТМО, ДГТУ, КФУ, ИБХ РАН, НМИЦ радиологии Минздрава России, оценке стратегий крупных промышленных концернов, анализе рынков венчурных инвестиций.

Доклад состоит из семи разделов, в которых рассматриваются применение инженерного подхода в биологии, обуславливающее возникновение синтетической биологии, ее роль, прорывное значение, перспективы развития и фронтирные направления, которые открывают совершенно новые технологические рынки будущего, а также значение этого научно-технологического направления для России, в том числе с учетом текущей геополитической ситуации.

Результаты проекта легли в основу экспериментального конкурса BlueSky Research «Искусственный интеллект в науке», проводимого в 2022 г. совместно Фондом «Центр стратегических разработок «Северо-Запад» и Фондом поддержки инноваций и молодежных инициатив Санкт-Петербурга.

Доклад адресован государственным служащим и специалистам в сфере развития науки и технологий, представителям сектора биотехнологий, частного предпринимательства и стартапам в области биотехнологий, а также широкому кругу лиц, интересующихся вопросами развития биотехнологий и биоэкономики.

Серия «Источники новых индустрий»

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

ISBN 978-5-9909736-6-4
Санкт-Петербург, 2022

SOURCES OF NEW INDUSTRIES. ISSUE 2. SYNTHETIC BIOLOGY.

Expert report

Authors: V. N. Knyaginina, M. S. Lipetskaya, D. V. Sanatov, E. Y. Tibina, A. S. Purgin, S. V. Gubin, N. K. Petukhova

Scientific Editors: S. V. Shityakov, E. Y. Kirichenko

Interviewees: S. N. Golovin, T. B. Tennikova, V. A. Korzhikov-Vlakh, O. A. Gusev, K. S. Sarkisyan, I. D. Klabukov, I. A. Nikitin

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

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

The methodological basis of the report is based on the analysis of the results of a foresight session with the participation of leading and young scientists, the processing of scientific data, a series of interviews with leading researchers from SPbU, ITMO University, DSTU, KFU, Shemyakin-Ovchinnikov Institute of Bioorganic Chemistry, National Medical Research Radiological Centre, the evaluation of strategies of large industrial concerns, the analysis of venture capital markets.

The report consists of seven sections that consider the application of an engineering approach in biology, which causes the emergence of synthetic biology, its role, breakthrough importance, development prospects and frontier areas that open up completely new technological markets of the future, and the importance of this scientific and technological field for Russia, particularly given the current geopolitical situation.

The results of the project formed the basis of the experimental BlueSkyResearch competition "Artificial Intelligence in Science", held in 2022 jointly by the Foundation "Center for Strategic Research "Northwest" and Innovations and Youth Initiatives Support Fund of St. Petersburg.

The report is addressed to the government officials and specialists in the field of the development of science and technology, representatives of the scientific community, participants in the biotechnology sector, residents of innovation centers, representatives of private entrepreneurship and start-ups in the field of biotechnology, as well as for a wide range of people interested in the development of biotechnology and bioeconomy.

The series "Sources of new industries"

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

ISBN 978-5-9909736-6-4
Saint Petersburg 2022

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

Оглавление

6	Глоссарий
10	Список рисунков, таблиц и кейсов
11	Введение
13	Как устроена синтетическая биология и в чем ее прорывное значение
20	Инженерный принцип в основе синтетической биологии
23	Развитие синтетической биологии как научного направления
30	Ключевые вызовы и фронтиры синтетической биологии до 2040 г.
43	Как устроена отрасль синтетической биологии и где зона прорывных инноваций
50	Регулирование синтетической биологии в мире
54	Потенциал России
61	Библиография
63	Приложение 1. Лидирующие исследовательские центры синтетической биологии

Глоссарий

BioCAD	система автоматизированного проектирования биологических объектов, построения моделей для биотехнологических, фармацевтических и медицинских целей.
CRISPR	технология редактирования геномов высших организмов, использующая иммунную систему бактерий для изменения генетических последовательностей.
FACS	технология измерения химических и физических свойств клеток с использованием лазерного излучения.
In Silico	компьютерное моделирование (симуляция) биологического эксперимента.
In Vitro	методика выполнения биологических экспериментов, когда они проводятся «в пробирке» — в искусственных условиях, вне организма или естественной среды.
In Vivo	методика проведения биологических экспериментов на (или внутри) живой ткани при живом организме.
Machine Learning в биологии	анализ геномных данных, разметка медицинских изображений, генерация лекарств, медицинская диагностика.
Research and Development (R&D)	научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы, совокупность работ, направленных на получение новых знаний и практическое применение при создании нового изделия или технологии.
Бактериофаги (или фаги)	вирусы и микроорганизмы, способные точно уничтожать только болезнетворные бактерии.
Биоинжиниринг (или биоинженерия)	направление науки и техники, развивающее применение инженерных принципов в биологии и медицине.
Биоинформатика	междисциплинарная научная область, объединяющая общую биологию, молекулярную биологию, кибернетику, генетику, химию, компьютерные науки, математику и статистику.
Биокатализатор	вещество, обуславливающее ускорение (положительный катализ) или торможение (отрицательный катализ) биохимических процессов.

Биореактор	оборудование, осуществляющее перемешивание культуральной среды в процессе микробиологического синтеза.
Биоремедиация	комплекс методов очистки вод, грунтов и атмосферы с использованием метаболического потенциала биологических объектов — растений, грибов, насекомых, червей и других организмов.
Биосенсоры	это аналитические устройства, использующие биологические материалы для «узнавания» определенных молекул и выдающие информацию об их присутствии и количестве в виде электрического сигнала.
Биофаундри	учреждение, предоставляющее передовую инфраструктуру, которая позволяет быстро проектировать, создавать и тестировать генетически перепрограммированные организмы для биотехнологических исследований.
Геном	полный набор ДНК организма, включая все его гены, а также его иерархическую трехмерную структурную конфигурацию.
Геномика	междисциплинарная область биологии, в которой основное внимание уделяется структуре, функциям, эволюции, картированию и редактированию геномов.
Дезоксирибонуклеиновая кислота (ДНК)	макромолекула, обеспечивающая хранение, передачу из поколения в поколение и реализацию генетической программы развития и функционирования живых организмов.
Клеточная биология	наука, изучающая живые клетки, их органеллы, их строение, функционирование, процессы клеточного размножения, старения и смерти.
Клеточная фабрика	контейнер для культивирования и выращивания клеток, используемых в производстве лекарств и других биологически активных компонентов, а также вирусов, клеточных популяций и вакцин.
Компании-единороги	частные фирмы, имеющие капитализацию \$1 млрд и выше.
Малые молекулы	низкомолекулярные вещества, обладающие той или иной биологической активностью (способностью регулировать или воздействовать на биологические процессы).
Микробиология	наука, предметом изучения которой являются микроскопические существа, называемые микроорганизмами, их биологические признаки и взаимоотношения с другими организмами.

Микробный топливный элемент	биотехнологическое устройство, преобразующее энергию химических связей органических веществ в электричество посредством микроорганизмов.
Молекулярная биология	наука, изучающая функционирование живых организмов сквозь призму химической структуры входящих в их состав молекул и атомов.
M-РНК	РНК, содержащая информацию о первичной структуре (аминокислотной последовательности) белков.
Нутриенты	химические элементы, необходимые живым организмам для обеспечения нормальной жизнедеятельности.
Органоиды (или органеллы)	постоянные компоненты клетки, жизненно необходимые для ее существования.
Плазмиды	небольшие молекулы ДНК, физически обособленные от хромосом и способные к автономной репликации.
Полимеразная цепная реакция (ПЦР)	экспериментальный метод молекулярной биологии, способ значительного увеличения малых концентраций определенных фрагментов нуклеиновой кислоты (ДНК) в биологическом материале (пробе).
Протеомика	наука, изучающая белковый состав биологических объектов, а также модификации и структурно-функциональные свойства белковых молекул.
ПЦР-тест	способ диагностики инфекционных заболеваний методом полимеразной цепной реакции.
Репортерные молекулы (гены)	гены, которые присоединяют к регуляторным последовательностям других генов для исследования проявлений генов в культурах клеток.
Рибонуклеиновая кислота (РНК)	одна из трех основных макромолекул (две другие — ДНК и белки), которые содержатся в клетках всех живых организмов и состоящая из длинной цепи нуклеотидов.
Рибосома	важнейшая немембранная органелла всех живых клеток, служащая для биосинтеза белка из аминокислот по заданной матрице на основе генетической информации, предоставляемой матричной РНК.

Р-РНК	несколько молекул РНК, составляющих основу рибосомы. Основным назначением рРНК является осуществление «трансляции» — считывания информации с мРНК при помощи адапторных молекул тРНК и катализ образования пептидных связей между присоединенными к тРНК аминокислотами.
Сайт-направленный мутагенез	метод молекулярной биологии, который используется для создания конкретных и преднамеренных изменений в последовательности ДНК, гена и продуктов генов.
Секвенирование	это общее название методов, которые позволяют установить последовательность нуклеотидов в молекуле ДНК.
Синтетическая биология	научное направление в биологии, занимающееся проектированием и созданием биологических систем с заданными свойствами и функциями, в том числе и тех, которые не имеют аналогов в природе.
Трансляционные исследования	концепция, предполагающая использование фундаментальных разработок непосредственно на практике (от лабораторного стола к постели больного) с применением определенной комбинации этапов исследования.
Транспозонный (транспозиционный) мутагенез	биологический процесс, который позволяет генам переноситься в хромосому организма-хозяина, нарушая или модифицируя функцию существующего гена в хромосоме и вызывая мутацию.
Т-РНК	РНК, обеспечивающая взаимодействие аминокислоты, рибосомы и матричной РНК (мРНК) в ходе трансляции генов.
Фаговая библиотека	пул (перечень) бактериофагов, отвечающих необходимым биологическим и химическим свойствам.
Фазмиды	молекулярные векторы, искусственные гибриды фагов и плазмид.
Штамм	чистая культура бактерий, грибов, риккетсий и иных микроорганизмов, выделенная из определенного источника и идентифицированная по тестам современной классификации.

Список рисунков, таблиц и кейсов

Рис. 1. Принципиальная схема устройства синтетической биологии как области научного знания.

Рис. 2. Инженерный принцип в синтетической биологии - модульная сборка биоконструкций (клетки и ее составных частей).

Рис. 3. Цикл биодизайна.

Рис. 4. Ключевые подходы к сборке синтетической клетки.

Рис. 5. Цикл проектирования протеомов.

Рис. 6. Динамика генерации биоданных в мире (по данным Европейского института биоинформатики EMBL-EBI).

Рис. 7. Динамика численности пользователей по всему миру, имеющих доступ к биологическим данным, технологиям геномной инженерии и синтетической биологии.

Рис. 8. Таймлайн и приоритетные задачи развития геномики, протеомики и синтетической биологии.

Рис. 9. Матрица научно-технологических фронтиров синтетической биологии.

Рис. 10. Инвестиции в синтетическую биологию в 2009-2020 гг., млрд долл.

Рис. 11. Объемы рынка синтетической биологии, 2017-2021 гг., млрд долл.

Рис. 12. SynBio Stack - структура рынка синтетической биологии.

Рис. 13. Прогноз развития рынка синтетической биологии по технологическим сегментам (2017-2023 гг.).

Рис. 14. Объем инвестиций в компании синтетической биологии по отраслям, I и II квартал 2021 г., млн долл. США.

Рис. 15. Географическая концентрация и типология игроков синтетической биологии в мире на 2021 г.

Рис. 16. География российских биотехнологических кластеров и ЦКП на 2021 г.

Табл. 1. Сферы применения синтетической биологии и примеры решений, продуктов, технологий синтетической биологии.

Табл. 2. Эволюция научных направлений в области биологии, химии и инженерных наук.

Табл. 3. Научно-технологические фронтиры синтетической биологии.

Табл. 4. Типы инвесторов в сегмент синтетической биологии.

Табл. 5. Программы поддержки развития синтетической биологии в мире.

Кейс 1. Производство культивируемого клеточного мяса.

Кейс 2. Global Biofoundries Alliance - Глобальный альянс биофаундрис.

Кейс 3. Консорциумы в синтетической биологии.

Кейс 4. Отраслевое применение синтетической биологии.

Введение

В январе 2022 г. американские биоинженеры из Института Крейга Вентера и Университета штата Иллинойс в Урбана-Шампейне вместе с немецкими коллегами впервые разработали трехмерную, полноценную кинетическую модель живой минимальной клетки, которая полностью имитирует процессы, протекающие в реальной клетке. В начале 2000-х гг. исследователи из Института Крейга Вентера уже предпринимали аналогичную попытку: удалив максимальное количество генов из *Mycoplasma mycoides*, получили упрощенную синтетическую форму жизни, способную к питанию и размножению. И несмотря на то, что моделирование работы простейших организмов (различные виды микоплазмы, микроб *Escherichia coli*) по-прежнему требует существенного научно-технологического вклада, а процесс сборки воедино полного набора генов и питательных веществ клетки до сих пор не отлажен даже для сравнительно простых бактерий¹, произошедшее событие очередной раз продемонстрировало, что человечество продолжает стремительными темпами двигаться навстречу масштабной биотехнологической революции.

Для решения задач по проектированию и сборке биологических систем с 2000 г. стало оформляться самостоятельное научно-технологическое направление — синтетическая биология². Синтетическая биология, работая на фундаментальном уровне устройства живых систем, имеет прямой прикладной эффект для разных отраслей экономики, радикально меняя в них процессы производства конечных продуктов (формирования добавленной стоимости). Влияние синтетической биологии распространяется на сферы здравоохранения (молекулы для таргетной доставки лекарств), пищевой промышленности (синтетические продукты питания), фармакологии (вакцины и средства диагностики), сельского хозяйства (биопестициды), энергетики (биотопливо)³. И это только малая часть примеров.

В мире синтетическая биология оформилась в довольно масштабный сектор уже не только как область научного знания (текущие объемы публикаций оцениваются более чем в 26 тыс., и с 2000 г. среднегодовой темп роста публикаций составляет 30 %), но и как самостоятельный рынок с большим количеством стартапов, по разным оценкам, объемом не менее 7 млрд долл. В США, ЕС, Китае сформированы целые центры исследований в области синтетической биологии, консорциумы для решения задач по созданию синтетической клетки, синтезу протеомов.

В России сектор синтетической биологии также начал свое становление. Сегодня это область науки без крупных промышленных инвестиций. Но она уже имеет большое значение для экономики страны, в том числе в свете происходящих событий 2022 г., а также вследствие проблем, поднятых пандемией COVID-19 последних лет. От технологий синтетической биологии сегодня зависят перспективы развития фармацевтики, обеспечения продовольственной безопасности страны, восполнения разорвавшихся технологических цепочек в сельском хозяйстве и многие другие сферы.

Учитывая последствия событий февраля 2022 г., важно понимать, что развитие синтетической биологии как отрасли будет сдерживаться наложенными на Россию торговыми и экономическими ограничениями, произошедшим разрывом международных исследовательских связей и коллабораций. Тем не менее ключевые положения доклада, на наш взгляд, сохраняют свою актуальность, а некоторые из них — как, например, преобразование производственных цепочек с использованием решений синтетической биологии — приобретают новое звучание.

В настоящем докладе рассмотрена история развития синтетической биологии, ее технологический инструментарий, вызовы и фронтальные научные направления, а также рыночные тенденции (в отдельных секторах, объемах инвестиций, корпоративной структуре рынка) и перспективы развития систем регулирования.

- 1 Ученые впервые построили полноценную модель живой клетки // Газета.ру. URL: gazeta.ru/science/news/2022/01/24/17182579.shtml.
- 2 Lionel Clarke, Richard Kitney; Developing synthetic biology for industrial biotechnology applications. *Biochem Soc Trans* 28 February 2020; 48 (1). doi.org/10.1042/BST20190349.
- 3 Bruynseels K. (2020). Responsible innovation in synthetic biology in response to COVID-19: the role of data positionality. *Ethics and information technology*, 23(Suppl 1). doi.org/10.1007/s10676-020-09565-9.

1 КАК УСТРОЕНА СИНТЕТИЧЕСКАЯ БИОЛОГИЯ И В ЧЕМ ЕЕ ПРОРЫВНОЕ ЗНАЧЕНИЕ

Синтетическая биология как научное направление появилась в начале XXI века на основе накопленной научно-технологической базы и открытий в областях системной биологии, биотехнологий, молекулярной биологии, биоинженерии и генной инженерии. Становление синтетической биологии как обособленного направления пришлось на период 2000–2010 гг., когда были совершены первые открытия, связанные со стандартизацией частей ДНК, комбинаторным синтезом генетической сети, синтетическими схемами, способствующими проникновению бактерий в опухолевые клетки и др., а также сформированы первые научно-исследовательские центры и коллективы (Институт Крейга Вентера и Центр синтетической биологии и инноваций Имперского колледжа Лондона), проведена первая международная конференция по синтетической биологии Synthetic Biology 1.0. С 2010 г. наблюдается интенсивное развитие этого направления, а также рост числа разработок с прикладным применением (создание первой синтетической клетки, синтез артемизинина, первый геном, созданный компьютером, и др.). Одним из основных факторов развития синтетической биологии стало расширение возможностей анализа и моделирования данных, активная цифровизация исследований и развитие междисциплинарных направлений, таких как биоинформатика. Сегодня активно расширяются сферы применения синтетической биологии (медицина, фармацевтика, пищевая промышленность, сельское хозяйство, производство косметики, текстильная промышленность, энергетика и т.д.), что приводит к усилению ее роли в обеспечении экономического роста.

Синтетическая биология сегодня является междисциплинарной научной сферой, которая формируется на пересечении разных областей биологии, математики, информационных технологий, химии и инжиниринга (см. рисунок 1). Развитие синтетической биологии сопряжено с одной из самых амбициозных задач человечества — научиться воспроизводить жизнь: синтезировать клетку, ее компоненты и создавать биологические системы с заданными свойствами.

Инженерные подходы и принципы являются основополагающими для развития синтетической биологии, т.к. для получения продуктов нового свойства, которые позволяют решать новые задачи и вызовы в разных отраслях, требуется инжиниринг полного цикла (включая дизайн, сборку, тестирование, анализ данных) большого числа биологических последовательностей⁴.

Сферы применения синтетической биологии не ограничены лишь областью Life science и включают целый ряд отраслей — пищевую промышленность (синтезированные продукты питания, различные пищевые компоненты, выращенные в биореакторе), биоэнергетику (биотопливо), фармацевтику и медицину (новые способы доставки лекарств, новые антимикробные препараты, генные вакцины нового поколения), промышленность (новые виды материалов)⁵. Синтетическая биология способствует трансформации производственных цепочек, значительному снижению стоимости продуктов и сроков их производства по сравнению с уже существующими аналогами. В целом синтетическая биология — исключительно прикладная научная сфера: любой синтезируемый биологический объект создается не сам по себе, а под конкретную отраслевую задачу, в этом один из основных замыслов синтетической биологии.

4 Romanowski S., Eustáquio A.S. Synthetic biology for natural product drug production and engineering. *Curr Opin Chem Biol.* 2020. doi:10.1016/j.cbpa.2020.09.006.

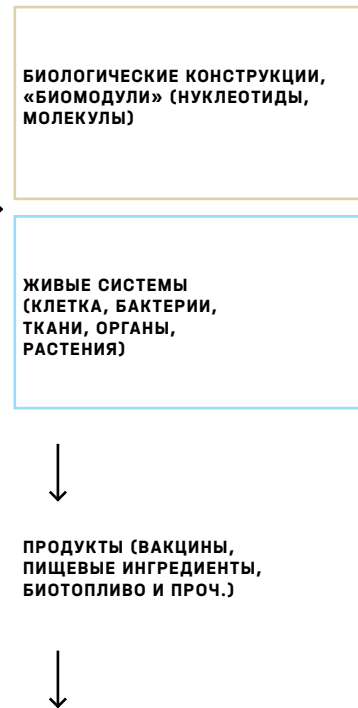
5 Global Synthetic Biology Industry Outlook — Futuretech TechVisionOpportunity Engine, TechVision Group of Frost & Sullivan, TechVision Opportunity Engines /D835/30.

ФОРМИРУЮЩИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

БИОЛОГИЯ (И СМЕЖНЫЕ*)	биологические системы, организмы и методы их моделирования, механизмы хранения и передачи генетической информации, пути эволюции геномов
МАТЕМАТИКА	методы вычислений, анализа, прогнозирования, описания количественных отношений и пространственных форм явлений
ИТ	процессы, методы поиска, сбора, хранения, обработки, предоставления, распространения информации
ИНЖИНИРИНГ	изобретение, разработка, создание, внедрение, улучшение техники, материалов или процессов
ОРГАНИЧЕСКАЯ ХИМИЯ	структура, свойства и методы синтеза углеводов и их производных



ОБЪЕКТЫ СИНТЕТИЧЕСКОЙ БИОЛОГИИ



СФЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ

<p>МЕДИЦИНА</p> <ul style="list-style-type: none"> Биосенсоры Биотерапевтика (CAR-T) Биокатализаторы Создание оптомеров Модификация белков в медицинских целях 	<p>БИОФАРМАЦЕВТИКА</p> <ul style="list-style-type: none"> Рекомбинантные вакцины Синтетические иммуномодуляторы Новые системы доставки лекарств 	<p>ПИЩЕВАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ</p> <ul style="list-style-type: none"> Управление полезными свойствами продуктов Заменители продуктов питания Персонализированное питание 	<p>АГРОСЕКТОР</p> <ul style="list-style-type: none"> Сельскохозяйственные биосенсоры Биологическая сельскохозяйственная обработка
<p>БИОЭНЕРГЕТИКА</p> <ul style="list-style-type: none"> Микробные топливные элементы Новые виды биотоплива и биоразлагаемые полимеры 	<p>ЭКОЛОГИЯ</p> <ul style="list-style-type: none"> Биоремедиация Экологические биосенсоры Генетическая борьба с вредителями 	<p>БИОТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ПРОИЗВОДСТВО</p> <ul style="list-style-type: none"> Функциональные биоматериалы Сырьевые химикаты Биологически изготовленные материалы 	

Рис. 1. Принципиальная схема устройства синтетической биологии как области научного знания

*Эволюционно и по специфике решаемых задач биоинженерия, геновая инженерия самые близкие направления

Шитяков Сергей Васильевич, ведущий научный сотрудник по хемоинформатике, Университет ИТМО; профессор-исследователь теоретической (in silico) синтетической биологии, Вюрцбургский университет (Германия)

Источник: Интервью в рамках подготовки доклада с Шитяковым С. В. от 15.10.2021

«Сегодня синтетическая биология — дисциплина несколько аморфная и еще не сформировалась до конца. Это процесс ближайших пяти лет. Синтетическая биология в широком смысле — это редактирование, дизайн и создание биоконструкций. В более узком смысле — это работа с биомолекулами, работа с белками. Другими словами, синтетическая биология направлена на создание биологических систем, их разработку, дизайн (например, дизайн белков, которых нет в природе). Манипуляции и работа с белками невозможны без изменения генов. Манипуляция, направленная на гены с целью получения новых белков, — это одно из базовых направлений синтетической биологии. По своей структуре синтетическая биология — это такое направление, в котором используются прорывные технологии и методы, например, биоинформатика и использование компьютеров для решения биологических задач. Синтетическая биология включает в себя много подотраслей, поэтому их сложно разграничить.

В Европе развитие синтетической биологии тормозится из-за высокого уровня развития комитетов по этике, вопросов обеспечения безопасности данных, в том числе данных пациентов. Для европейских стран характерно четкое регулирование клинических исследований и экспериментальных исследований, что сильно тормозит процесс развития синтетической биологии.

В Китае такой системы нет. Сегодня Китай и Юго-Восточная Азия являются основным хабом развития синтетической биологии в мире. В Китае и Юго-Восточной Азии происходит очень быстрое развитие синтетической биологии, в том числе за счет отсутствия таких барьеров. Исследования быстро проводятся без необходимости доскональных изысканий. С одной стороны, это плохо, но в значительной степени ускоряет развитие синтетической биологии.

Обеспечение кибербиобезопасности является одним из важных вопросов в развитии синтетической биологии. Обеспечение безопасности биологических данных может стать барьером, но не должно. Сегодня появляются новые алгоритмы на базе технологий блокчейн для обеспечения безопасности данных. Эти алгоритмы можно использовать при формировании безопасности данных синтетической биологии.

Одной из проблем развития синтетической биологии в России является концентрация науки в нескольких центрах, тогда как на пространствах остальных регионов нет не только специальных научных центров, но даже понимания прорывных технологий. Другая сторона проблемы развития синтетической биологии связана с логистикой биологических материалов и химических реагентов для исследований».

Коржиков-Влах Виктор Александрович, заместитель заведующего Межкафедральной лабораторией биомедицинской химии СПбГУ; секретарь лаборатории биогибридных технологий СПбГУ

Источник: Интервью в рамках подготовки доклада с Коржиковым-Влах В. А. от 25.10.2021

«Область синтетической биологии базируется на химических объектах с уклоном в биомедицинское применение. Синтетическая биология связана с применением химических принципов на уровне биологии, на уровне конструирования живых организмов и работы с ними. Это дает возможность создавать синтетические организмы — управляемые биологические системы, которые используются для решения конкретных задач. Это отражается в области фармакологии и биоматериаловедения. Инструментарий же синтетической биологии включает молекулярную биологию, CRISPR-Cas, работу с живыми клетками — выделение клеток в отдельном виде и создание новых на их основе или трансформация выделенных клеток.

Прорывное значение синтетической биологии связано с тем, что человек становится важнейшим фактором создания новых организмов. До появления синтетической биологии новые биологические структуры возникали в ходе эволюции, формирования мутаций. Теперь человек может создавать новые организмы за счет новых навыков, связанных с созданием новых видов. Это принципиальный научный прорыв».

В качестве иллюстрации в таблице 1 приведены некоторые из примеров существующих вызовов, с решением которых связано развитие отдельных отраслей, и технологических решений с применением подходов синтетической биологии как ответ на эти вызовы.

№	Отрасль	Вызовы	Технологические решения
1	Медицина ⁶	Борьба с онкологией, инфекционными, нейродегенеративными заболеваниями, аллергиями	Белки для программирования клеточного поведения Редактированные белки для терапии онкологических заболеваний
		Диагностика заболеваний (ПЦР-тестирование, определение антител)	Диагностические инструменты на основе биосенсоров
		Новые методы лечения и профилактики болезней	Программируемые органоиды Клеточные методы лечения и профилактики
2	Биофармацевтика ⁷	Оперативное реагирование на новые болезни	Системы бесклеточного синтеза белка Живые вирусные вакцины Фенотипический скрининг Синтетические клеточные модели
		Новые способы точной доставки лекарств	Искусственные биофармацевтические препараты
		Борьба с антибиотикорезистентностью	Противомикробные препараты
3	Пищевая промышленность	Прирост населения примерно на 2 млрд человек до 2050 г. Рост потребления продуктов питания (в особенности мяса). Для удовлетворения спроса к 2050 г. мировое производство продуктов необходимо увеличить на 70 % ⁸	Заменители продуктов питания Продукты и культуры с заданными свойствами и пищевой ценностью Культивируемые продукты питания (например, мясо)
		Well-being (индивидуальная диета)	Продовольственные биосенсоры
4	Агроректор	Пестициды и агрохимикаты являются причиной 200 тыс. случаев смерти от отравления ежегодно ⁹	Сельскохозяйственные биоудобрения, биопестициды, биосенсоры
		Методы ведения с/х не справляются с темпами роста потребления продуктов питания и не являются экологически устойчивыми	Азотудерживающие микробы Фотоавтотрофные организмы Искусственные, модифицированные агрокультуры

№	Отрасль	Вызовы	Технологические решения
5	Энергетика ¹⁰	Изменение климата и постуглеродная повестка, реализация ESG-стандартов	Материалы с улучшенной селективностью Микроорганизмы на биотическом / абиотическом интерфейсе
		Ограниченность ископаемых ресурсов, источников энергии (уголь, нефть, газ) ¹¹	Микробные топливные элементы Биологические виды топлива Ферменты для биокатализа
6	Экология ¹²	Загрязнение земель, водоемов, воздуха	Искусственные ферменты и организмы для биоремедиации
		Уменьшение биоразнообразия, нарушение экосистем	Средства для генетической борьбы с вредителями Биоводоросли
7	Биоматериалы	Переход на биологические технологии производства и реализация ESG-стандартов	Функциональные биоматериалы Биологически изготовленные материалы Тонкие химические соединения Сырьевые химикаты

Табл. 1.
Сферы применения синтетической биологии и примеры решений, продуктов, технологий синтетической биологии

Источники: Science Direct, Frost & Sullivan, VTARC, Innovations in Pest Management, Renewable Gas and Fuel Production and Plastic Recycling, CSIRO

6 Advancements in Gene Therapy, Synthetic Biology, Diagnostic Assays, Imaging Tracers, and Biopharma--Life Sciences, Health & WellnessTechVision Opportunity Engine, TechVision Group of Frost & Sullivan, TechVision Opportunity Engines /D759 /04.

7 Advancements in Gene Therapy, Synthetic Biology, Diagnostic Assays, Imaging Tracers, and Biopharma--Life Sciences, Health & WellnessTechVision Opportunity Engine, TechVision Group of Frost & Sullivan, TechVision Opportunity Engines /D759 /04. Brooks S. M., Alper H. S. Applications, challenges, and needs for employing synthetic biology beyond the lab. Nat Commun 12, 1390 (2021). doi.org/10.1038/s41467-021-21740-0.

8 Marc-Sven Roell, Matias D. Zurbriggen, The impact of synthetic biology for future agriculture and nutrition, Current Opinion in Biotechnology, Volume 61, 2020, ISSN 0958-1669, doi. org/10.1016/j.copbio.2019.10.004.

9 FoodNet: Тренды и барьеры развития, SBS Consulting, октябрь 2021 г.

10 Future Directions of Synthetic Biology for Energy & Power. Virginia Tech Applied Research Corporation. 2018. URL: basicresearch.defense.gov/Portals/61/Documents/future-directions/Synthetic%20Biology%20for%20Energy%20and%20Power%20-%20Final%20Report.pdf?ver=2018-10-29-133833-863 (дата обращения: 16.01.2022).

11 Predictive Models to Accelerate Gas Fermentation for Biomanufacturing. URL: agilebiofoundry.org/industrial-microbes-gas-fermentation (дата обращения: 16.01.2022).

12 A National Synthetic Biology Roadmap, CSIRO, August 2021. URL: csiro.au/-/media/Services/Futures/Synthetic-Biology-Roadmap.pdf (дата обращения: 16.01.2022).

Кейс 1. Производство культивируемого клеточного мяса

Одним из ярких примеров применения синтетической биологии в пищевой промышленности является производство культивируемого клеточного мяса. Цикл производства культивируемого клеточного мяса сводится к четырем фазам — сбор и подготовка клеточного материала (как правило, извлекаются стволовые, мышечные клетки, гормоны и нутриенты из тканей животных), подготовка питательной среды для выращивания тканей, производство тканей путем помещения клеток в питательную среду в биореакторе и последующее массовое производство мяса. Из 1 грамма мышечной ткани может быть получено до 10 тыс. килограммов клеточной массы. Весь процесс в совокупности занимает до четырех недель. В то время как при традиционном способе животноводства время получения готового мясного продукта измеряется двумя годами. Другим аргументом в пользу культивируемого мяса является быстрое сокращение стоимости его производства (в 4 раза за 6 лет — с 400 \$/кг говяжьего мяса в 2013 г. до 110 \$/кг в 2019 г. и потенциально до 10 \$/кг к 2024 г.). Основным вызовом для этого типа производств в будущем — использование полностью синтезированных клеток, а не редактирование клеток животных, как это происходит на сегодняшний день.

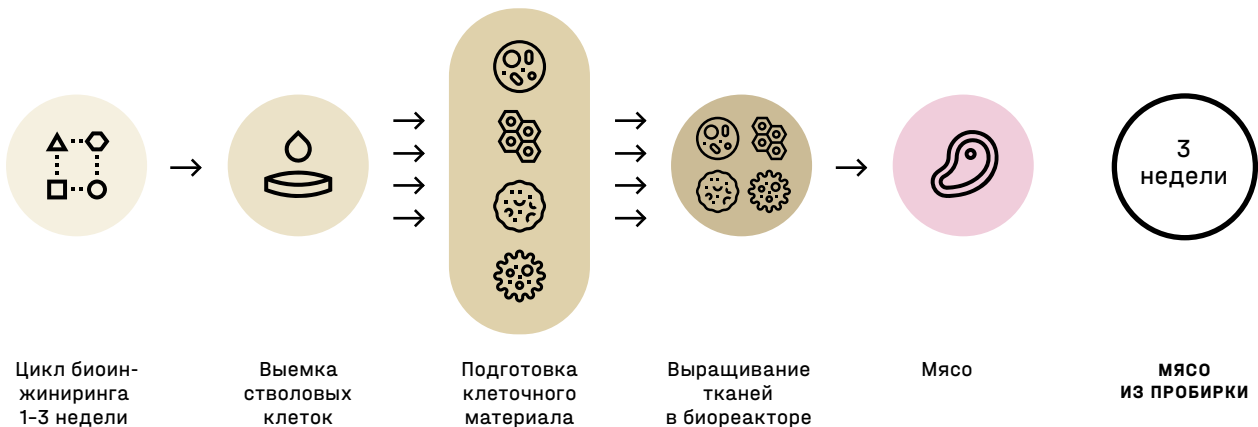
Источники: World Economic Forum, Aleph Farms, Kazuko Sato, Cultured Meat Production Technology: Challenges and Future Development, Mitsui & Co Global Strategic Studies Institute Monthly Report November 2020. URL: mitsui.com/mgssi/en/report/detail/_icsFiles/afieldfile/2021/01/18/2011t_sato_e.pdf (дата обращения: 16.01.2022). Chriki Sghaier, Hocquette Jean-François, The Myth of Cultured Meat: A Review, Frontiers in Nutrition, 7, 2020, DOI:10.3389/fnut.2020.00007, URL: frontiersin.org/article/10.3389/fnut.2020.00007
Ученые ДГТУ и ВолГМУ вырастят в лабораторных условиях котлету из мяса кролика. URL: donstu.ru/news/nauka/uchenye-dgtu-i-volggmuvyrazyatyat-v-laboratornykhkusloviyakh-kotletu-iz-kletokmyasa-krolika (дата обращения: 16.01.2022).

3–4 недели

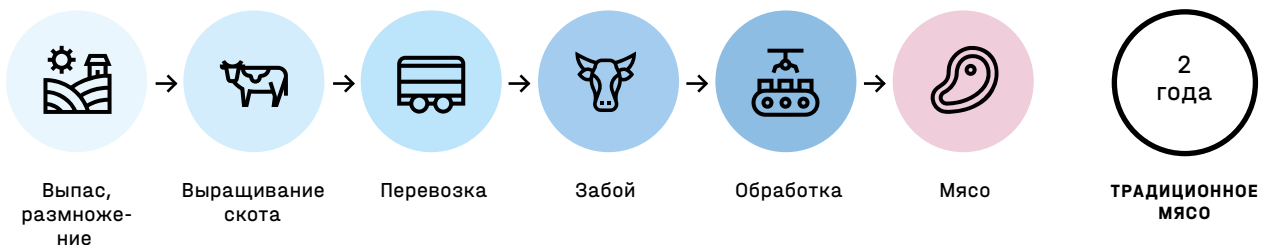
	Подготовка клеточного материала	Подготовка питательной среды	Производство тканей для культивируемого мяса	Массовое производство культивируемого мяса
ЗАДАЧИ	Сбор и подготовка клеточного материала (стволовые, мышечные клетки, гормоны и нутриенты)	Подготовка специальной питательной среды (аминокислоты, витамины, глюкоза, неорганическая соль, гормоны и нутриенты)	Помещение клеток в питательную среду в биореакторе для выращивания искусственных тканей	Масштабирование производства культивируемого мяса
БАРЬЕРЫ	<p>Доступность эффективных методов получения живых клеток</p> <p>Малый объем получаемых клеток при их сборе из животных</p> <p>Сложность и дороговизна методов очистки извлеченных клеток</p>	<p>Доступность методов массового производства питательной среды для клеток</p> <p>Дороговизна гормонов и нутриентов животного происхождения</p> <p>Невозможность масштабного производства гормонов и нутриентов животного происхождения</p>	<p>Гибель клеток из-за неоднородности питательной среды, высокой или низкой температуры, недостатка кислорода в биореакторах</p> <p>Несоответствие структуры и текстуры культивируемого мяса натуральному</p>	<p>Низкая продуктивность двухмерного метода выращивания клеток</p> <p>Проблема масштабируемости производства культивируемого мяса</p>
РЕШЕНИЯ (ФРОНТИРЫ)	<p>Извлечение живых клеток с помощью ферментов</p> <p>Клеточный инжиниринг и синтез искусственных клеток</p> <p>Методы синтеза белков и молекул РНК-методом экспрессии генов</p> <p>Сайт-направленный мутагенез</p>	<p>Искусственные биологические системы (органы), производящие гормоны и нутриенты</p> <p>Питательные вещества (гормоны и нутриенты) неживотного происхождения</p> <p>Производство питательной среды без использования гормонов и нутриентов</p> <p>Клеточные фабрики</p>	<p>Методы сбора выемки выращенных клеток, тканей из биореактора</p> <p>Системы контроля внутренней среды (температура, кислород, кислотно-щелочной баланс) в биореакторах</p> <p>Имитация текстуры и структуры мышечной ткани</p>	<p>Система трехмерного выращивания клеток в биореакторе</p> <p>Компьютерное моделирование технологии культивирования клеток</p> <p>Моделирование параметров промышленного биопроцесса: число клеток, продолжительность процесса, объемы готовой к извлечению партии</p>
ПРИМЕРЫ ИГРОКОВ	<p>Компания «Meatск» — применение технологий культивирования клеток из фармакологии в пищевой промышленности</p> <p>Сегодня — две стратегии подготовки материала: — стволовые клетки — мышечные клетки</p> <p>Будущее — полностью синтезированная клетка</p>	<p>Стартап «Mosa Meat» — промышленный синтез питательной среды</p> <p>Стартапы «Future Fields», «Multus Media» — альтернативы гормонам и нутриентам</p>	<p>Стартапы «Matrix Meats», «Atlast Food» — текстура мышечных тканей на основе грибковых волокон</p>	<p>Компания «Ospin Modular Bioprocessing» — масштабирование биопроцессов</p> <p>Стартапы «Impossible Food», «Beyond Meat» — производство искусственного и культивируемого мяса</p>

Сравнение эффектов традиционного и клеточного производства мяса

Тип мяса	Особенности цикла	Сроки	Стоимость	ESG-параметры
Мясо из пробирки	Выемка стволовых клеток, подготовка клеточного материала, выращивание тканей, масштабирование	3-4 недели	110\$/кг (2019 г.) 400\$/кг (2013 г.)	На 45 % меньше затрат энергии, на 99 % меньше использования территории, на 96 % меньше эмиссии газов



Традиционное мясо	Выпас, выращивание скота, перевозка, забой, обработка, упаковка готового продукта	2 года	5\$/кг	Производят до 15 % всей эмиссии газов, вызванных человеком. Занимает 80 % с/х территорий
-------------------	---	--------	--------	--



2 ИНЖЕНЕРНЫЙ ПРИНЦИП В ОСНОВЕ СИНТЕТИЧЕСКОЙ БИОЛОГИИ

Применение системно-биологического и генно-инженерного подходов к конструированию живых систем позволяет выделять синтетическую биологию на фоне других естественно-научных направлений. Фундаментальным принципом инженерного подхода к созданию биоконструкций является модульность, которая предполагает разбивку сложных систем на управляемые биологические единицы, их реорганизацию или редакцию, последующую сборку и подключение к эндогенным функциям (см. рисунок 2). На биохимическом и клеточном уровнях к таким «биомодулям» относятся нуклеотиды, молекулы, клетки, клеточные и тканевые биологические системы. В качестве основных инструментов для создания новых живых объектов используются технологии рекомбинантных ДНК и инструменты биоинформатики¹³.

13 Synthetic Minimal Cells.
URL: bio.academany.org/2018/synthetic_minimal_cells.html.
A New Era of Protein Interaction Engineering. URL: labmanager.com/insights/a-new-era-of-protein-interaction-engineering-26741 (дата обращения: 16.01.2022).
ЦСР «Северо-Запад» на основе материалов интервью с Шитяковым С. В. (15.10.2021), Клабуковым И. Д. (02.11.2021), Гусевым О. А. (25.10.2021).

Клабуков Илья Дмитриевич, заведующий отделением регенеративных технологий и биофабрикации, Национальный медицинский исследовательский центр радиологии Минздрава России

Источник: Интервью в рамках подготовки доклада с Клабуковым И. Д. от 02.11.2021

«Гипотеза модели синтетической биологии в том виде, в котором она задумывалась в 2010-е гг., оказалась не совсем верной. Сегодня синтетическая биология развивается в рамках инженерного вмешательства в отдельные элементы клетки. Ученые и исследователи вместо того, чтобы думать, как спроектировать клетку, концентрируются на вопросах, например, как научиться синтезировать плазмиды, кодирующие уже связанный рецептор, чтобы из клетки получить высокочувствительный датчик. При этом задачи синтетической биологии уже не звучат так глобально, они стали прикладными, изменился инструментарий.

Изначальная гипотеза синтетической биологии о том, что, овладев синтезом и поняв, как сопоставлять между собой мобильные элементы, мы сможем уйти от традиционной генной инженерии, уже не работает. Исходная идея синтетической биологии была в следующем — при освоении синтеза и понимания всех маленьких кодирующих последовательностей появляется возможность моделирования и проектирования нужных последовательностей на компьютере, что значительно ускорит производственный процесс. Однако оказалось, что такие последовательности не всегда работают, могут работать хуже или элиминироваться клеткой в первых поколениях.

К ведущим российским исследовательским центрам в области синтетической биологии относятся: факультет биоинженерии и биоинформатики МГУ; ННГУ имени Лобачевского работает над прикладными задачами применения синтетической биологии; Институт фундаментальной медицины НГУ; в сфере биоинформатики это ИТМО, ИППИ РАН, ИБХ РАН.

Одной из основных сфер применения синтетической биологии является медицина и развитие новых медицинских продуктов. Например, для нас будет критически важно создание модифицированной (синтетической) микробиоты человека — микрофлоры, которая сможет заселить кишечник или слизистые человека для оказания терапевтических эффектов. Это тематика проекта студенческой команды ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России на конкурсе IGEM в 2021 г. — микробиота для пациентов, проходящих радиотерапию. Предполагается, что она должна заселить слизистые кишечника. Тогда выживаемость пациентов будет выше, степень лучевых осложнений ниже, эффективность лечения выше за счет возможностей большей дозы облучения.

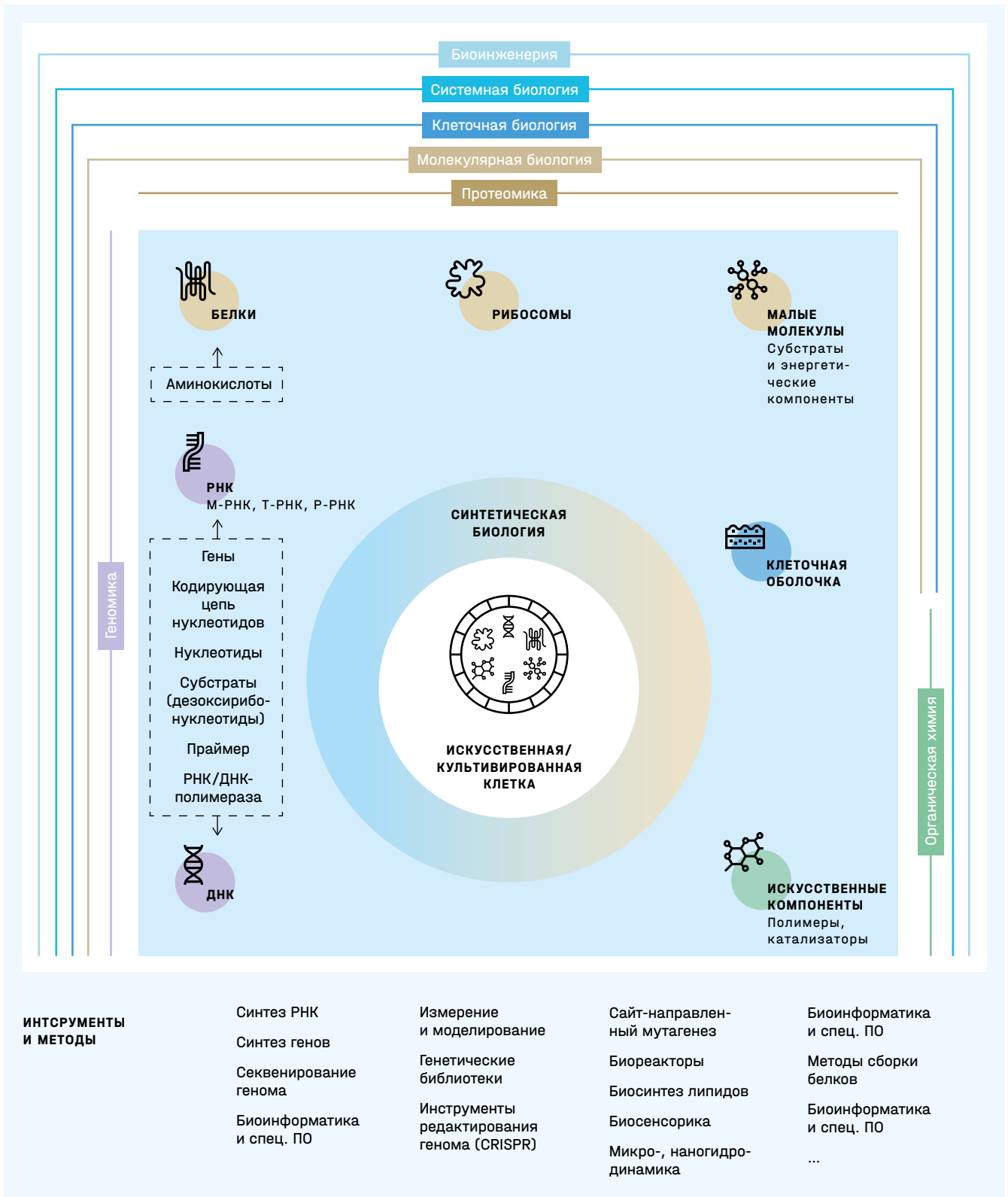


Рис. 2. Инженерный принцип в синтетической биологии — модульная сборка биоконструкций (клетки и ее составных частей)

Источник: ЦСР «Северо-Запад» на основе Synthetic Minimal Cells URL: bio.academany.org/2018/synthetic_minimal_cells.html и Scopus

- Научные методы, инструменты
- Научное направление (или предмет)
- Компоненты, «модули» клетки

Типовой цикл биологического инжиниринга складывается из четырех этапов: *in silico* дизайн, *in vitro* сборка синтетических конструкций и их тестирование, *in vivo* внедрение синтетических конструкций и их тестирование, анализ данных (см. рисунок 3). Этап дизайна предполагает проектирование новых нуклеотидных последовательностей, в т.ч. подбор подходов к проектированию и выбор пакета необходимых программных инструментов. Последующий этап сборки связан с комбинированием ДНК-последовательностей, сбором и хранением новых штаммов. Далее следует стадия испытания полученных штаммов и сбора данных в результате проведенных тестов. Заключительный этап цикла биоинжиниринга — анализ данных, полученных в результате испытаний, и использование результатов анализа для формирования новых исследовательских гипотез и запуска нового цикла биоинжиниринга.

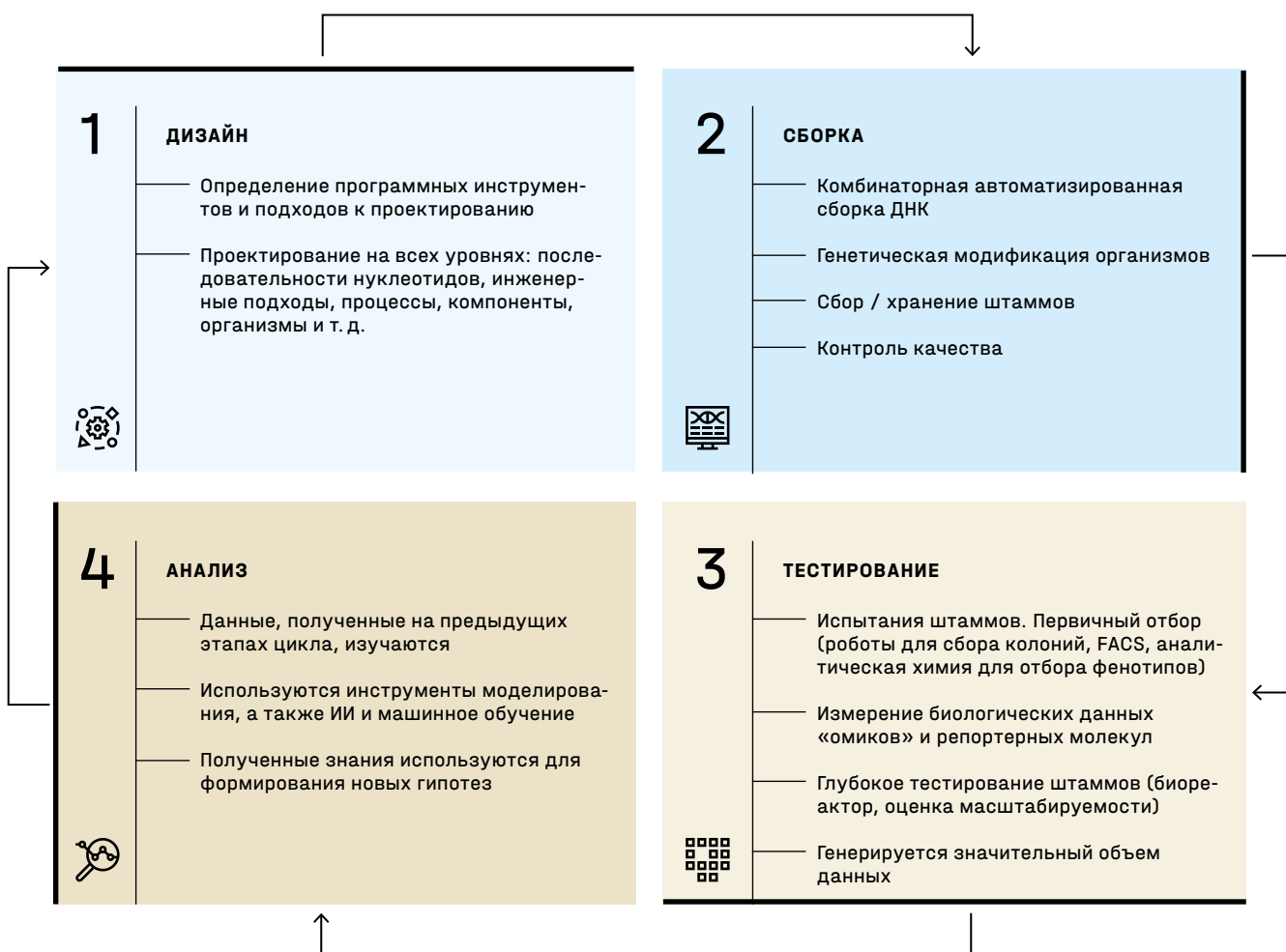


Рис. 3. Цикл биодизайна

Источник: ЦСР «Северо-Запад» на основе Paul S. Freemont; Synthetic biology industry: data-driven design is creating new opportunities in biotechnology. Emerg Top Life Sci 11 November 2019; 3 (5): 651-657. doi: doi.org/10.1042/ETLS20190040

14 Xu C., Hu S., Chen X. Artificial cells: from basic science to applications. Mater Today (Kidlington). 2016 Nov;19(9):516-532. doi: 10.1016/j.mattod.2016.02.020. PMID: 28077925; PMCID: PMC5222523. Paul S. Freemont; Synthetic biology industry: data-driven design is creating new opportunities in biotechnology. Emerg Top Life Sci 11 November 2019; 3 (5): 651-657. doi: doi.org/10.1042/ETLS20190040.

Реализация цикла биоинжиниринга в синтетической биологии предполагает создание единой инструментальной платформы, обеспечивающей возможность детекции и анализа тысяч нуклеотидных фрагментов, синтеза или редакции последовательностей ДНК и РНК, а также геномных и протеомных конструкций, анализа и прогноза биологических свойств и функций вновь синтезированных биологических объектов.¹⁴

3 РАЗВИТИЕ СИНТЕТИЧЕСКОЙ БИОЛОГИИ КАК НАУЧНОГО НАПРАВЛЕНИЯ

Предпосылками для возникновения синтетической биологии как отдельного научного направления являлись прорывные исследования последних десятилетий в области молекулярной биологии, клеточных технологий, геномной и белковой инженерии, органической химии и др.¹⁵ (см. таблицу 2). Определенный прорыв произошел уже в 1950-е гг., когда, используя знания молекулярных основ биологической активности и подходы инжиниринга, ученые впервые стали создавать биологические объекты — эти исследования оформились в направление биоинженерии. В 1970-е гг. в рамках геномной инженерии стали развиваться научные методы и инструменты, направленные на редактирование генетического кода. Появление системной биологии в конце 1990-х и синтетической биологии в начале 2000-х полностью изменило правила конструирования микроорганизмов и более сложных живых систем. Главное отличие синтетической биологии от предшествующих направлений в том, что она рассматривает живые системы как программируемые на генетическом уровне и допускает возможность создания биологических объектов с заданными свойствами.

15 Clarke LJ, Kitney RI. Synthetic biology in the UK — An outline of plans and progress. *Synth Syst Biotechnol.* 2016;1 (4):243-257. Published 2016 Oct 17. doi:10.1016/j.synbio.2016.09.003.

	Решаемая задача	Когда возникло	Почему возникло	Объем публикаций (на 2021 г.), ед.	Рост публикаций CAGR (2000–2021 гг.), %
1. Органическая химия	Изучение свойств и реакций органических соединений, которые содержат углерод	1830-е	Пересмотр концепции живых систем (отказ от теории жизненной силы)	749 906	15
2. Молекулярная биология	Изучение молекулярных основ биологической активности внутри клетки и между ними	1930-е	Исследование структуры гена и механизмов передачи генетической наследственности	652 724	8,3
3. Биоинженерия	Использование принципов биологии и инженерии для создания биологических объектов	1950-е	Преодоление ограничений в медицинских и биологических науках	451 072	26
4. Биотехнологии	Использование живых организмов для решения технологических задач	1970-е	Повышение эффективности технологических процессов, создание новых продуктов (пищевая промышленность, агротех, фарма)	485 355	15

	Решаемая задача / цель	Когда возникло	Почему возникло	Объем публикаций (на 2021 г.), ед.	Рост публикаций CAGR (2000-2021 гг.), %
5. Генная инженерия	Получение рекомбинантных РНК и ДНК, выделение генов из организмов и манипуляция на геномном уровне	1970–1980-е	Генетическая модификация организмов	189 151	25
6. Системная биология	Изучение сложных взаимодействий в живых системах и их моделирование	1990-е	Необходимость понимания структуры, динамики и функций как организма, отдельной клетки, так и внутриклеточных компартментов	857 437	10
7. Синтетическая биология	Проектирование и построение биологических модулей, биологических систем и биологических машин или перепроектирование существующих биологических систем для полезных целей	2000-е	Создание и проектирование новых биологических частей и систем, в том числе не имеющих аналогов в природе (вакцины, бактерии, материалы и пр.)	169 070	12

Табл. 2.
Эволюция научных направлений в области биологии, химии и инженерных наук

Источники: Science Direct, Scopus, Biotechnology Innovation Organization, National Human Genome Research Institute

Интерес к синтетической биологии как исследовательскому направлению продолжает расти. В период 2016–2020 гг. объем публикаций по запросу «Synthetic biology» составил: 12 061 (Scopus), 31 531 (Web of Science), 55 935 (Science Direct). Среди стран — лидеров по объему научных публикаций в области синтетической биологии отмечаются США (более 6,5 тыс. публикаций за 2016–2020 гг.), Китай (4,6 тыс. публикаций за аналогичный период), а также страны Евросоюза (3,7 тыс. публикаций) с Францией и Германией в числе хедлайнеров¹⁶.

¹⁶ ЦСР «Северо-Запад» по данным Scopus, Science Direct, Web of Science.

Тенникова Татьяна Борисовна, заведующая Межкафедральной лабораторией биомедицинской химии СПбГУ, заместитель руководителя лаборатории биогибридных технологий СПбГУ

Источник: Интервью в рамках подготовки доклада с Тенниковой Т. Б. от 01.11.2021

«Синтетическая биология является, с одной стороны, новым направлением, с другой — нет: начало формирования синтетической биологии было еще в начале 2000-х, однако повышенный интерес возник в более позднее время, особенно в последние 2–3 года. Синтетическая биология направлена на создание новых биологических систем, которые проявляли бы жизнедеятельность (искусственные вирусы, микробы, клетки). Это связано с конструкцией новых геномов, их модификацией или созданием из ДНК блоков абсолютно новых. Деятельность с геномом в первую очередь связана с геной инженерией, а синтетическая биология стала естественным продолжением или ответвлением от геной инженерии.

Основные барьеры в развитии синтетической биологии — вопросы биоэтики. Критически важно убедить население, что синтетическая биология и ее технологии безопасны и этичны и не противоречат общепринятым нормам. Это сложно, особенно учитывая многообразие населения Земли.

В России существуют 2 основных барьера для развития синтетической биологии — финансовый и кадровый. Эксперименты в области синтетической биологии требуют огромных денежных средств. Это одна из проблемных точек российской науки, а также системы финансирования и распределения средств в науке. Несмотря на улучшение качества образования и формирование в рамках университетов специализированных подразделений и лабораторий, в России недостаточен уровень образования для решения задач синтетической биологии. Это приводит к недостатку кадров. Это осложняется тем, что кадры старой формации не обладают новыми компетенциями, а новые специалисты еще не сформировались».

Кириченко Евгения Юрьевна, и.о. заведующей кафедрой биоинженерии, Донской государственной технической университет

Источник: Интервью в рамках подготовки доклада с Кириченко Е. Ю. от 05.10.2021

«Синтетическая биология — это работа с искусственным геномом, но не с живым. Биотехнологии представляют собой технологическое направление, направленное на производство сырья. Важно учитывать, что синтетическая биология и биоинженерия — это разные направления. Биотехнологии оперируют как биоинженерией, так и синтетической биологией. Это разные подходы к одним и тем же задачам. В общем виде биотехнологии — более широкое понятие.

Развитие биотехнологий, синтетической биологии и биоинженерии происходит параллельно с вопросами биоэтики. Сегодня происходит бурное развитие регламентации изменений. Человечество смогло добраться до исходного кода, и оно пытается его изменить, не оценивая возможные последствия.

Вопросы биоэтики крайне актуальны. Без учета биоэтики разработки в области биотехнологий и синтетической биологии могут быть нацелены на совершенно другие цели. Важно понимать серьезность этих вопросов. Это актуально и для России, особенно в рамках образования. Сегодня дисциплины, связанные с вопросами биоэтики, совершенно оторваны от практики.

Широкое развитие синтетической биологии связано с ростом сектора ИТ. Специалисты из сферы ИТ умеют абстрагироваться, рассматривать геномы и проектировать их. Это дает большой толчок к развитию. Одна из новых профессий будущего — биоинформатик, обладающий навыками информатика и биолога. Сегодня значительно вырос объем биоданных, что вызвано увеличением объемов секвенирования ДНК, однако не всегда имеется полное представление о том, что с ними делать. Важно также, что программисты могут проанализировать качество рида, в том числе находящегося в открытом доступе».

В настоящий момент в мире сформировались широкие сети специалистов и R&D-институтов в сфере синтетической биологии. Примерами таких R&D-институтов, со сложившимися научными школами, являются: Harvard Medical School, Craig Venter institute, Howard Hughes Medical Institute, CNRS Centre National de la Recherche Scientifique, National Institutes of Health NIH. Общей чертой этих научных центров является междисциплинарность и открытость для партнерств, а также стремление реализовывать масштабные R&D-проекты полного цикла. В последнее десятилетие открывается все больше экспериментальных лабораторий, направленных на развитие и продвижение инженерных подходов в новых сегментах биологических наук (например, Systems Biology and Synthetic Biology Laboratory (Center for Genome Sciences UNAM Campus Morelos), Laboratory for Synthetic Biology (RIKEN Quantitative Biology Center — QBiC), Synthetic Biological Systems Laboratory (The Danino Lab) или лаборатории в рамках биологических и химических факультетов ведущих университетов — MIT (Synthetic Biology Center), University of California (Department of Bioengineering), Technische Universität München (Munich Institute of Biomedical Engineering), University of Tokyo (Synthetic Cell Engineering Lab), Tsinghua University (Center for synthetic and systematic biology)¹⁷.

С 2017 г. в разных странах стали формироваться специальные инфраструктурные центры для биодизайна — Biofoundries, в основе которых лежит концепция биофаундрис (BioFAB). Сегодня их 29, и они образуют консорциум Global Alliance Biofoundries. К задачам Biofoundries относятся быстрое проектирование, создание и тестирование генетически перепрограммированных организмов, ускорение и повышение качества исследований в области биоинженерии и синтетической биологии, обеспечение экономической целесообразности за счет масштабирования процессов тестирования генетических конструкций, снижение издержек совместного использования инфраструктуры, а также разработка правил и стандартов биодизайна. Такой формат открывает возможности для проведения сетевых, распределенных исследований и реализации более крупных проектов, в зависимости от того, где есть инфраструктура и компетенции, необходимые данные, биообразцы¹⁸.

Для решения технологических задач по инжинирингу новых биомолекул и клеток в последнее время складываются целые консорциумы. Например, Консорциум по синтетической клетке в Европе (The European Synthetic Cell Initiative), Суперкластер протеиновой индустрии в Канаде (Protein Industries Canada — PIC), Протеиновый кластер в Нидерландах (The Protein Cluster — TPC), Инновационный кластер синтетической биологии в Лондоне (Synthetic Biology Innovation Cluster, London), Исследовательский центр будущего биомедицинского производства в Великобритании (UK Future Biomanufacturing Research Hub)¹⁹, Государственное объединение научных и прикладных исследований (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, CSIRO) и др. Разворачивание сети таких кластеров на сегодняшний день фактически определяет формирование синтетической биологии как новой отрасли, которая приобретает уже черты не только научного сектора, но и полномасштабной производственной индустрии. Россия, решая актуальные задачи экономики и общества, связанные с необходимостью внедрения технологий синтетической биологии, способна создать собственные альянсы разработчиков и промышленных компаний по целому спектру направлений — от сельского хозяйства до медицины и фармацевтики. Ядром таких альянсов могли бы стать научные центры в области генетики из Новосибирска, Москвы, Санкт-Петербурга и других городов страны.

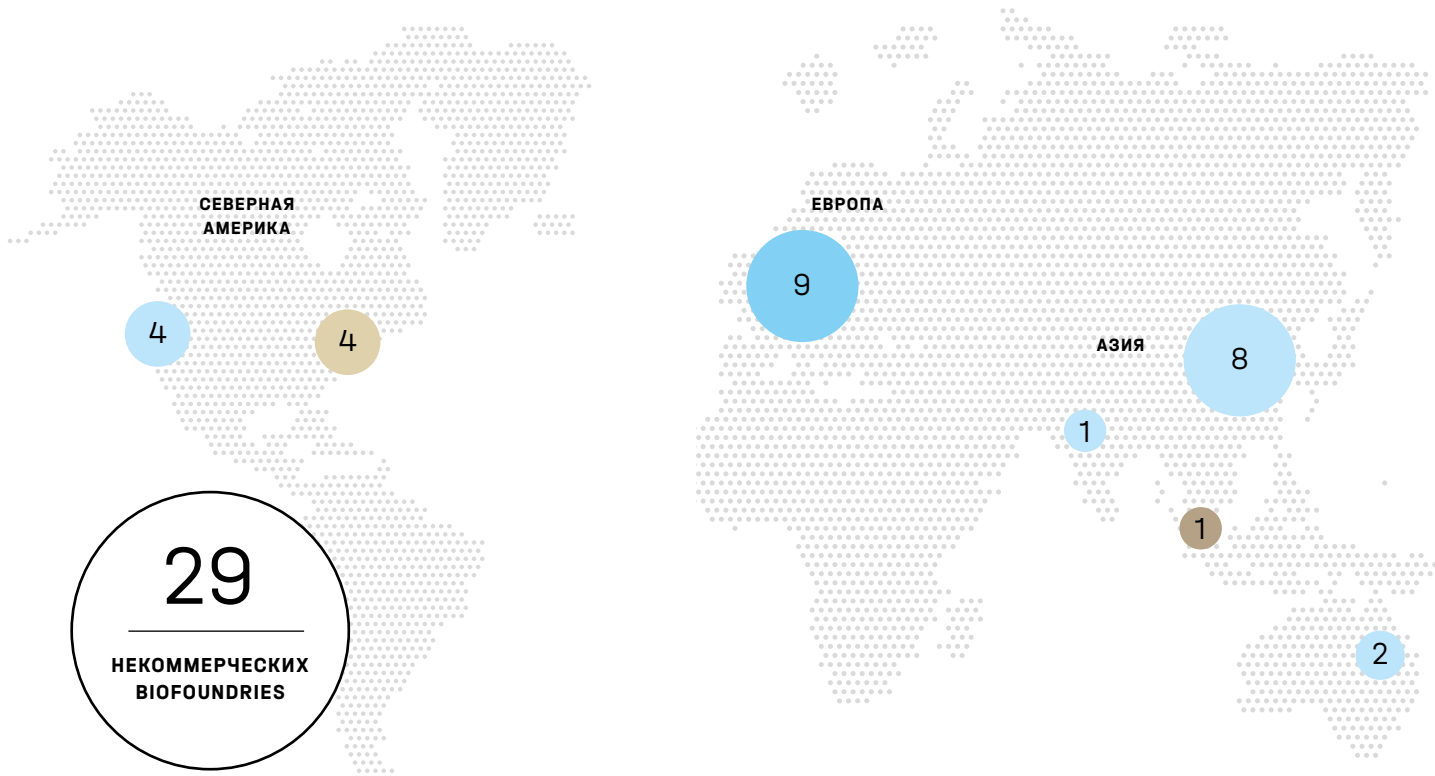
17 По материалам интервью с Шитяковым С. В. (15.10.2021), Гусевым О. А. (25.10.2021), Саркисяном К. С. (28.10.2021), форсайт-сессии «Фронтиры в новых науках» 9–10 ноября 2021 г. и данным Scopus об организациях с наибольшим числом публикаций по тематике синтетической биологии.

18 По материалам Global Biofoundries Alliance.

19 Synthetic Biology UK A Decade of Rapid Progress 2009–2019. URL: ktn-uk.org/wp-content/uploads/2020/08/SBLC-combined-final.pdf (дата обращения: 16.01.2022).

Кейс 2. Global Biofoundries Alliance — Глобальный альянс биофаундрис

Источник: Global Biofoundries Alliance, URL: biofoundries.org



ILLINOIS IGB

**iBioFAB,
Университет Иллинойса**

Производят до 1000 операций с геномом клеток в день с использованием методов TALEN. Стоимость каждой операции менее \$3 долл. США (0,3 % от стоимости аналогичного процесса вне Biofoundry).

Проводят мультимплексный инжиниринг генома дрожжевых культур в автоматическом режиме — это ускоряет процессы в более чем 10 раз при участии одного специалиста

THE UNIVERSITY
of EDINBURGH**Edinburgh Genome
Foundry**

Выполняют более 2000 реакций сборки ДНК в неделю, что в 20 раз быстрее сборки без средств автоматизации и роботизации

SynCTI
Synthetic Biology for Clinical & Technological Innovation**Singapore SynCTI
Foundry**

Предоставляют экономически доступные решения и разработки для малых компаний. Обеспечивают доступ к дорогостоящей инфраструктуре и экспертизе, позволяющих компаниям прототипировать и вывести на рынок новые продукты

Задачи Biofoundry

- Быстрое проектирование, создание и тестирование генетически перепрограммированных организмов
- Ускорение и повышение качества исследований в области биоинженерии и синтетической биологии
- Обеспечение экономической целесообразности за счет масштабирования процессов тестирования генетических конструкций, снижение издержек совместного использования инфраструктуры
- Разработка правил и стандартов биодизайна

Кейс 3. Консорциумы в синтетической биологии

Источники: Protein Industries Canada Annual Report 2021. URL: proteinindustriescanada.ca/uploads/2021-Annual-Report.pdf (дата обращения: 16.01.2022), The European Synthetic Cell Initiative. URL: syntheticcell.eu (дата обращения: 16.01.2022), The Protein Cluster — TPC. URL: theproteincluster.com (дата обращения: 16.01.2022)

The European Synthetic Cell Initiative

Консорциум ученых и исследователей, охватывающий Комиссариат по атомной и альтернативным видам энергии, Делфтский технический университет, Институт биохимии Макса Планка и Оксфордский университет, которые наряду с The Kavli Foundation являются основными спонсорами инициативы.

Европейская инициатива по синтетическим клеткам не получает финансирования от компаний или правительств, но финансируется из бюджета исследовательских институтов и фондов.

Миссия

- Координация и укрепление усилий ученых по созданию функционирующей синтетической клетки из ее основных компонентов
- Содействие реализации знаний о синтетической клетке в технологических приложениях

Задачи

- Поощрение сотрудничества между учеными в области исследований синтетических клеток
- Стимулирование сотрудничества между учеными и промышленностью для разработки новых технологий
- Содействие этическим обсуждениям и обсуждениям в сфере ответственных исследований и инноваций

С момента создания в 2017 г. в рамках European Synthetic Cell initiative были проведены следующие мероприятия: 2017 г. — Future Symposium on Building a Synthetic Cell (Ringberg Castle, Germany), 2018 г. — 1st International Symposium on Building a Synthetic Cell (Delft University of Technology, The Netherlands), SynCell, 2019 г. — Defining the Challenges (Spanish National Research Council, Madrid, Spain).

Protein Industries Canada — PIC

Отраслевая некоммерческая организация, созданная для того, чтобы позиционировать Канаду как глобальный источник высококачественного растительного белка и побочных продуктов растительного происхождения, а также нацеленная на создание инновационной экосистемы продуктов питания, кормов и ингредиентов на растительной основе. Входит в число пяти суперкластеров Канады. Включает 280 организаций-участников, 13 международных участников. Для реализации 22 проектов привлечено 87 малых и средних предприятий, 107 научных и исследовательских институтов. Стоимость реализованных проектов — 357 млн долл.

Цель PIC

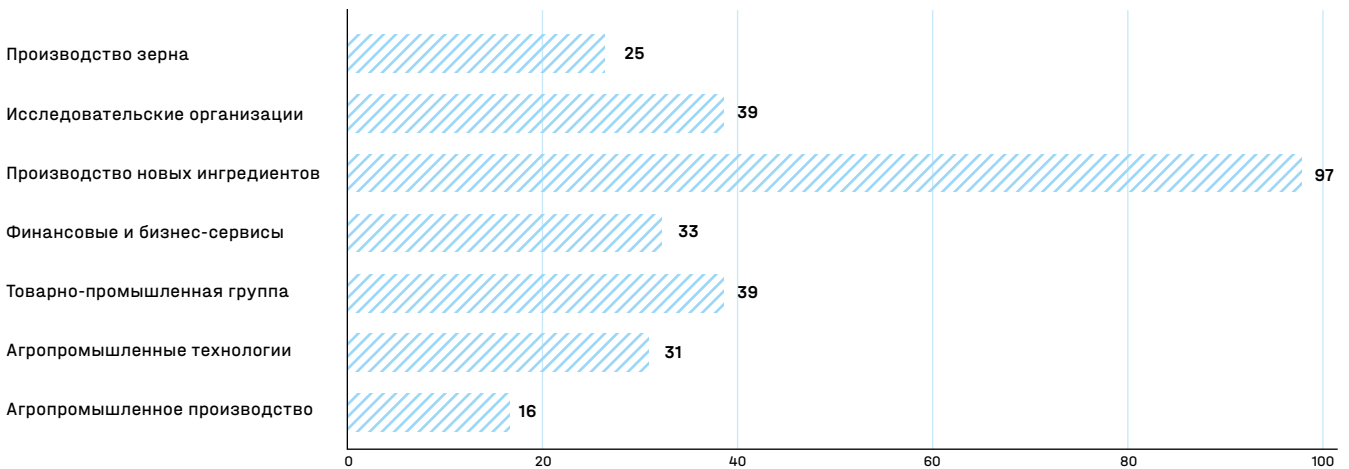
Мотивировать сотрудничество между предприятиями, высшими учебными заведениями и исследовательскими учреждениями для реализации проектов, которые могут трансформировать сектор пищевой промышленности в Канаде.

В 2020–2021 гг. было одобрено 13 технологических проектов общей стоимостью 210 млн долл. с инвестициями 76 млн долл. в белковую промышленность и 134 млн долл. в промышленность.

Тематики проектов

- Разработка новых растительных белковых ингредиентов и продуктов для реализации на зарубежных и канадском рынках
- Разработка новых технологий пищевой инженерии, редактирования свойств продуктов и улучшения функциональности ингредиентов
- Разработка новых технологий борьбы с вредителями
- Развитие технологий ИИ для оптимизации процессов селекции растений

Структура участников по видам деятельности



The Protein Cluster — TPC (Нидерланды)

Глобальная платформа для поставщиков ингредиентов, производителей продуктов питания, розничных продавцов, предприятий общественного питания и других заинтересованных сторон, которые ищут готовые к использованию решения на растительной, веганской или вегетарианской основе.

TPC помогает поставщикам растительных белковых ингредиентов, полуфабрикатов, потребительских товаров и технологий в разработке и коммерциализации их инновационных продуктов.

TPC является инициативой Foodvalley NL, Oost NL и голландских провинций Гелдерланд и Оверэйсел. TPC предлагает готовые к использованию ингредиенты, продукты, технологии и услуги, чем способствует ускорению перехода на экологически безопасные растительные белки.

Примеры технологий и продуктов TPC

- Ферментация микробов с микродорослями
- Заменители яичного белка из естественных микроорганизмов (FUMI)
- Усиливающие вкус протеины из потоков луковых остатков
- Испытательная установка: ускоритель зеленого белка (пилотная производственная линия для пищевых продуктов, позволяющая компаниям, занимающимся экологически чистыми белками, ускорить выход на рынок)

4 КЛЮЧЕВЫЕ ВЫЗОВЫ И ФРОНТИРЫ СИНТЕТИЧЕСКОЙ БИОЛОГИИ ДО 2040 Г.

Ниже представлены 5 основных направлений формирования вызовов развития синтетической биологии, которые встанут перед международным и российским научным сообществом.

1 «Bottom-up»-сборка клетки

Которая предполагает воспроизведение полного цикла жизни клетки, описание функций каждого гена и сокращение их количества, обеспечение процесса автономного роста, репликации и сегрегации ДНК и деления клетки (см. рисунок 4). Для сравнения: первая клетка была получена методом «Top-down»: в 2010 г. из *Mycoplasma mycoides* (бактерия) путем транспозонного мутагенеза получен минимальный функциональный геном (530 кб). Последующие процессы (синтез ДНК, сборка полной круговой хромосомы) привели к созданию синтетического генома JCVI-syn3.0. Позднее были добавлены несколько генов для нормального деления клетки — геном JCVI-syn3.0 +126, 481 ген (человеческая клетка — 30 тыс. генов, простейшая бактерия — 4,5 тыс. генов)²⁰.

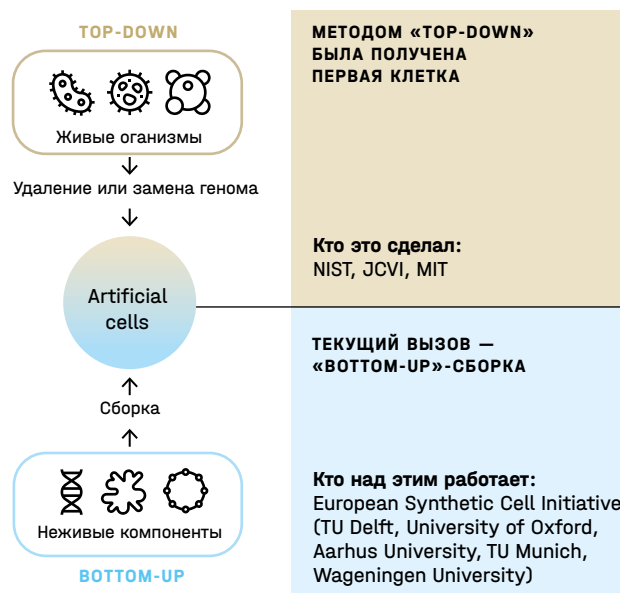


Рис. 4. Ключевые подходы к сборке синтетической клетки

Источник: Xu C., Hu S., Chen X. Artificial cells: from basic science to applications. *Mater Today* (Kidlington). 2016 Nov;19(9). doi: 10.1016/j.mattod.2016.02.020. PMID: 28077925; PMCID: PMC5222523; ЦСР «Северо-Запад» на основе данных из открытых источников

²⁰ Xu C., Hu S., Chen X. Artificial cells: from basic science to applications. *Mater Today* (Kidlington). 2016 Nov;19(9). doi: 10.1016/j.mattod.2016.02.020. PMID: 28077925; PMCID: PMC5222523; Sleator RD. JCVI-syn3.0 — A synthetic genome stripped bare! *Bioengineered*. 2016;7(2). doi:10.1080/21655979.2016.1175847; Boyd M. A., Kamat N. P. Designing Artificial Cells towards a New Generation of Biosensors. *Trends Biotechnol*. 2021;39(9). doi:10.1016/j.tibtech.2020.12.002; Scientists Create Simple Synthetic Cell That Grows and Divides Normally. URL: [nist.gov/news-events/news/2021/03/scientists-create-simple-synthetic-cell-grows-and-divides-normally](https://www.nist.gov/news-events/news/2021/03/scientists-create-simple-synthetic-cell-grows-and-divides-normally) (дата обращения: 16.01.2022).

Получение культивируемой клетки зависит от решения проблем синтеза искусственного генома и молекул белка, позволяющих собирать клеточные структуры. При этом сборка искусственной клетки, как упоминалось ранее, производится под решение конкретной отраслевой задачи. Ускорение, автоматизация и цифровизация процессов работы с геномом, библиотеками данных, а также стандартизация методов и инструментов работы с биологическими материалами — это одни из ключевых направлений исследований для ответа на данный вызов.

2 | Синтез белков

Второй значимый вызов, поскольку белки и те процессы, которые они обеспечивают, являются основой воспроизводства синтетических клеток. Они участвуют в создании среды для деления/роста клетки, передаче сигналов в клетке, метаболизме и пр. Молекулы белка имеют сложное комплексное строение, инжиниринг белка представляет собой многоэтапный, циклический процесс подбора последовательности нуклеотидов, синтеза белков и оценки практической применимости полученных вариантов молекул (на рисунке 5 представлен полный цикл проектирования белков). Инжиниринг белковых молекул под конкретный прикладной результат — одна из самых сложных и актуальных задач современной протеомики, успешность решения которой напрямую будет определять скорость развития синтетической биологии и ее практическую значимость²¹.

21 Chen T. Liang, Olivia M. A. Roscow, Wei Zhang, Recent developments in engineering protein-protein interactions using phage display, *Protein Engineering, Design and Selection*, Volume 34, 2021, gzab014, doi.org/10.1093/protein/gzab014.

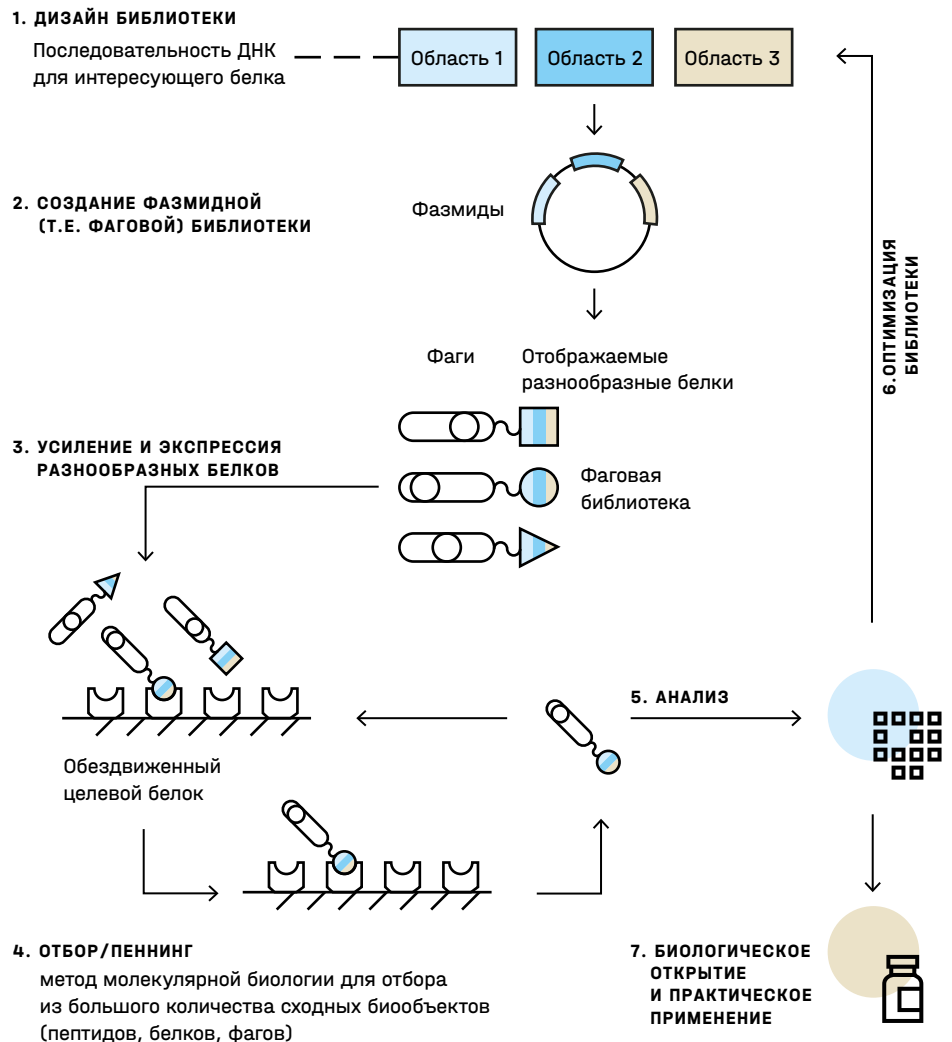


Рис. 5. Цикл проектирования протеомов

Источник: Chen T Liang, Olivia M A Roscow, Wei Zhang, Recent developments in engineering protein-protein interactions using phage display, *Protein Engineering, Design and Selection*, Volume 34, 2021, gzab014, doi.org/10.1093/protein/gzab014

Значимость вызова сборки искусственных протеинов подтверждается также растущим объемом патентов — с 3,8 тыс. патентных заявок по этой теме в мире в 2000 г. до 19,4 тыс. в 2021 г.²² При этом наиболее активно результаты исследований в сфере синтеза белков патентуются в Китае. Большинство патентов в мире на белки, полученные в лабораторных условиях, в 2017-2019 гг. находятся в юрисдикции Китая (63,3%). На второй, третьей и четвертой позициях США (11,5 %), ЕС (10,1 %) и Япония (6 %) соответственно. На весь остальной мир за указанный период приходилось 9 % патентов.

22 По данным базы патентов lens.org

Гусев Олег Александрович, директор Научного центра «Регуляторная геномика», Институт фундаментальной медицины и биологии КФУ; профессор медицины, Университет Юнтендо (Япония)

Источник: Интервью в рамках подготовки доклада с Гусевым О. А. от 25.10.2021

«Синтетическая биология стоит на пути практических решений и оптимизации клеточных технологий. Одним из важных направлений в развитии синтетической биологии является биомиметика. Так, опираясь на исследованные механизмы терморегуляции в живых организмах, мы с исследовательской группой разработали технологию оптимизации хранения клеточной культуры, позволяющую хранить ее при температуре -30 градусов, а не -80 градусов. Это резко упрощает работу с клеточными культурами.

Биотехнологии и рекомбинантные технологии основываются на полученных эмпирическим путем объектах. Синтетическая биология же опирается во многом на вычислительную биологию и моделирование. Ее ключевое отличие в том, что в качестве воздействия она использует модели. Синтетическая биология, используя различные знания омиксных технологий, структурной биологии и т. д., пытается создать законченную систему, основываясь на этих знаниях, — не маленькое эмпирическое воздействие, а концептуальное внедрение целой работоспособной системы.

Основной вызов в сфере синтетической биологии — это научиться максимально правильно вычленять модули и компоненты и понимать последствия их внедрения. Сегодня генерируется огромный массив данных и знаний — секвенирование, профилирование метаболических процессов и т.д. Это дает огромные базы данных. В этой связи появляется другой вызов — объем данных намного превышает возможности их обработки. Большое значение приобретает наличие данных и их доступность, т. е. правильное выделение и обработка данных и метаданных».

3 | Формирование технологической платформы для биодизайна или BioCAD

Высокие темпы развития синтетической биологии до сегодняшнего дня обусловлены ростом компьютерных вычислительных возможностей, развитием науки о данных и ускорением и цифровизацией процессов обработки данных и дизайна новых объектов. Следующий шаг — это создание единой платформы, которая позволит осуществлять цикл биоинжиниринга с максимальной скоростью и создавать живые системы с заданными свойствами в кратчайшие сроки. Главным образом существенная часть исследований в области синтетической биологии должна быть направлена на разработку платформ и вспомогательных технологий, которые позволили бы осуществлять биологический дизайн на основе алгоритмов, где последовательности или части отдельных элементов клетки могут быть собраны в более крупные генетические конструкции или даже геномы или хромосомы²³. Технологические платформы должны позволить ускорить и оптимизировать цикл биодизайна (см. раздел 2) и значительно повысить число экспериментов и шансы получения практически применимого результата.

При этом формирование и развитие таких платформ напрямую зависит от наличия и доступности биоданных. Объем биоданных увеличивается примерно вдвое каждый год²⁴ (на рисунке 6 представлена динамика накопления данных Европейским институтом биоинформатики по основным источникам данных). Однако подобный экспоненциальный рост ставит серьезные задачи по хранению, систематизации и обеспечению кибернетической безопасности данных. На рисунке 7 также представлен рост числа пользователей во всем мире, имеющих доступ к биоданным. Высокие темпы развития синтетической биологии могут привести к обострению вопросов обеспечения биобезопасности, кибербиобезопасности, необходимости формирования стандартов и пересмотра международной правовой базы в сфере биотехнологий²⁵.

Для Российской Федерации особенностью этой группы вызовов является также необходимость развития реинжиниринга зарубежных программных продуктов, особенно по критически значимым направлениям проектирования. В их отсутствие российские научные институты будут постоянно находиться в рисках прекращения обслуживания со стороны иностранных вендоров, а также рисках дефицита процессов сохранения знаний, т.к. оно накапливается в том числе в коде и моделях используемого инженерного программного обеспечения.

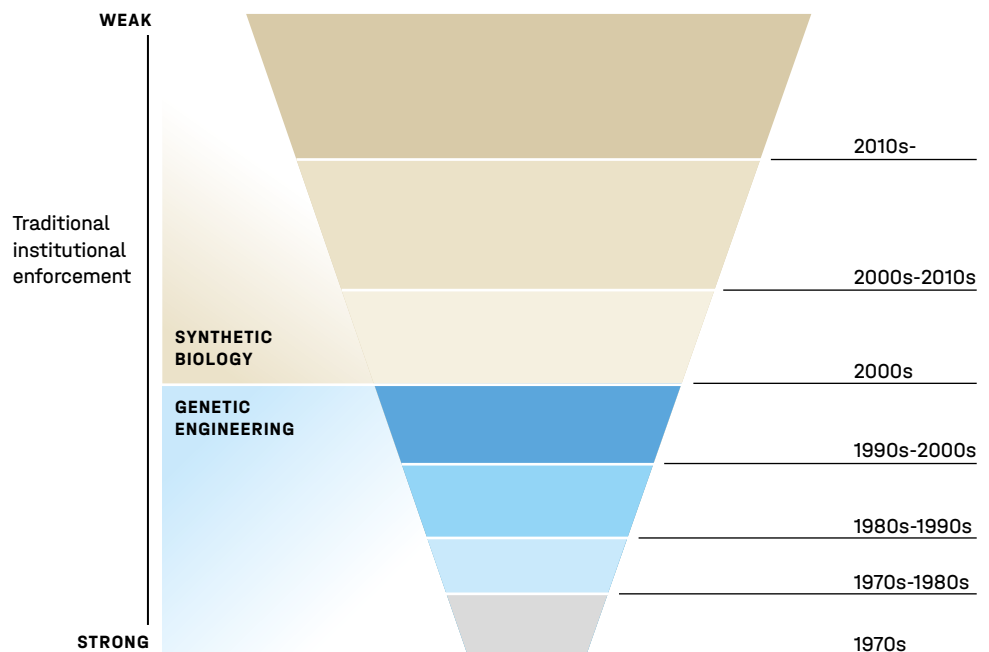
23 Emerging Opportunities in Synthetic Biology Platforms, Synthetic Biology as a Profound Transformative Technology, TechVision Group of Frost & Sullivan, TechVision Analysis / D89D / 00; ЦСР «Северо-Запад» по материалам интервью с Кириченко Е. Ю. (05.10.2021), Клубуковым И. Д. (02.11.2021).

24 По данным Европейского института биоинформатики (EMBL-EBI).

25 Charles E. Cook, Oana Stroe, Guy Cochrane, Ewan Birney, Rolf Apweiler, The European Bioinformatics Institute in 2020: building a global infrastructure of interconnected data resources for the life sciences, Nucleic Acids Research, Volume 48, Issue D1, 08 January 2020, doi.org/10.1093/nar/gkz1033 Trump B. D., Galaitsi S. E., Appleton E., Bleijs D. A., Florin M. V., Gollihar J. D., Hamilton R. A., Kuiken T., Lentzos F., Mampuy R., Merad M., Novossiolova T., Oye K., Perkins E., Garcia-Reyero N., Rhodes C., & Linkov I. (2020). Building biosecurity for synthetic biology. Molecular Systems Biology, 16 (7) [e9723]. doi.org/10.15252/msb.20209723.

Рис. 6. Динамика генерации биоданных в мире (по данным Европейского института биоинформатики EMBL-EBI)

Источник: Charles E Cook, Oana Stroe, Guy Cochrane, Ewan Birney, Rolf Apweiler, The European Bioinformatics Institute in 2020: building a global infrastructure of interconnected data resources for the life sciences, Nucleic Acids Research, Volume 48, Issue D1, 08 January 2020, doi.org/10.1093/nar/gkz1033



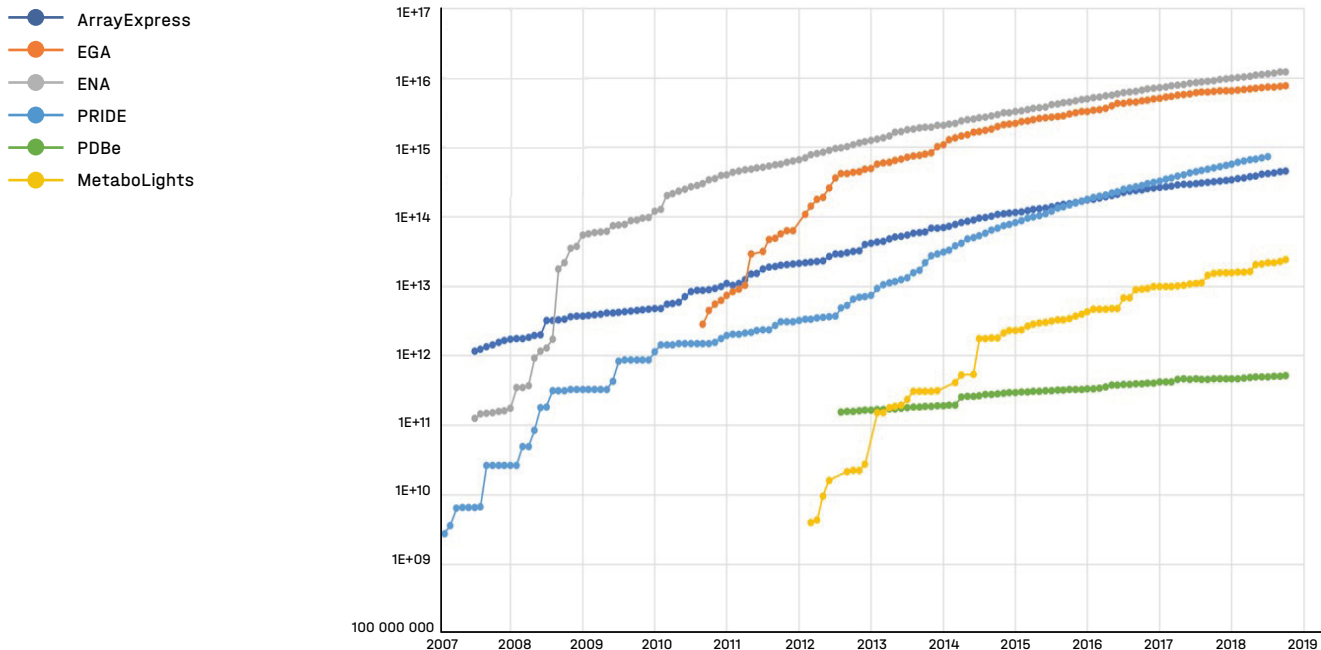


Рис. 7. Динамика численности пользователей по всему миру, имеющих доступ к технологиям геной инженерии (синий) и синтетической биологии (оранжевый)

ArrayExpress — данные функциональной геномики
EGA — Европейский архив генома-фенома
ENA — Европейский архив нуклеотидов
PRIDE — база данных PRoteomics IDentifications
PDBe — Европейский банк данных по белкам
MetaboLights — база данных экспериментов по метаболизму

Источник: Trump B. D., Galaitsi S. E., Appleton E., Bleijs D. A., Florin M. V., Gollihar J. D., Hamilton R. A., Kuiken T., Lentzos F., Mampuy R., Merad M., Novossiolova, T., Oye K., Perkins E., Garcia-Reyero N., Rhodes C., & Linkov I. (2020). Building biosecurity for synthetic biology. *Molecular Systems Biology*, 16 (7), [e9723]. doi.org/10.15252/msb.20209723

4 Вызовы и фронтальные научные задачи, связанные с синтетической биологией, возникают также на стыке с разными сферами ее применения в зависимости от специфики задач, с которыми работает конкретная отрасль

Например, в медицине и фарме — это исследования в области восстановления, синтеза живых тканей, дизайна лекарств и платформ доставки, биосовместимости, антибиотикорезистентности и инфекционных заболеваний (ПЦР-тесты, производство антител), таргетных методов лечения смертельных заболеваний и пр.; в сельском хозяйстве — восстановление плодородия почв, получение новых сортов растений; в пищевой промышленности — производство альтернативного белка (неживотного происхождения), продукты питания с заданными свойствами и изменяемой пищевой ценностью, продовольственные биосенсоры; в энергетике — производство биотоплива, получение микробных топливных элементов, ферменты для биокатализа; в производстве материалов — получение биоразлагаемых и экологически нейтральных материалов; в экологии — получение бактерий и микробных консорциумов, способствующих ликвидации загрязнений и биоремедиации среды (также см. таблицу 1 в разделе 1).²⁶

²⁶ ЦСР «Северо-Запад» по материалам интервью с Кириченко Е. Ю. (05.10.2021), Головиным С. Н. (05.10.2021), Шитяковым С. В. (15.10.2021), Коржиковым-Влах В. А. (25.10.2021), Гусевым О. А. (25.10.2021), Саркисяном К. С. (28.10.2021), Тенниковой Т. Б. (01.11.2021).

5 | В целом сборка клетки/биоконструкции под определенную отраслевую задачу с последующим выходом в производство и масштабированием — это серьезный научный вызов

В этом смысле, с одной стороны, важны трансляционные исследования, которые позволят быстро перевести фундаментальные результаты научных экспериментов и открытий в прикладное применение. С другой — необходимо преодолеть ограничения по масштабированию биопроизводств и возможностям управления свойствами продуктов в зависимости от отраслевой специфики²⁷.

В дополнение нужно отметить, что дискуссии научного сообщества (как в том числе показали результаты форсайт-сессии «Фронтиры в новых науках») сегодня главным образом концентрируются вокруг первого и второго вызовов. По мнению ученых, текущее и перспективное развитие синтетической биологии связано с двумя магистральными фундаментальными направлениями исследований — геномикой и протеомикой. Возможность синтеза клеток зависит от наличия эффективных инструментов работы с геномом и наличия механизмов сборки белков. При этом геномика является относительно более зрелым научным направлением, в котором накоплен значительный объем научных публикаций и рост которого замедляется (среднегодовой рост (CAGR) объема публикаций Scopus составил 11,6 % в 2000–2020 гг., рост в 9,4 раза — с 12 678 публикаций в 2000 г. до 119 586 в 2020 г.). Протеомика развивается активнее, чем геномика (среднегодовой рост (CAGR) объема публикаций Scopus составил 26,2 % в 2000–2020 гг., рост в более 100 раз — с 559 публикаций в 2000 г. до 59 340 в 2020 г.) (см. рисунок 8). По словам ученых-исследователей, работающих в областях биологии и химии, «инжиниринг белка — задача следующего тысячелетия»²⁸.

27 ЦСР «Северо-Запад» по материалам интервью с Шитяковым С. В. (15.10.2021), Клабуковым И. Д. (02.11.2021).

28 По материалам форсайт-сессии «Фронтиры в новых науках» 9–10 ноября 2021 г.



Рис. 8. Таймлайн и приоритетные задачи развития геномики, протеомики и синтетической биологии

Источник: ЦСР «Северо-Запад» по результатам форсайт-сессии «Фронтиры в новых науках» 9–10 ноября 2021 г. и по данным Scopus

В таблице 3* представлены основные научно-технологические фронтиры (научные тематики), за счет которых решаются задачи и вызовы синтетической биологии, обозначенные выше. Список научно-технологических фронтиров сформирован по результатам проведенной форсайт-сессии «Фронтиры в новых науках» 9-10 ноября 2021 г., серии интервью и наукометрического анализа публикаций в базе Scopus.

К фронтам синтетической биологии преимущественно относятся научные темы, связанные с генетическими исследованиями и инструментами редактирования генома (секвенирование генома, CRISPR-Cas9, микрофлюидика, метагеномика и пр.), технологиями работы с большими биологическими данными (машинное обучение, биобанки, платформы искусственного интеллекта и пр.), а также с инструментами и подходами для синтеза протеомов (белок-белковое взаимодействие, инжиниринг белковых сетей, протеиновый фолдинг и пр.), при этом активность исследований в группе фронтиров, связанных с протеомикой, только набирает темп. В приложении 1 приведен подробный перечень исследовательских центров, лидирующих по объемам публикаций в мире и России по обозначенным фронтирным тематикам. Часть игроков уже упомянута в разделе 3 доклада — это Harvard Medical School, Craig Venter institute, Howard Hughes Medical Institute, CNRS Centre National de la Recherche Scientifique, National Institutes of Health NIH, Китайская академия наук, Массачусетский институт технологий.

* В таблице 3 для каждого научно-технологического фронта приведены ключевые вызовы, с которым он согласуется, сфера применения решений (в соответствии с рисунком 1), объемы публикаций, среднегодовой темп роста и цитируемость за период 2000-2020 гг. Список научных тематик отсортирован по объемам публикаций за период 2000-2020 гг. от направлений, которые являются относительно более зрелыми, к направлениям, по которым научная и публикационная активность набирает обороты. Цветом в таблице 3 выделены наиболее динамично растущие фронтиры со среднегодовыми темпами роста выше 20 %. Сокращения в таблице: СБ — синтетическая биология, фарма — фармакология, АПК — аграрно-промышленный комплекс как совокупность сельского хозяйства и пищевой промышленности.

№	Научно-технологические фронтиры	Вызов	Отрасль	Наукометрические показатели, 2000-2020 гг.		
				Объем публ. в мире, тыс.	Среднегод. темп роста (CAGR), %	Цитируемость, средн. на статью
1	Биоинформатика	3, 4, 5	Все отрасли СБ	2 745,1	14,0	112,5
2	Экспрессия генов	1, 2, 5	Все отрасли СБ	2 539,5	6,6	147,2
3	Биомаркеры: онкомаркеры, маркеры старения	2, 4, 5	Медицина	1 474,7	15,7	130,7
4	Полимеразная цепная реакция	1, 2	Все отрасли СБ	1 127,5	5,7	66,3
5	Получение целевых метаболитов	4, 5	Медицина, фарма	1 085,7	7,7	137,8
6	Технологии культивирования клеток и тканей	4, 5	Медицина, фарма, АПК	969,2	4,7	21,9
7	Machine Learning в биологии	3	Все отрасли СБ	613,6	23,8	112,6
8	Синтез и мутирование белков	2, 4, 5	Все отрасли СБ	307,4	2,4	10,6
9	Белок-белковые взаимодействия	2	Все отрасли СБ	299,7	6,3	88,6

№	Научно-технологические фронтиры	Вызов	Отрасль	Наукометрические показатели, 2000-2020 гг.		
				Объем публ. в мире, тыс.	Среднегод. темп роста (CAGR), %	Цитируемость, средн. на статью
10	Биореакторы	4, 5	Медицина, фарма, АПК, энергетика	205,3	10,7	88,9
11	Математическое моделирование в биоинжиниринге	3	Все отрасли СБ	188,3	14,8	38,4
12	Протеиновый фолдинг (предсказание структуры белка)	2, 4, 5	Все отрасли СБ	163,7	3,0	86,9
13	Микрофлюидика	4, 5	Энергетика, экология, биоматериалы	129,9	24,0	69,0
14	Секвенирование генома	1, 2, 5	Все отрасли СБ	126,3	21,0	77,2
15	Инжиниринг белковых сетей	2	Все отрасли СБ	127,5	2,9	16,2
16	Получение вторичных метаболитов растений	4, 5	АПК	119,9	13,9	118,2
17	Сайт-направленный мутагенез	1, 2	Все отрасли СБ	109,5	-0,5	17,4
18	Удешевление персонализированной медицины	4, 5	Медицина	106,5	40,0	16,1
19	Омиксные технологии	4, 5	Медицина и фарма	90,9	54,9	69,1
20	Экстракция генетического материала	1, 2, 5	Все отрасли СБ	88,6	15,7	15,3
21	Адресная доставка био-препаратов, лекарств	4, 5	Фарма	78	23,0	70,8
22	CRISPR-Cas9 (с 2013 г.)	1, 2, 5	Все отрасли СБ	49,6	119,8	75,6
23	Метагеномика	1, 2, 5	Медицина, АПК	46,2	44,9	51,6
24	Кибербезопасность	3	Все отрасли СБ	32,7	56,0	23,7
25	Биобанк данных биологических и генетических ресурсов	3, 5	Все отрасли СБ	31,8	42,3	67,5

№	Научно-технологические фронтиры	Вызов	Отрасль	Наукометрические показатели, 2000-2020 гг.		
				Объем публ. в мире, тыс.	Среднегод. темп роста (CAGR), %	Цитируемость, средн. на статью
26	Анализ биотехнологического потенциала редких экстремофильных микроорганизмов, растений, грибов	4, 5	АПК	31,6	14,3	16,7
27	Клеточная фабрика	1, 4, 5	Все отрасли СБ	29,6	32,3	32,6
28	Описательный анализ геномов микроорганизмов	1, 4	Медицина, АПК, экология	25,3	15,6	23,1
29	Нейрогенез и терапия нейродегенеративных заболеваний	4	Медицина	25,3	19,5	53,4
30	Генное редактирование, создание растений с «запрограммированными» свойствами	4, 5	АПК	100	12,9	29,6
31	Поиск новых «таргетов» в медицине	2, 4, 5	Медицина	70,5	13,1	35,0
32	Производство биопрепаратов	4, 5	Фарма	63,1	11,9	54,5
33	Вирусные векторы доставки	4, 5	Медицина и фарма	47,7	7,0	18,5
34	Синтез РНК	1, 2, 5	Все отрасли СБ	40,9	2,2	44,8
35	Фаговые библиотеки	2, 5	Все отрасли СБ	37,6	3,7	27,4
36	Молекулярные машины	1, 2, 4	Все отрасли СБ	34,3	8,5	36,4
37	Клеточные взаимодействия	1, 4, 5	Все отрасли СБ	29,3	2,7	22,3
38	Скафолд белков	2	Все отрасли СБ	27,2	9,5	27,2
39	Молекулярные инструменты	1, 2, 5	Все отрасли СБ	23,6	11,5	26,5
40	Нормативно-правовое регулирование синтетич. биологии	4, 5	Все отрасли СБ	23	55,0	23,8
41	Маркеропосредованная селекция	4, 5	АПК	21,7	10,5	8,5

№	Научно-технологические фронтиры	Вызов	Отрасль	Наукометрические показатели, 2000-2020 гг.		
				Объем публ. в мире, тыс.	Среднегод. темп роста (CAGR), %	Цитируемость, средн. на статью
42	Концепция «one health»	4	Медицина	18,2	20,9	29,5
43	Производство химерных белков (содержащих активность двух и более целевых белков)	2, 4, 5	Все отрасли СБ	16,8	-0,5%	18,3
44	Синтез питательных сред для выращивания клеточной массы	4, 5	Медицина, фарма, АПК, энергетика	15,9	10,3	20,6
45	Организмы с модифицированными ДНК/РНК	1, 4, 5	Все отрасли СБ	14,6	7,9	16,0
46	Биосурфактанты	4, 5	Энергетика, экология	14	14,3	22,9
47	Культированная кожа	1, 4, 5	Медицина	13,4	10,7	31,9
48	Редактирование клеток человека (клетки крови, стволовые клетки и другие)	1, 2, 4	Медицина	12,3	47,5	36,2
49	Геномные библиотеки растений и микроорганизмов	3, 5	Все отрасли СБ	12	-4,0	16,3
50	Исследование глиобластомы, механизма блокирования передачи	2, 4	Медицина и фарма	11,3	16,7	22,4
51	Создание рекомбинантных белков	2, 4, 5	Все отрасли СБ	10,1	12,1	59,9
52	Биопечать органов	4	Медицина	8,5	119,7	40,5
53	Биоданные	3	Все отрасли СБ	6,9	15,2	15,0
54	Сетевые биолаборатории	3, 4	Все отрасли СБ	6	6,7	8,9
55	Культирование клеток	1, 5	Медицина, фарма, АПК, биоматериалы	5,3	7,9	23,1
56	De novo получение клеток через геномное редактирование	1, 4, 5	Все отрасли СБ	4,7	39,3	17,1
57	Методы лечения орфанных заболеваний	2, 4, 5	Медицина и фарма	4,7	14,9	20,1

№	Научно-технологические фронтиры	Вызов	Отрасль	Наукометрические показатели, 2000–2020 гг.		
				Объем публ. в мире, тыс.	Среднегод. темп роста (CAGR), %	Цитируемость, средн. на статью
58	Производство альтернативных белков	2, 5	Все отрасли СБ	4,5	12,2	16,1
59	Анализ микроорганизмов-термофилов	4, 5	АПК, экология	3	6,8	16,5
60	Редактирование микроорганизмов для биоремедиации	4, 5	АПК, экология	2,2	71,9	27,4
61	Трансформация бактериальной клетки	1, 4, 5	Все отрасли СБ	2	6,4	23,0
62	Определение экологических ролей симбиотических микроорганизмов	4, 5	Экология	1,1	17,1	18,7
63	Генетические библиотеки	1, 2, 5	Все отрасли СБ	1	11,8	24,1
64	Цифровое моделирование в биодизайне	3, 5	Все отрасли СБ	0,8	15,1	11,7
65	Оцифровка сознания и Wetware для переноса сознания	3, 4, 5	Медицина	0,57	21,6	8,1
66	Химерные животные	4, 5	Медицина, АПК	0,52	4,0	16,5
67	Хранение информации с помощью микроорганизмов (с 2010 г.)	1, 5	Все отрасли СБ	0,37	18,5	31,9
68	Платформы ИИ в биоинжиниринге	3, 5	Все отрасли СБ	0,35	53,9	12,4
69	Создание искусственных нуклеиновых кислот	1, 2, 5	Все отрасли СБ	0,3	8,6	10,2
70	Создание новых лекарственных платформ	4, 5	Медицина и фарма	0,24	61,8	24,8
71	Химерные микроорганизмы	1, 4, 5	Фарма, АПК, энергетика, экология	0,2	0,6	21,6
72	Персонализированная ветеринарная диагностика (с 2010 г.)	4, 5	АПК	0,17	15,3	6,3

№	Научно-технологические фронтиры	Вызов	Отрасль	Наукометрические показатели, 2000-2020 гг.		
				Объем публ. в мире, тыс.	Среднегод. темп роста (CAGR), %	Цитируемость, средн. на статью
73	Исследование «темных» РНК для использования в качестве биомаркеров в персонализированной медицине (с 2016 г.)	1, 2, 4	Медицина и фарма	0,15	8,4	43,0
74	Микробиом, метагеномика, метаболомика (с 2017 г.)	1, 2, 5	Медицина	0,1	165,3	22,7
75	Синтез новых платформ вакцин	4, 5	Медицина и фарма	0,1	40,0	22,8

Табл. 3.
Научно-технологические фронтиры синтетической биологии

Источник: ЦСР «Северо-Запад» по данным Scopus

В дополнение к таблице 3 в качестве еще одной формы визуализации представлена матрица научно-технологических фронтиров (набор научных тематик на матрице полностью дублирует перечень в таблице), которая визуально делит все тематики на четыре сегмента (см. рисунок 9). Особого внимания заслуживают верхние левый и правый сегменты, куда попадают наиболее динамично развивающиеся фронтиры, со среднегодовыми темпами роста публикаций более 12% в год в период 2000–2020 гг. (CRISPR-Cas9, омиксные технологии, белок-белковое взаимодействие, метагеномика, кибербезопасность, редактирование клеток человека и др.).

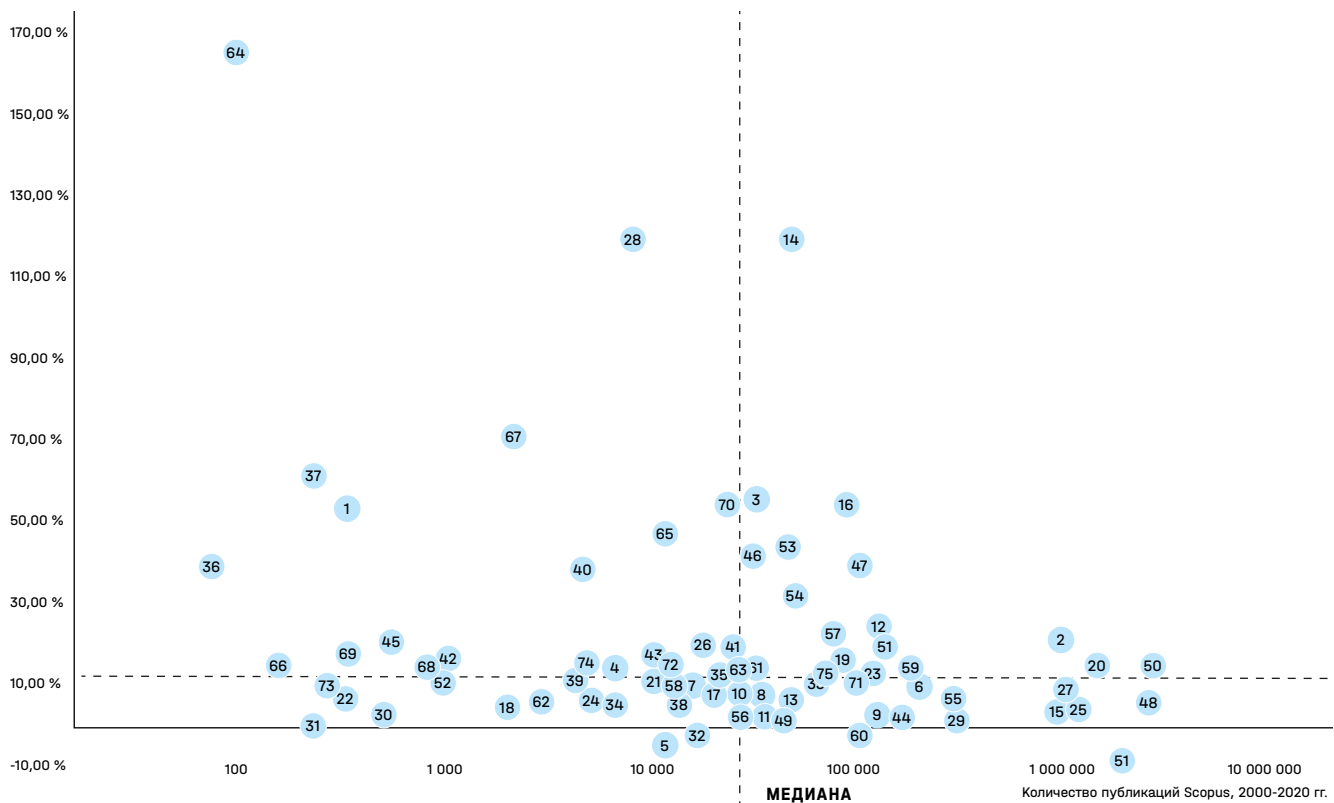


Рис. 9.
Матрица научно-технологических фронтиров синтетической биологии

Источник: ЦСР «Северо-Запад» по данным Scopus, 2000-2020 гг. Примечание: на матрице отражены фронтиры с объемом публикаций более 1000 статей за анализируемый период

- | | | | |
|--|--|--|--|
| 1. Платформы ИИ | 24. Культивирование клеток | 43. Биосурфактанты | 63. Описательный анализ геномов микроорганизмов |
| 2. Machine Learning | 25. Полимеразная цепная реакция | 44. Протеиновый фолдинг (предсказание структуры белка) | 64. Микробиом, метагеномика, метаболомика |
| 3. Кибербезопасность | 26. Концепция «one health» | 45. Оцифровка сознания и Wetware для переноса сознания | 65. Редактирование клеток человека |
| 4. Биоданные | 27. Получение целевых метаболитов | 46. Биобанк данных биологических и генетических ресурсов | 66. Становление персонализированной ветеринарной диагностики |
| 5. Геномные библиотеки | 28. 3D-биопечать (органов, тканей) | 47. Персонализированная медицина | 67. Редактирование микроорганизмов для биоремедиации |
| 6. Биореакторы | 29. Синтез и мутирование белков | 48. Экспрессия генов | 68. Цифровое моделирование в биодизайне |
| 7. Синтез питательных сред для выращивания клеточной массы | 30. Химерные животные | 49. Синтез РНК | 69. Хранение информации с помощью микроорганизмов |
| 8. Молекулярные машины | 31. Химерные микроорганизмы | 50. Биоинформатика | 70. Нормативно-правовое регулирование синтетической биологии |
| 9. Инжиниринг белковых сетей | 32. Производство химерных белков | 51. Секвенирование генома | 71. Создание растений с «запрограммированными» свойствами |
| 10. Скафолд белков | 33. Производство биопрепаратов | 52. Генетические библиотеки | 72. Исследования глиобластомы |
| 11. Фаговые библиотеки | 34. Сетевые лаборатории | 53. Метагеномика | 73. Векторные лекарственные препараты |
| 12. Микрофлюидика | 35. Молекулярные инструменты | 54. Клеточная фабрика | 74. Методы лечения орфанных заболеваний |
| 13. Вирусные векторы доставки | 36. Синтез новых платформ вакцин | 55. Белок-белковые взаимодействия | 75. Поиск новых «таргетов» в медицине |
| 14. CRISPR-Cas9 | 37. Создание новых лекарственных платформ | 56. Клеточные взаимодействия | |
| 15. Технологии культивирования клеток и тканей | 38. Организмы с модифицированными ДНК/РНК | 57. Адресная доставка биопрепаратов, лекарств | |
| 16. Омиксные технологии | 39. Производство альтернативных белков | 58. Культивированная кожа | |
| 17. Маркеропосредованная селекция | 40. De novo получение клеток через геномное редактирование | 59. Математическое моделирование в геномике | |
| 18. Трансформация бактериальной клетки | 41. Нейрогенез и терапия нейродегенеративных заболеваний | 60. Сайт-направленный мутагенез | |
| 19. Экстракция генетического материала | 42. Определение экологических ролей симбиотических микроорганизмов | 61. Анализ биотехнологического потенциала редких экстремофильных микроорганизмов, растений, грибов | |
| 20. Биомаркеры: онкомаркеры, маркеры старения | | 62. Анализ микроорганизмов-термофилов | |
| 21. Создание рекомбинантных белков | | | |
| 22. Создание искусственных нуклеиновых кислот | | | |
| 23. Получение вторичных метаболитов растений | | | |

5

КАК УСТРОЕНА ОТРАСЛЬ СИНТЕТИЧЕСКОЙ БИОЛОГИИ И ГДЕ ЗОНА ПРОРЫВНЫХ ИННОВАЦИЙ

В зону прорывных инноваций синтетической биологии попадают технологические решения, направленные на трансформацию традиционных технологических цепочек в отраслях. Технологии биодизайна и другие технологические инструменты, позволяющие воспроизводить клеточные процессы, применяемые в синтетической биологии, обеспечивают повышение производительности, сокращение затрат ресурсов за счет возможности программирования микроорганизмов под конкретную отраслевую задачу. Влияние синтетической биологии на технологические цепочки будет разным и будет зависеть от особенностей конкретной отрасли применения. В некоторых отраслях синтетическая биология изменит только сырье, которое используют компании, не влияя на технологические процессы, в других — коренным образом трансформирует технологические цепочки и производственный процесс. В разделе 1 в кейсе 1 приведен пример производства культивируемого клеточного мяса, который хорошо иллюстрирует эту ситуацию. Другие примеры приведены ниже.

Кейс 4. Отраслевое применение синтетической биологии

Добыча полезных ископаемых

Технологии синтетической биологии способствуют улучшению производительности существующих продуктов или процессов. Так, в горнодобывающей промышленности применяется кучное выщелачивание в местах добычи таких металлов, как медь, уран и золото. Традиционно для обработки измельченной руды применяется щелочной цианид, который образует токсины, а само производство приводит к образованию большого количества отходов. Некоторые компании, такие как Rio Tinto (Испания), BHP Cerro Colorado (Чили), Cananea (Мексика), экспериментируют с биовыщелачиванием и биоокислением. За счет применения инструментов синтетической биологии они извлекают различные редкие металлы, используя вместо щелочного цианида воду и микроорганизмы.

Пищевые производства

Синтетическая биология позволяет снижать затраты на дефицитные сырьевые ресурсы, получая продукцию посредством ферментации растительного сырья. Примером изменения отраслевых технологических цепочек можно считать разработку новых методов производства ванилина без использования ванильных бобов. Швейцарская биотехнологическая компания Evolva с 2011 г. работает с мировым лидером International Flavors and Fragrances (IFF) над лабораторной разработкой ванилина. Evolva вложила средства в разработку ингредиентов, оптимизацию их использования и сокращение времени, необходимого для масштабирования производства, в то время как IFF помогает масштабировать производство и ускоряет процесс коммерциализации.

Источник: Synthetic Biology Is About to Disrupt Your Industry. URL: bcg.com/publications/2022/synthetic-biology-is-about-to-disrupt-your-industry (дата обращения: 16.01.2022).

Синтетическая биология — быстрорастущий и инвестиционно привлекательный сектор рынка. С 2009 г. наблюдается рост инвестиций в синтетическую биологию. В первой половине 2020 г. стартапы в области синтетической биологии привлекли 3 млрд долл.²⁹, а к концу 2020 г. объем инвестиций превысил 7,5 млрд долл. (см. рисунок 10). Объем рынка синтетической биологии в 2021 г. составил 6,88 млрд долл. (см. рисунок 11). К 2028 г. прогнозируется рост до 11 млрд долл., при этом совокупный среднегодовой темп роста составит 7 %.

29 Synthetic Biology Startups Raised \$3 Billion In The First Half Of 2020. URL:forbes.com/sites/johncumbers/2020/09/09/synthetic-biology-startups-raised-30-billion-in-the-first-half-of-2020/?sh=2f131a021265 (дата обращения: 16.01.2022).



Рис. 10. Инвестиции в синтетическую биологию в 2009-2020 гг., млрд долл.

Источник: Synbiobeta market research

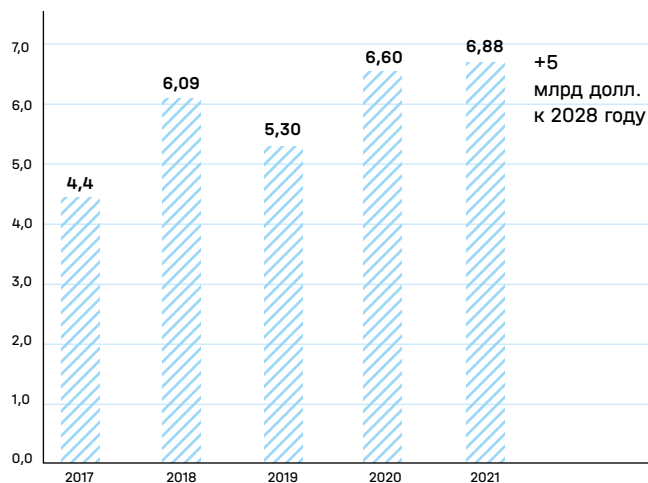


Рис. 11. Объемы рынка синтетической биологии, 2017-2021 гг., млрд долл.

Источник: Synbiobeta market research

Структурно рынок синтетической биологии складывается из четырех сегментов: 1) компании, разрабатывающие различный софт (программные продукты) для биодизайна; 2) компании, производящие оборудование и хард-системы; 3) компании, производящие реагенты и химикаты, необходимые для R&D и биопроизводства; 4) отраслевые стартапы, формирующие новые рынки (например, рынки вакцин определенного типа, синтезированные специи/мясо, биотопливо и пр.) (см. рисунок 12)³⁰.

30 Synbiobeta: SynBio Stack. URL:synbiobeta.com/the-synbio-stack-part-1/ (дата обращения: 16.01.2022).



Рис. 12. SynBio Stack — структура рынка синтетической биологии

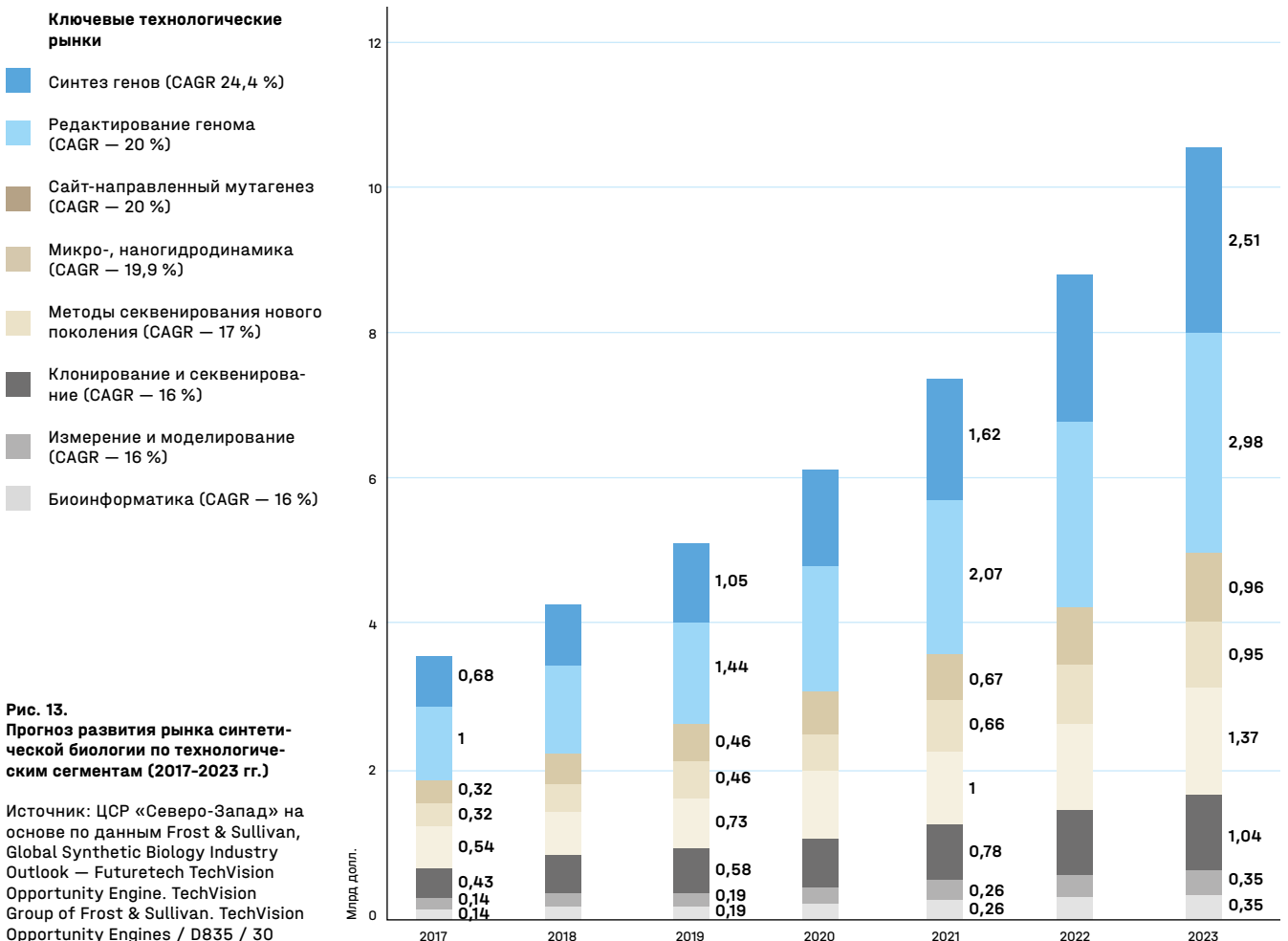
Источник: Sinbiobeta. URL: synbiobeta.com/the-synbio-stack-part-1

В этих сегментах сосредоточено более 480 стартапов по всему миру в 2020 г., по данным StartUs insights. Также в них представлены компании-единороги (стартапы с капитализацией более 1 млрд долл. США), реализующие продукты, полученные с использованием инструментов и методов синтетической биологии. В число таких продуктов входят, например, белковые соединения для медицины (Argogen), лекарственные биопрепараты (Biosplice Therapeutics), ИИ-системы для молекулярного проектирования (XtalPi), альтернативный пищевой белок (Impossible Foods), биотекстиль (Spiber) и др.³¹

С точки зрения технологической специализации, по оценкам Frost&Sullivan, к самым быстрорастущим относятся рынки, связанные с дешевыми технологиями синтеза ДНК, методами секвенирования, измерения и моделирования, методами и средствами работы с биоданными. Далее приведены сегменты и оценки среднегодовых темпов роста до 2023 г. — синтез генов (CAGR — 24,4 %), редактирование генома (CAGR — 20 %), сайт-направленный мутагенез (CAGR — 20 %), микро-, наногидродинамика (CAGR — 19,9 %), методы секвенирования нового поколения (CAGR — 17 %), клонирование и секвенирование (CAGR — 16 %), измерение и моделирование (CAGR — 16 %), биоинформатика (CAGR — 16 %) (см. рисунок 13)³².

³¹ По данным портала Crunchbase.

³² Frost & Sullivan, Global Synthetic Biology Industry Outlook — Futuretech TechVision Opportunity Engine. TechVision Group of Frost & Sullivan. TechVision Opportunity Engines / D835 / 3./



Первая половина 2021 г. стала рекордной для отрасли: инвестиции составили 4,7 млрд долл. в I квартале и 4,2 млрд долл. во II квартале. Также в 2020 г. по отношению к 2019 г. наблюдался скачок более чем в 2 раза, во многом он обусловлен потребностью в решениях в фармакологии, медицине, связанных с COVID-19. Наибольший объем инвестиций приходится на области здравоохранения и пищевой промышленности (более 5,5 млрд долл. США в первой половине 2021 г., или 63% от всего объема инвестиций в отрасль) (см. рисунок 14)³³.

³³ Synbiobeta. Built with biology Q2 2021 Report.

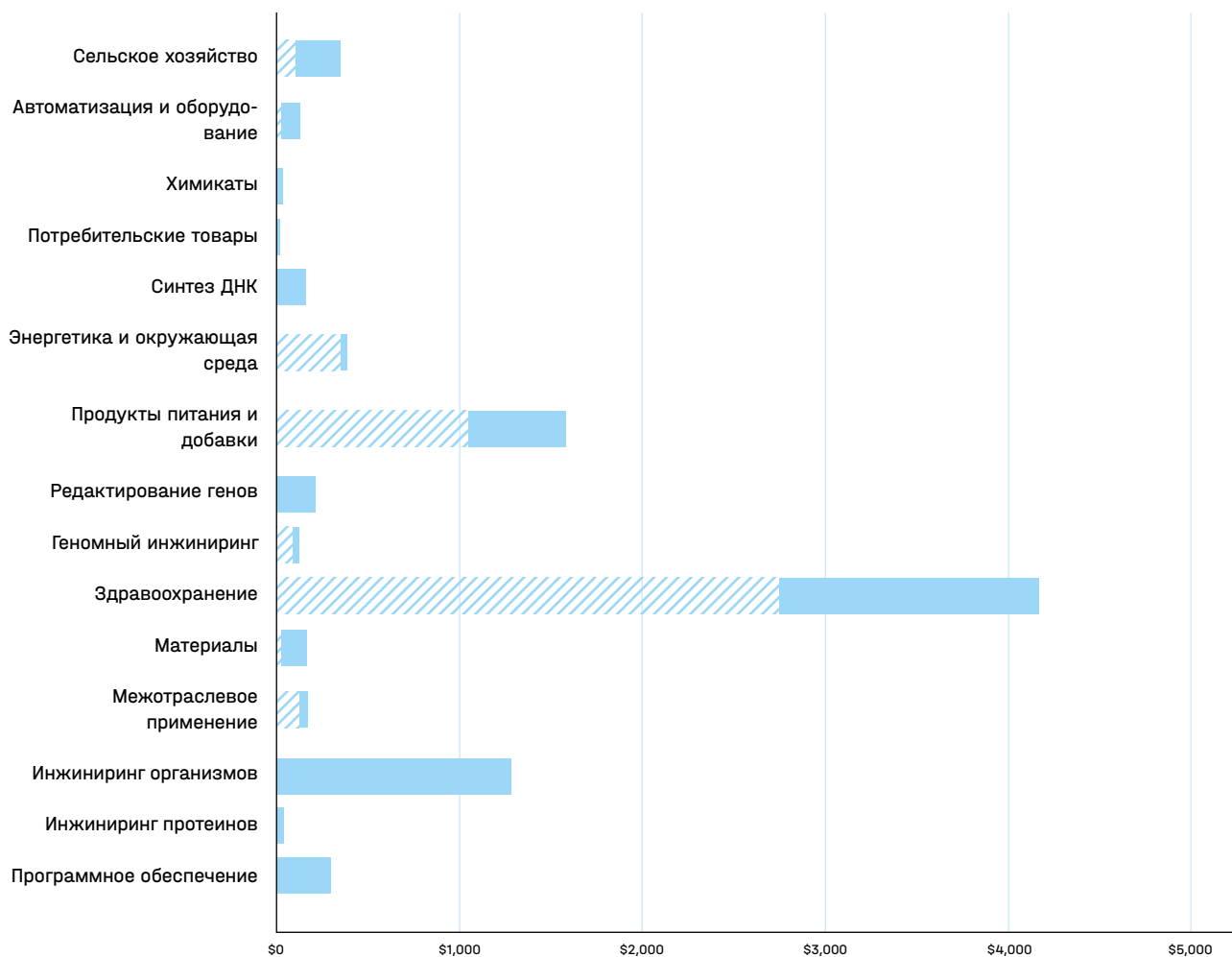


Рис. 14. Объем инвестиций в компании синтетической биологии по отраслям, I и II квартал 2021 г., млн долл. США

▨ 1Q
■ 2Q

Источник: Synbiobeta. Built with biology Q2 2021 Report

К основным категориям инвесторов сегодня относятся: 1) зрелые игроки рынков фармацевтики, пищевой индустрии и др., у которых есть бюджет на эксперименты (например, Johnson & Johnson, Nestle SE); 2) ИТ-компании, которые инвестируют в проекты на стыке цифровых и биотехнологий (Microsoft, Alphabet, Netscape Communications); 3) венчурные компании, вкладывающиеся в высокорисковые проекты в сфере синтетической биологии (LSP BioVentures (США), Global Secure Invest (Чехия), Casdin Capital (США), Temasek Holdings (Сингапур), Horizons Ventures (Китай); 4) государственные фонды, поддерживающие R&D-институты, экспериментальные лаборатории в исследованиях на ранних стадиях (Blue Sky Research) (рамочные программы ЕС по НТП: приоритет «Биотехнологии», MaxSynBio, Fraunhofer Society) (таблица 4).

Типы инвесторов	Особенность	Примеры
ИТ-компании	Понимают, как работает ИТ-сектор Ищут новые растущие сегменты рынка Инвестируют в компании на стыке ИТ и биотеха	Microsoft, Google, PayPal, Sun Microsystems, Netscape, Yahoo!, Venmo
Венчурные фонды и инвестиционные компании*	Преимущественно работают с биомедицинскими, биотехнологическими, фудтех-стартапами	LSP BioVentures (США), Global Secure Invest (Чехия), Cascade Investment (США), Casdin Capital (США), Tiger Global Management (США), Viking Global Investors (США), Temasek Holdings (Сингапур), Horizons Ventures (Китай)
Зрелые игроки**	Компании, которые ищут новые возможности роста и у которых есть бюджет для экспериментов	Johnson & Johnson — терапевтические средства, средства личной гигиены, диагностические и лекарственные платформы, вакцины (R&D: 12,1 млрд долл.) Saudi Aramco — технологии биокатализа в нефтепереработке, водородная и биоэнергетика (R&D: 0,7 млрд долл.) Nestle SE — платформы разработки белков, снижение выбросов CO ₂ в цепочках поставок (R&D: 1,7 млрд долл.) China Everbright Environment Group — зеленые технологии по использованию биомассы, биоремедиация воды (R&D: 20 млн долл.)
Государственные программы	Операторами программ выступают — министерства/академии наук Великобритания и США — имеют спецпрограммы по синтетической биологии В большинстве стран синбио — отдельный приоритет программ по НТР	США — Департамент обороны: Программа «Живые производственные системы» Китай — Программа 973: подраздел «Синтез и передовые науки» ЕС — рамочные программы по НТР: приоритет «Биотехнологии» Великобритания — «Синтетическая биология для роста» Германия — «Биотехнология 2020+» Франция — «Инвестиции в будущее»

Табл. 4.
Типы инвесторов в сегмент синтетической биологии

Источники: SynBioBeta, Crunchbase, Ministry of Science and Technology of China, Asia - Pacific Biotech, CORDIS, Biotechnology and Biological Sciences Research Council, DAPRA

* крупнейшие инвесторы в стартапы, которые привлекли наибольший объем инвестиций в 2020-2021 гг., по рейтингу SynBioBeta и данным Crunchbase (Impossible foods, Ginkgo Bioworks, Intellia Therapeutics, Zymergen, Jellatech, MeliBio)

** крупнейшие компании по рыночной капитализации в отраслях здравоохранения, медицины, пищевой промышленности и экологии (окружающая среда, ремедиация, утилизация отходов)

Экосистема игроков синтетической биологии как научного направления и глобальной производственной индустрии уже на сегодняшний день достигла огромного масштаба и охватывает все ключевые экономические центры мира, включая США, Канаду, страны Западной Европы, Китай (см. карту ключевых игроков на рисунке 15). Экосистему образуют университеты и исследовательские центры (свыше 60 в разных странах мира), 29 Biofoundries, не менее пяти глобальных специализированных консорциумов (подробно об участниках исследовательского рынка в разделе 3), а также активно развивающийся в разных рыночных нишах синтетической биологии бизнес — свыше 250 стартапов и 15 компаний-единорогов.

Типы игроков

1

R&D-центры (университеты и научные центры, осуществляющие НИОКР)

2

Компании (заказчики прикладных решений, стартапы и в т. ч. компании-единороги)

3

Инвесторы (зрелые игроки рынка, технологические компании, венчурные фонды, государственные фонды)

4

Государство (поддержка науки, инфраструктура и условия для инноваций, правовое регулирование)

5

Консорциумы (объединения игроков для решения сложных задач)

КАНАДА

- 2 R&D-центра (University of Toronto, Université McGill)
- 13 стартапов (Deep Genomics, Concentric, Ardra Bio и др.)
- 2 BioFoundries

США

- 32 R&D-центра
- 184 стартапа (Ginkgo Bioworks, iGEM и др.)
- 6 BioFoundries
- 11 компаний (Intarcia Therapeutics, Biosplice Therapeutics и др.)
- The Synthetic Biology Consortium; The Engineering Biology Research Consortium (EBRC)

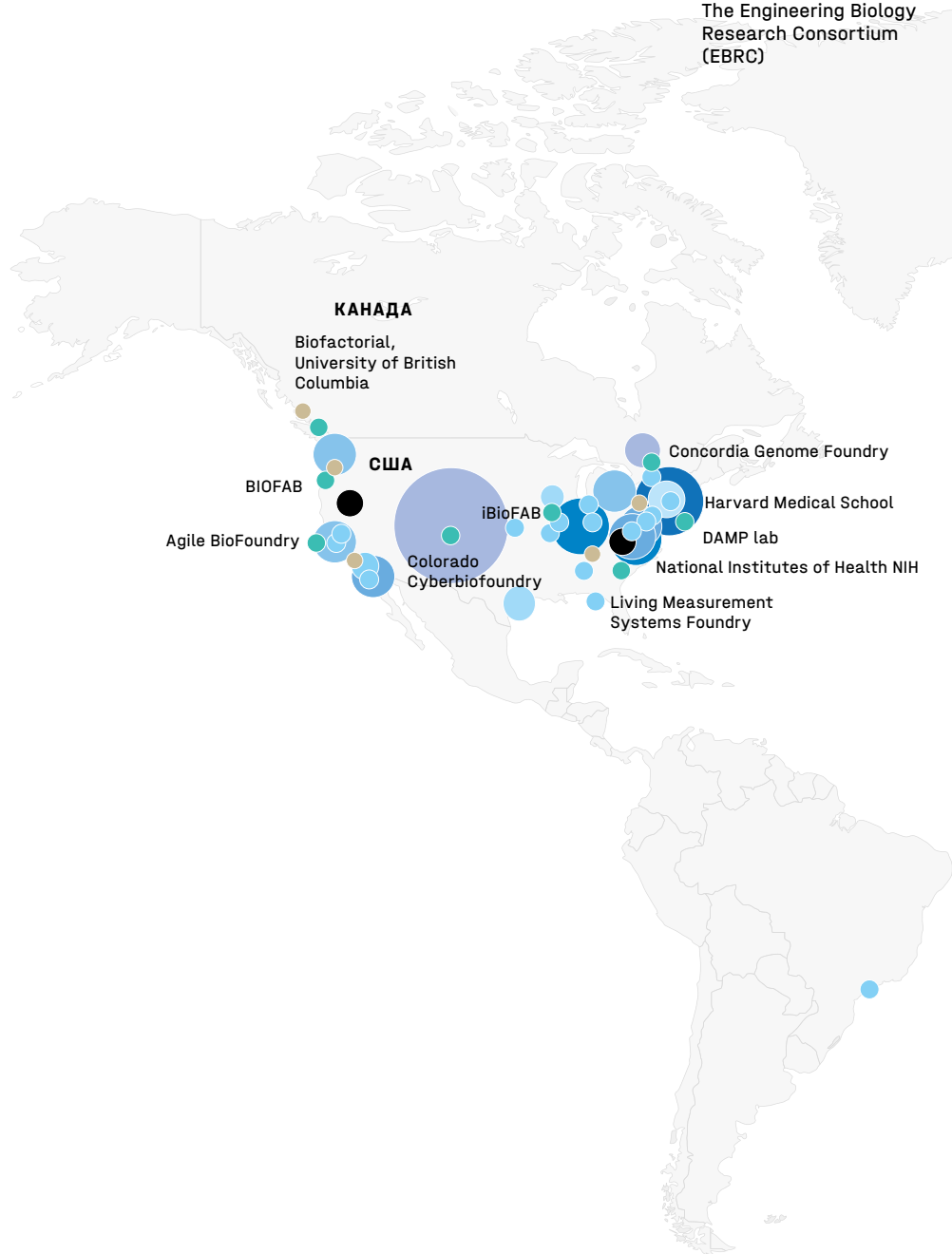
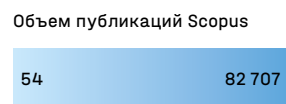


Рис. 15. Географическая концентрация и типология игроков синтетической биологии на 2021 г.

Источник: ЦСР «Северо-Запад» по данным Scopus, Golden.com, Global Biofoundries Alliance, CB Insight

- R&D-центры — сложившиеся научные школы в геномных исследованиях, протеомике и др., и экспериментальные лаборатории (по объемам публикаций Scopus)*
- Biofoundry — в мире функционирует 29 (специнфраструктура для биодизайна)***
- Единороги в сфере синтетической биологии****
- Стартапы (размер пунсона — количество стартапов)**
- Консорциумы



ВЕЛИКОБРИТАНИЯ

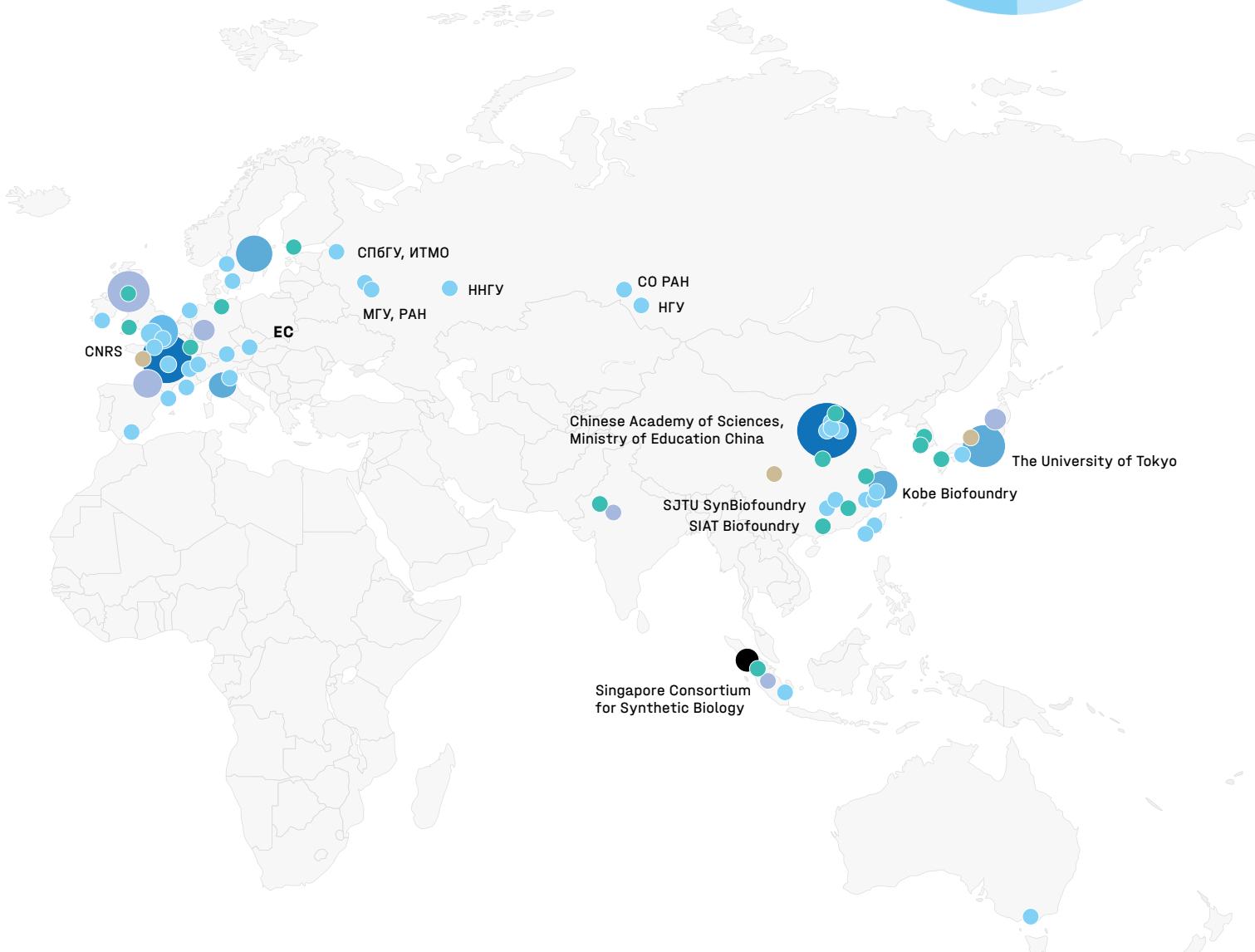
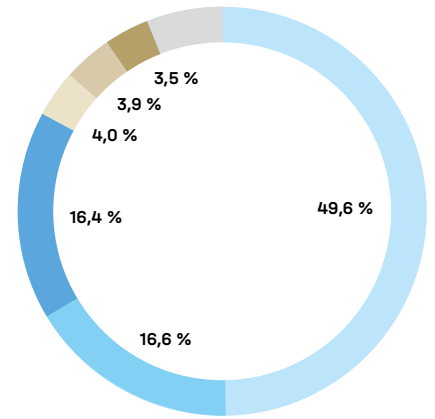
- 5 R&D-центров (University of Cambridge, University of Oxford и др.)
- 36 стартапов (Cargill, Synpromics Ltd, Bento Bioworks и др.)
- 5 BioFoundries (GeneMill, SYNBIOCHEM, London BioFoundry ICL, Edinburgh Genome Foundry)

ФРАНЦИЯ

- 5 R&D-центров (Inserm, CNRS Centre National de la Recherche Scientifique и др.)
- 11 стартапов (Algama, Sartorius и др.)
- 1 компания (Ynsect (сельское хозяйство))

ОБЪЕМ ПУБЛИКАЦИЙ

- США
- Франция
- Китай
- Япония
- Канада
- Великобритания



ЯПОНИЯ

- 3 R&D-центра (The University of Tokyo и др.)
- 6 стартапов (Kyocera, Genewiz и др.)
- 1 BioFoundry (Kobe Biofoundry)
- 1 компания (Spiber (производство синтетических материалов))

КИТАЙ

- 15 R&D-центров (Chinese Academy of Sciences, Ministry of Education China, Fudan University и др.)
- 5 BioFoundries (Tiajin University Biofoundry, SIAT Biofoundry, SJTU SynBiofoundry)
- 1 компания (XtalPis (разработка ПО))

РОССИЯ

Стартапы: Planta, Light Bio

* На основе анализа топ-20 университетов по объемам публикаций Scopus по ключевым тематикам в области синтетической биологии

** по данным golden.com (число стартапов, представленных на рисунке не является исчерпывающим)

*** по данным Global Biofoundries Alliance

**** по данным CB Insights (компании, реализующие продукты, полученные с использованием инструментов синтетической биологии)



РЕГУЛИРОВАНИЕ СИНТЕТИЧЕСКОЙ БИОЛОГИИ В МИРЕ

Лидерство стран в развитии рынков синтетической биологии определяют не только научно-технологические компетенции и доступ к специальной инфраструктуре, но и вопросы регулирования, которые могут стать ключевым барьером для выхода на эти рынки. Страны, которые не смогут сформировать полноценный пакет механизмов и нормативную базу для регулирования, будут отставать.

На международном уровне регулирование синтетической биологии базируется на Конвенции Организации Объединенных Наций о биологическом разнообразии, Картахенском протоколе и Нагойском протоколе. В рамках Европейского союза большая часть исследований в области синтетической биологии, согласно законодательству о ГМО, относится к генной инженерии. Законодательство Европейского союза базируется на Директиве 90/219/ЕС (регулирование вопросов генетической модификации микроорганизмов и их культивирования, хранения, транспортировки, уничтожения и утилизации), а также Директиве 2001/18/ЕС (регулирование вопросов преднамеренного выпуска ГМО).

Однако регулирование технологий синтетической биологии не ограничивается рамками генной инженерии, биотехнологий и биоразнообразия. И хотя традиционно программы поддержки синтетической биологии являются составной частью программ по развитию сектора биотехнологий, сегодня в большинстве развитых стран синтетическая биология становится отдельным приоритетом федеральных программ в области научно-технологического развития и самостоятельным направлением нормативно-правового регулирования. Чаще всего операторами таких программ являются министерства, национальные академии наук, госсоветы под цели НТР.

Специальные программы поддержки синтетической биологии, например, сформированы в Великобритании и США. Великобритания, в частности, является одной из первых стран, начавших активно развивать сектор синтетической биологии как на инфраструктурном, так и на программно-стратегическом уровне. В 2012 г. в Великобритании была опубликована стратегическая дорожная карта для синтетической биологии, основанная на концепции реализации потенциала синтетической биологии с упором на экономический успех, использование передовых научных достижений и четкую общественную пользу. В 2015 г. был опубликован Стратегический план Великобритании по синтетической биологии, сфокусированный на ускорении коммерческого предоставления новых продуктов и услуг, а также необходимости ответственных исследований и инноваций, пропорционального и адаптивного регулирования³⁴.

В таблице 5 представлена основная информация о государственных программах поддержки синтетической биологии.

34 Keiper F, Atanassova A. Regulation of Synthetic Biology: Developments Under the Convention on Biological Diversity and Its Protocols. *Front Bioeng Biotechnol.* 2020. doi:10.3389/fbioe.2020.00310.

Страна	Документ	Статус	Год	Бюджет	Операторы программ	Место синтетической биологии (СБ)
Китай	Национальная программа фундаментальных исследований (Программа 973) Подраздел «Синтез и передовые науки»	Государственная программа национального уровня	1998	0,75–1,125 млн долл.	Министерство науки и технологий Министерство образования Китайская академия наук	Финансируются отдельные проекты СБ, в т. ч. для нужд энергетики, сельского хозяйства, здравоохранения
ЕС	Рамочные программы по НТР 6-я программа — Естественные науки, геномика и биотехнологии для здоровья 7-я программа — Продукты питания, с/х, биотех 8-я программа — Биотехнологии	Открытая международная программа поддержки	2005	491,4 млн долл.	Совет ЕС, Европейский парламент	Финансируются отдельные проекты СБ в рамках приоритета по развитию биотехнологий
Германия	Биотехнология 2020+ (Biotechnologie 2020+)	Ведомственная отраслевая программа министерства	2010	143 млн долл.	Министерство образования и науки	Финансируются отдельные проекты СБ MaxSynBio, Fraunhofer Society: Biomolecules off the assembly line, Bio/Synthetic multifunctional micro production units
Франция	Инвестиции в будущее (Investments for the Future programme)	Государственная программа национального уровня	2010	24 млрд долл. в течение периода с 2021 по 2026 г.	Национальное агентство научных исследований	Финансируются отдельные проекты СБ
Великобритания	Синтетическая биология для роста (Synthetic Biology for Growth Programme)	Программа вневедомственного государственного органа	2012	141 млн долл.	Совет по исследованиям биотехнологий и биологических наук	Специализированная программа, полностью посвящена СБ
США ³⁵	Living Foundries Program: ATCG Living Foundries: 1000 Molecules	Ведомственные отраслевые программы Департамента	2011–2014 – н.в.	35 млн долл. 110 млн долл.	Департамент обороны США (Управление перспективных исследовательских проектов)	Специализированные программы, полностью посвящены СБ
Канада	Collaborative Research and Training Experience	Ведомственная программа федерального агентства	2018	1,65 млн долл.	Совет по естественным наукам и инженерным исследованиям	Финансируются отдельные коллективы и проекты по тематикам СБ

Табл. 5.
Программы поддержки развития синтетической биологии в мире

Источники: Ministry of Science and Technology of the People's Republic of China; Asia — Pacific Biotech; CORDIS; Bioökonomie.DE; ANR; Biotechnology and Biological Sciences Research Council; DAPRA, Global BioDefence; Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada, Concordia

³⁵ Si, Tong & Zhao, Huimin. (2016). A brief overview of synthetic biology research programs and roadmap studies in the United States. *Synthetic and Systems Biotechnology*. 1. 10.1016/j.synbio.2016.08.003.

Основные тренды, связанные с регулированием синтетической биологии, перечислены ниже.

1

В мире сформировалась большая группа государственных инвесторов (США, Китай, Франция, Германия, Великобритания), которые финансируют исследования в области синтетической биологии и расширяют механизмы поддержки через создание специальных фондов и грантовых программ. Именно эти страны (включая наиболее значимые для России азиатские государства) будут оказывать давление на регулирование отрасли в будущем. Так, активно поддерживает исследования в области синтетической биологии Европейская комиссия — в 2020 г. на проекты европейских центров в области синтетической биологии было выделено 38,9 млн евро (в 2011 г. поддержка составила 9,4 млн евро).

2

Появление национальных систем хранения биоданных (включая банки стандартизированных биологических компонентов)³⁶ как ключевых объектов синтетической биологии потребует специального регулирования в этой сфере. Доступ к большому объему биологических данных — одно из основных условий развития синтетической биологии. Растущие объемы генерации биологических данных требуют не только развития инфраструктуры банков биоданных (которые обеспечивают постоянный доступ к обновляемым биоданным, что способствует ускорению исследований³⁷), но и обеспечения их безопасности и этических аспектов использования (подробнее в пп. 3 и 4) — это вопрос национального значения. Кроме того, для ускорения и удешевления исследований и производства в сфере синтетической биологии потребуются формирование банков стандартизированных биологических частей³⁸. Разработка стандартов предполагает, с одной стороны, принятие решения на уровне исследовательского сообщества, которое должно определить основные стандартные части и процессы биологических систем³⁹. С другой — регулирование со стороны государства может стать дополнительным драйвером для процесса стандартизации, в т.ч. за счет введения специальных нормативных актов, которые бы способствовали закреплению разрабатываемых стандартов и их внедрению в исследовательских центрах и на производствах⁴⁰.

3

Ужесточение политики, связанной с обеспечением биобезопасности. Высокие темпы развития синтетической биологии и активная интеграция цифровых технологий способствуют обострению вопросов обеспечения безопасности биологических данных. Рост числа пользователей, имеющих доступ к биологическим данным, осложняет возможности контроля за их использованием. Это обостряет проблему производства технологий двойного назначения и биологического оружия при помощи технологий синтетической биологии и геной инженерии. Существующие нормативные акты в области защиты генетической информации (например, Закон о недискриминации генетической информации, GINA) охватывают не все аспекты безопасности аппаратной инфраструктуры и облачного программного обеспечения. Значение биоданных в вопросах биобезопасности также не полностью учтено в рамках политики, касающейся проблемных исследований двойного назначения (Dual Use Research of Concern, DURC). Сфера регулирования данной политики ограничивается отдельными агентствами, что не влечет за собой регулирование новых организмов, созданных с помощью синтетической биологии^{41, 42}.

36 Примерами хранилищ биоданных являются: Европейский архив генома-фенома (EGA), Европейский архив нуклеотидов (ENA), банк данных трехмерных структур белков и нуклеиновых кислот (PDB), база данных функциональной геномики (ArrayExpress).

37 Stephen K. Burley, Charmi Bhikadiya, Chunxiao Bi, Sebastian Bittrich, Li Chen, Gregg V. Crichlow, RCSB Protein Data Bank: powerful new tools for exploring 3D structures of biological macromolecules for basic and applied research and education in fundamental biology, biomedicine, biotechnology, bioengineering and energy sciences, *Nucleic Acids Research*, Volume 49, Issue D1, 8 January 2021.

38 Decoene T., De Paep E., Maertens J., et al. Standardization in synthetic biology: an engineering discipline coming of age. *Crit Rev Biotechnol*. 2018;38(5). doi:10.1080/07388551.2017.1380600.

39 Одним из примеров подходов к стандартизации синтетической биологии является создание BioBricks Foundation и Реестра стандартных биологических частей. Данный подход развивался вокруг идеи разработки и предоставления стандартизированных генетических деталей, называемых «BioBricks», которые могут быть использованы для создания сложных систем.

40 Zhao H., & Medema M. H. (2016). Standardization for natural product synthetic biology. *Natural product reports*, 33(8). doi.org/10.1039/c6np00030d.

41 Dieuliis, Diane. (2018). Biodata Risks and Synthetic Biology: A Critical Juncture. *Journal of Bioterrorism & Biodefense*. 09. doi:10.4172/2157-2526.1000159.

42 Li J., Zhao H., Zheng L. and An W. (2021) Advances in Synthetic Biology and Biosafety Governance. *Front. Bioeng. Biotechnol*. doi: 10.3389/fbioe.2021.598087.

4

Регулирование этических вопросов и популяризация синтетической биологии. Открытия в областях биотехнологий и синтетической биологии способствуют росту внимания к вопросам этики, связанным с необходимостью контроля вмешательства в геном, тайной генетической информации и др., а также к вопросам учета правовых и социальных последствий таких исследований (Ethical, Legal and Social Implications, ELSI) ⁴³. Согласно данным Cambridge University, с 2017 г. значительно вырос общественный интерес к вопросам биоэтики. Во многом вопросы биоэтики направлены на недопущение использования передовых технологий для целей создания биологического оружия ⁴⁴. Сегодня в развитых странах активно распространяется образование в сфере биоэтики (биоэтика лежит в основе специальных образовательных программ в Европе и США). Государства и международное сообщество предпринимают постепенные шаги к институционализации вопросов биоэтики. На уровне государств сформированы такие структуры, как Президентский совет по биоэтике (США), Национальный консультативный совет по этике (Франция). На международном уровне в формировании политики по вопросам биоэтики участвуют ООН (ЮНЕСКО), Совет Европы, Международный комитет по биоэтике и т.д. Этика в синтетической биологии выполняет две основные функции. С одной стороны, это академическая дисциплина, изучающая ценностно-нормативные вопросы, которые ставит синтетическая биология. С другой — этические вопросы регулируют исследования и производство в области синтетической биологии, чтобы предотвратить ущерб, снизить риски и контролировать конфликты интересов ⁴⁵. Обсуждение этических и социальных проблем давно представлено в повестке синтетической биологии. Например, они обсуждались в разных форматах на международных встречах Biobricks Foundation.

⁴³ ARNASON, G. (2017). *Synthetic Biology between Self-Regulation and Public Discourse: Ethical Issues and the Many Roles of the Ethicist*. *Cambridge Quarterly of Healthcare Ethics*, 26 (2). doi:10.1017/S0963180116000840.

⁴⁴ Maria Belén Paredes, Maria Eugenia Sulen. *An overview of synthetic biology*. DOI. 10.21931/RB/2020.05.01.14 URL: revistabionatura.com/files/2020.05.01.14.pdf (дата обращения: 16.01.2022).

⁴⁵ HÄYRY, M. (2017). *Synthetic Biology and Ethics: Past, Present, and Future*. *Cambridge Quarterly of Healthcare Ethics*, 26(2). doi:10.1017/S0963180116000803.

7 ПОТЕНЦИАЛ РОССИИ

В России на сегодняшний день синтетическая биология только приступила к оформлению в самостоятельный сектор науки и экономики. Невысокая скорость становления в первую очередь обусловлена дефицитом в стране системного заказа на такого рода исследования как от государства, так и от бизнеса, хотя отдельные разработки в этой области, безусловно, ведутся и в них уже инвестирует бизнес (например, компания «ЭФКО» в области пищевой промышленности). Кроме того, присутствуют инфраструктурные ограничения (дефицит поставщиков необходимого оборудования, программного обеспечения, реагентов для научных экспериментов), невысокий уровень научно-исследовательской кооперации и неразвитая система регулирования отрасли. Недостаточная скорость устранения этих барьеров ограничивает возможности России, что особенно чувствительно сказывается на развитии ее экономики в условиях санкционных ограничений. Синтетическая биология может открыть стратегически значимые решения для устранения целого комплекса проблем в здравоохранении, пищевой промышленности, агросекторе, энергетике, экологии. Эта новая отрасль науки может стать центром притяжения большого числа исследователей, генератором патентов в социально значимых областях экономики.

Ниже представлены барьеры, которые предстоит преодолеть синтетической биологии как перспективной научной дисциплине и новому сектору экономики в России.

Во-первых, предстоит преодолеть барьер низкой исследовательской и публикационной активности. По объемам научных публикаций Россия пока что значительно уступает странам-лидерам. Доля российских публикаций Scopus по синтетической биологии (по ключевому слову «Synthetic biology») в период 2000–2021 гг. составляет 0,86 % (249 статей), Web of Science составляет 1,83 % (1503 статьи). За аналогичный период объем публикаций США составил 10 918 статей Scopus (38%), 30 531 статей Web of Science (37,3 %); объем публикаций Китая составил 3562 статьи Scopus (12,4 %), 10 424 статьи Web of Science (12,7 %). И хотя количество не всегда равно качеству, России предстоит усилить активность на этом направлении. Положительным здесь является тот факт, что Россия демонстрирует рост объема публикаций на протяжении всего наблюдаемого периода, особенно с 2016 г.⁴⁶ В стране имеются отдельные сильные компетенции. В первую очередь это сфера биоинформатики и работы с данными. По совокупному среднегодовому темпу роста публикаций в области биоинформатики (в период 2010–2020 гг.) Россия обгоняет США и Китай. Значение показателей составило 23,9 % для публикаций Scopus (США — 5,7 %, Китай — 12 %) и 15,5 % для публикаций Web of Science (США — 4,2 %, Китай — 9,1 %). Однако доля российских публикаций составляет всего 1,38 % (Scopus) и 1,49 % (Web of Science)⁴⁷.

Во-вторых, предстоит преодолеть барьер недостаточно высокого уровня и темпов развития необходимой исследовательской и инновационно-технологической инфраструктуры и научно-исследовательской кооперации в сфере синтетической биологии при наличии мощного накопленного потенциала:

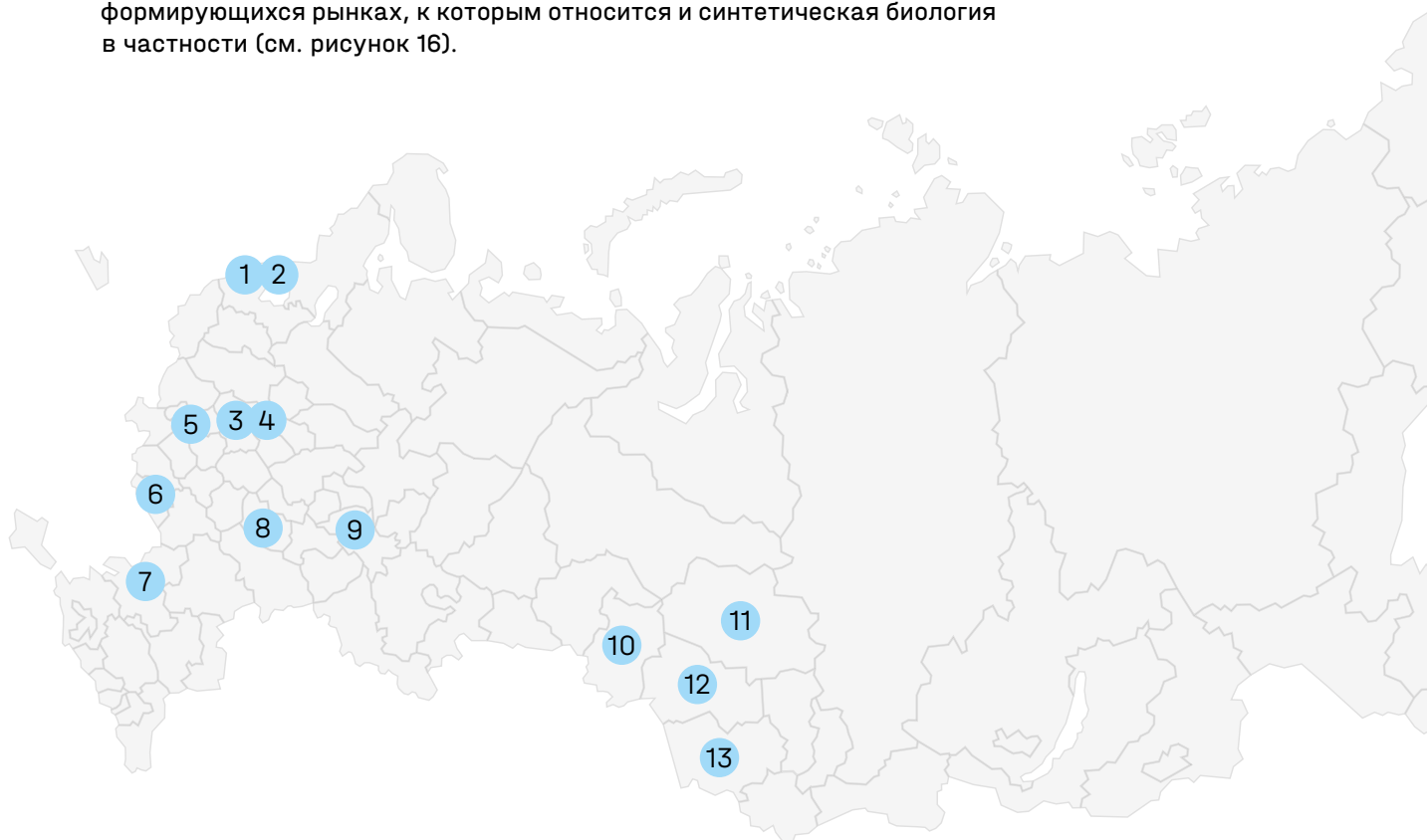
— Есть сильные центры, обладающие компетенциями в биологических, химических, биоинженерных и смежных областях. На базе таких центров происходит постепенное формирование лабораторий, экспериментальных научных групп, нацеленных на решение научно-исследовательских задач синтетической биологии. К ним относятся Институт биоорганической химии им. академиков М. М. Шемякина и Ю. А. Овчинникова, Институт биохимии им. А. Н. Баха, Институт микробиологии им. С. Н. Виноградского, Институт биоинженерии им. К. Г. Скрябина, Институт цитологии и генетики СО РАН, Институт молекулярной биологии им. В. А. Энгельгардта РАН и др., которые в совокупности обеспечивают лидерские позиции РАН

46 ЦСР «Северо-Запад» по данным Scopus, Web of Science.

47 ЦСР «Северо-Запад» по данным Scopus, Web of Science; ЦСР «Северо-Запад» по материалам интервью с Шитяковым С. В. (15.10.2021), Гусевым О. А. (25.10.2021).

в России по объемам публикаций в Scopus, Web of Science по направлению синтетической биологии, МГУ (биологический факультет — кафедры биоинженерии, биохимии и синтетической биологии, факультет биоинженерии и биоинформатики, школа «Молекулярные технологии живых систем и синтетическая биология»), СПбГУ — Институт химии (лаборатория биогбридных технологий), ИТМО — НОЦ «Инфохимия», Институт биоинформатики, КФУ — Институт фундаментальной медицины и биологии (Научный центр «Регуляторная геномика»), НГУ — САЕ «Синтетическая биология», реализующаяся в рамках Проекта 5-100, ННГУ им. Н. И. Лобачевского.

13 кластеров реализуют деятельность в областях биотехнологий, биомедицины, биофармакологии и агrobiотехнологий, которые способствуют ускорению развития рынка биотехнологий в целом, формированию и усилению технологических компетенций и созданию новых продуктов на формирующихся рынках, к которым относится и синтетическая биология в частности (см. рисунок 16).



- | | | |
|--|---|---|
| 1. Кластер медицинского, экологического приборостроения и биотехнологий (Санкт-Петербург) | 6. Кластер «Биофармацевтики» (Белгородская область) | 11. Инновационный территориальный кластер «Фармацевтика, медицинская техника и информационные технологии Томской области» |
| 2. Кластер медицинской, фармацевтической промышленности, радиационных технологий (Санкт-Петербург) | 7. Кластер по глубокой переработке зерна в Миллеровском районе РО (Ростовская область) | 12. Инновационный кластер информационных и биофармацевтических технологий Новосибирской области |
| 3. Кластер «Медицинская промышленность, новая химия и биотех» (Москва) | 8. Инженерно-производственный «Биомед» (Пензенская область) | 13. Алтайский биофармацевтический кластер (Алтайский край) |
| 4. Биотехнический инновационный территориальный кластер Пушино (Московская область) | 9. Территориально-отраслевой кластер АГРОПОЛИС «АЛЬКИ-АГРОБИОПРОМ» (Республика Татарстан) | |
| 5. Кластер «Фармацевтика, биотехнологии и биомедицина» (Калужская область) | 10. Агrobiотехнологический промышленный кластер (Омская область) | |

Рис. 16. География российских биотехнологических кластеров и ЦКП на 2021 г.

Источник: ЦСР «Северо-Запад» по данным Карта кластеров России. URL: map.cluster.hse.ru, данные из открытых источников

Доступны программы поддержки стартапов в области биотехнологий. Например, «Сколково» содействует участникам при выходе на рынок и в числе прочих активно поддерживает стартапы в сфере биомедицины (реализуется менторская программа, направленная на обучение предпринимательству и преакселерацию проектов, грантовая поддержка в формате микрогрантов, доступны технологические НИОКР-сервисы, Департамент Go-To-Market помогает стартапам «Сколково» выйти на международные рынки и привлечь финансирование и пр.). Российская венчурная компания (РВК) использует разные инвестиционные инструменты поддержки предпринимательства и включает обособленные структуры, связанные с исследованиями в области биотехнологий: «Фонд посевных инвестиций РВК» (ФПИ РВК), «Инфраструктурные инвестиции РВК» (Инфрафонд РВК), «Биофармацевтические инвестиции РВК» (Биофонд РВК), «Биопроект Кэпитал Венчурс» (ООО «УК «БКП») ⁴⁸. Наличие таких программ способствует росту российских стартапов в сфере биотехнологий. Только Кластер биологических и медицинских технологий «Сколково» включает 612 биотехнологических компаний (стартапов) на разных стадиях развития. Самое большое число стартапов сегодня в России относится к биомедицине и сельскохозяйственным биотехнологиям. Появляются отдельные технологические проекты и в сфере синтетической биологии, например, ученые из российско-британского стартапа Planta, резидент «Сколково», создали светящиеся растения, используя гены грибов ⁴⁹.

В последние годы крупные российские компании, работающие в сферах биотехнологий, фудтеха и биомедицины, запускают специальные проекты и выделяют бюджет (как правило, предварительно создавая специальные фонды поддержки новых проектов) на исследования и эксперименты в области синтетической биологии. В 2019 г. «ЭФКО» создала венчурный фонд ранних стадий Fuel For Growth для инвестиций в фудтех. «ЭФКО» планирует запустить производство мяса из растительного белка в Белгородской области, для чего вложила в проект 100 млн руб., а к 2022-му планирует выпускать до 40 тыс. тонн искусственного мяса и покрывать около 0,4 % производства мяса в России ⁵⁰. В 2019 г. Очаковский комбинат пищевых ингредиентов отчитался о первой котлете из «постного» фарша. Ее масса составила 40 граммов, а на разработку было потрачено 900 тыс. руб. АПХ «Мираторг» открыл инновационный центр геномной селекции, который является резидентом «Сколково» и войдет в топ-5 генетических ветеринарных лабораторий в мире, он позволит решать сложнейшие задачи по оценке геномов и генотипированию всех видов сельскохозяйственных животных ⁵¹.

Наряду с позитивными сторонами и накопленным потенциалом есть ряд проблем, связанных главным образом с отсутствием системного подхода к развитию научно-исследовательской и технологической инфраструктуры и научного сообщества в сфере синтетической биологии.

Происходит замыкание инфраструктуры на отдельных НИИ и университетах, что приводит к рассредоточенности необходимого оборудования, зачастую невозможности пользоваться ресурсами других исследовательских организаций ⁵². В мире эта проблема решается за счет упомянутого ранее формата Biofoundries, когда большие НИОКР-задачи в синтетической биологии декомпозируются и распределяются по разным научным центрам, в т.ч. с учетом доступной в этих центрах инфраструктуры.

В России пока не сформировались научные консорциумы в сфере синтетической биологии и смежных научных сферах. Это приводит к снижению кооперации между научно-исследовательскими группами, отсутствию единой НИОКР-повестки и больших исследовательских задач. Развитие и функционирование научных коллективов по синтетической биологии происходит в большей степени изолированно, в рамках отдельных науч-

48 Российская венчурная компания (РВК). URL: biotech2030.ru/instrumenty-gos-podderzhki/fondy/rvk/ (дата обращения: 16.01.2022).

49 Scientists create glowing plants using mushroom genes. URL: theguardian.com/science/2020/apr/27/scientists-create-glowing-plants-using-mushroom-genes (дата обращения: 16.01.2022).

50 «Эфко» — наш ответ Beyond Meat. Выпустит мясо из белка подсолнечника. URL: quote.rbc.ru/news/article/5f60f5c69a794702558a49fb (дата обращения: 16.01.2022).

51 «Мираторг» открыл инновационный центр геномной селекции. URL: miratorg.ru/press/news/miratorg_otkryl_innovatsionnyy_tsentr_genomnoy_se/ (дата обращения: 16.01.2022).

52 ЦСР «Северо-Запад» по материалам интервью с Саркисяном К.С. (28.10.2021).

ных центров. При этом мировая практика показывает, что создание консорциумов — это одна из ключевых возможностей для развития синтетической биологии, и на это сделана ставка. Для России после событий 2022 г. в этом отношении важно определиться с конфигурацией таких консорциумов, судя по всему, выстраивая конфигурацию «новой открытости» науки в сторону азиатских партнеров и не забывая обеспечивать собственную технологическую устойчивость и даже автономность (в наиболее значимых критически важных узлах).

— Наблюдается дефицит поставщиков компонентов и оборудования, необходимых для поддержки развития синтетической биологии (по направлениям SynBio Stack (см. рисунок 13), включая поставщиков специального софта для биодизайна, оборудования, химикатов и реагентов для экспериментов), что приводит к зависимости отрасли от импорта⁵³. Эта проблема уже прослеживается на российском рынке биотехнологий в целом — так, согласно данным Abercade Consulting, в 2018 г. на рынке биотехнологий наблюдалось доминирование импорта (82% от объема рынка)⁵⁴. Предстоит запустить масштабные программы реинжиниринга программного обеспечения и оборудования для устранения этого дефицита.

В-третьих, следует устранить барьер низкого уровня готовности системы регулирования для развития синтетической биологии. В России предстоит разработать нормативно-правовые акты и специализированные программы развития синтетической биологии. Это откроет новые возможности для этой области знаний, т.к. в настоящее время лишь в общем виде синтетическая биология попадает под действие документов программно-стратегического регулирования биотехнологий (Комплексная программа развития биотехнологий в Российской Федерации на период до 2020 г., План мероприятий (дорожная карта) «Развитие биотехнологий и генной инженерии» на 2018–2020 гг., ФЗ «О биомедицинских клеточных продуктах», ГОСТ Р 57079–2016. «Биотехнологии. Классификация биотехнологической продукции»), генной инженерии (Федеральная научно-техническая программа развития генетических технологий на 2019–2027 гг., ФЗ «О государственном регулировании в области генно-инженерной деятельности», ФЗ «О биологической безопасности в Российской Федерации»), а также обеспечения биологической безопасности.

Предстоит особым образом обеспечить фокусировку государственных грантов и программ финансирования, сдвигая ее от общей ориентации на рынок биотехнологий в целом и поддержку его развития в сторону более сфокусированной тематики, включая синтетическую биологию. Одновременно с этим предстоит увеличить объем инвестиций из бюджетных и внебюджетных источников на соответствующие цели развития. Адресные гранты на синтетическую биологию в России пока утвердил только Российский фонд фундаментальных исследований. При этом максимальный размер гранта — 6 млн руб. на трехлетний проект, что по сравнению с инвестициями в зарубежные стартапы является невысоким значением⁵⁵. Тем не менее это является хорошей основой и фундаментом для дальнейшего развития этой отрасли знаний. В дальнейшем предстоит объем поддержки синтетической биологии существенным образом масштабировать.

53 ЦСР «Северо-Запад» по материалам интервью с Саркисяном К. С. (28.10.2021), Тениковой Т. Б. (01.11.2021).

54 Обзор рынка биотехнологии в России и в мире. Барьеры и перспективы развития. Сентябрь 2019. URL: biotech2030.ru/wp-content/uploads/2019/09/Orlova-N-V.pdf (дата обращения: 16.01.2022).

55 Природа под редакцией. Развитие синтетической биологии в России упирается в нехватку денег. URL: dp.ru/a/2019/02/12/Priroda_pod_redakciej (дата обращения: 16.01.2022).

Никитин Игорь Алексеевич, заведующий кафедрой биотехнологий продуктов питания из растительного и животного сырья МГУТУ им. К. Г. Разумовского

Источник: Интервью в рамках подготовки доклада с Никитиным И. А. от 06.04.2022

«Синтетическая биология будет одним из драйверов пищевой индустрии в будущем. Синтетические пищевые продукты — это трансформация системы продовольственного обеспечения в целом: новые правила игры, новые экономические показатели, полная смена парадигмы. Когда система синтетического питания будет выстроена, она будет эффективнее, чем та, которая у нас сейчас есть. Синтетическая биология позволит удешевить стоимость продукта, удовлетворить постоянно растущий спрос. Я считаю, что у нас, как у человечества, нет другого выбора. Синтетические продукты — это продукты будущего, и генная инженерия — это только один из шагов к этому. Чем быстрее мы это поймем, тем лучше. Другой вопрос, что есть нравственные аспекты, отдаленные последствия, но это все просчитывается, и уже доказана относительная безвредность.

В России это все будет еще долго масштабироваться, потому что у страны огромное количество ресурсов, в отличие от той же Европы. Поэтому ни государству, ни бизнесу синтетическая биология пока еще не интересна. Тем не менее текущий кризис может подстегнуть развитие отрасли, простимулирует поиск новых возможностей для удешевления пищевых производств, для импортозамещения ряда утраченных звеньев производственных цепочек.

Есть еще персонализированное питание — подход к составлению рациона и регулированию пищевых привычек с учетом генетических особенностей человека и др. Персонализированное питание собирается из достижений современной науки и стоит на нескольких китах, один из них — цифровые технологии. С помощью них мы

можем собрать и оцифровать данные о человеке. После чего можно спрогнозировать и выявить, как те или иные факторы питания влияют на показатели. А затем, благодаря синтетической биологии, мы можем управлять свойствами и составом пищевых продуктов, в результате чего каждому цифровому двойнику будет подобрана необходимая ему синтетическая пища. Поэтому одной из основных задач синтетической биологии является регулирование точного содержания питательных веществ в пище под потребности конкретного конечного потребителя.

В сложившейся ситуации мы наблюдаем уход иностранных игроков, которые были задействованы в пищевой промышленности. Как результат, возникает нехватка необходимых компонентов для производств. Чтобы избежать состояния вакуума, с одной стороны, нужно искать партнеров, которые еще остались, тот же Китай, например. А с другой — ситуацией можно воспользоваться для развития собственных производств, у нас есть заделы в области компьютерного проектирования, есть сильные школы. В этом смысле и синтетическая биология будет содействовать данному процессу. С ее помощью можно восстановить недостающие компоненты для пищевой промышленности. Безусловно, на восстановление недостающих звеньев производства потребуются годы, что-то мы и вовсе не сможем восстановить. Но простые компоненты, фруктоза, например, ее производство не такой сложный процесс — можно организовать его за месяц, но никто этим пока не занимался».

Саркисян Карен Сергеевич, руководитель группы «Синтетическая биология», отдел биомолекулярной химии, ФГБУ науки «Институт биорганической химии им. академиков М. М. Шемякина и Ю. А. Овчинникова Российской академии наук»

Источник: Интервью в рамках подготовки доклада с Саркисяном К. С. от 28.10.2021

«Когда мы говорим о синтетической биологии — это исследовательское поле, которое определено не объектом, а подходом — инженерией. Синтетическая биология представляет собой биологию, целью которой является инженерия живых организмов. Сегодня ведущими центрами исследований в области синтетической биологии являются MIT, Гарвардский университет, Имперский колледж Лондона.

В России достаточно сложное отношение к редактированию организмов или трансгенным организмам. Если сравнивать объем патентов в странах с похожими запретами — Европа, и в странах с гибким отношением — США, можно проследить резкое сокращение патентов после введения регуляторных запретов, как было в Европе в конце 1990-х гг. До запретов они шли на одном уровне, однако введение запретов сильно влияет на активность инвесторов. В России схожая с Европой ситуация и для развития сектора биотехнологий, если мы хотим быть конкурентоспособными, необходимо пересматривать законодательство в области регулирования трансгенных и генно-модифицированных продуктов.

В России есть предпосылки для развития синтетической биологии — есть необходимая инфраструктура для проведения и развития таких исследо-

ваний, развитый ИТ-сектор и медицина. Однако законодательство тормозит этот процесс. С точки зрения окружающей среды для стартапов по синтетической биологии в России все хорошо. «Сколково» и другие площадки предоставляют реальную поддержку при развитии. Основные дефициты — кадровые и инвестиционные. Дополнительно: в России пока отсутствуют хорошие инкубаторы для развития стартапов.

Важная проблема развития синтетической биологии — отсутствие механизма трансфера технологий от государства в частный сектор. Интеллектуальная собственность, которая создается в рамках вузов, принадлежит вузам, а соответственно, государству. Вопрос отчуждения государственной собственности в пользу исследователей очень проблематичен. Это значительно осложняет реализацию проектов и привлечение финансирования.

Критическими для России в развитии синтетической биологии являются 2 направления: изменение законодательства в сфере регулирования трансгенных организмов и создание действенных механизмов трансфера научных технологий от научных организаций в бизнес».

Гусев Олег Александрович, директор Научного центра «Регуляторная геномика», Институт фундаментальной медицины и биологии КФУ; профессор медицины, Университет Юнтендо (Япония)

Источник: Интервью в рамках подготовки доклада с Гусевым О. А. от 25.10.2021

«Россию не будет заметно в сфере синтетической биологии еще очень долго. В первую очередь, это связано с несформированностью необходимых для развития предпосылок. Основная проблема для развития синтетической биологии в России — значительно растянутый во времени путь от идеи до экспериментальной деятельности. Это связано с зависимостью России от импорта таких технологий, а также отсутствием механизмов быстрого обеспечения исследовательских групп. Также нет конкурентной возможности апробировать и реализовывать идеи, отсутствуют системные и глобальные проекты, которые могли бы сформировать базу для компаний.

С другой стороны, в России очень сильный сегмент биоинформатики. Российские специалисты не уступают зарубежным, но биоинформатики и системные биологи опираются на доступные мировые данные, которые быстро устаревают, а их концепции не могут быть подхвачены научными группами. В общем виде Россия может развивать «сухую» синтетическую биологию — делать упор на вычислительные аспекты и реализовать потенциал в сфере биоинформатики. Второй путь — «маргинализация» синтетической биологии: поиск принципиально новых объектов для исследований в тех направлениях, которых еще нет».

Принятие решений по дальнейшему развитию синтетической биологии в России будет связано с прохождением развилок выбора приоритетных отраслей применения. Выбор отраслей будет продиктован их зрелостью, наличием необходимых ресурсов, компонентов, инфраструктуры и компетенций, а также доступностью реагентов и оборудования на открытых для страны рынках.

Для России, с учетом социально-экономических и политических последствий кризиса начала 2022 г., скорее всего, в качестве отраслей применения технологий синтетической биологии на первый план выйдут фармацевтика, медицина и химия. Роль синтетической биологии в фармацевтике и медицине будет усиливаться ввиду удорожания и необходимости замещения импортных лекарственных средств, необходимости создания собственных инновационных лекарственных биопрепаратов. Для химической промышленности адаптация решений синтетической биологии потенциально позволит удешевить производственные процессы, заместить выбывающие из-за торговых ограничений вещества и химические компоненты.

Применение технологий синтетической биологии в пищевой промышленности, биоэнергетике, декарбонизации или ликвидации загрязнений в России в краткосрочной перспективе, по мнению экспертов, напротив, отойдет на второй план. В этих направлениях продолжатся отдельные пилотные проекты, но масштабных изменений не произойдет. Например, адаптация решений по альтернативным источникам белка и создание на их основе новых пищевых производств, предположительно, будут отложены, так как требуют значительных инвестиций, а существующая организация производств и методы ведения хозяйства на данный момент экономически более эффективны.

Несмотря на существующие барьеры, сдерживающие факторы и ограничения, у России есть потенциал и возможности для выстраивания отрасли синтетической биологии, в том числе в сотрудничестве со странами Азиатско-Тихоокеанского региона, для решения собственных задач по сохранению здоровья населения, продовольственной, биологической и экологической безопасности.

Библиография

1. A National Synthetic Biology Roadmap, CSIRO, August 2021 [Электронный ресурс]. URL: [csiro.au/-/media/Services/Futures/Synthetic-Biology-Roadmap.pdf](https://www.csiro.au/-/media/Services/Futures/Synthetic-Biology-Roadmap.pdf) (дата обращения: 16.01.2022).
2. A New Era of Protein Interaction Engineering [Электронный ресурс]. URL: [labmanager.com/insights/a-new-era-of-protein-interaction-engineering-26741](https://www.labmanager.com/insights/a-new-era-of-protein-interaction-engineering-26741) (дата обращения: 16.01.2022).
3. Advancements in Gene Therapy, Synthetic Biology, Diagnostic Assays, Imaging Tracers, and Biopharma—Life Sciences, Health & WellnessTechVision Opportunity Engine, TechVision Group of Frost & Sullivan, TechVision Opportunity Engines /D759 /04
4. Arnason G. (2017). Synthetic Biology between Self-Regulation and Public Discourse: Ethical Issues and the Many Roles of the Ethicist. *Cambridge Quarterly of Healthcare Ethics*, 26 (2). doi:10.1017/S0963180116000840
5. Boyd MA, Kamat NP. Designing Artificial Cells towards a New Generation of Biosensors. *Trends Biotechnol.* 2021;39 (9). doi:10.1016/j.tibtech.2020.12.002
6. Brooks S. M., Alper H. S. Applications, challenges, and needs for employing synthetic biology beyond the lab. *Nat Commun* 12, 1390 (2021). doi.org/10.1038/s41467-021-21740-0
7. Bruynseels K. (2020). Responsible innovation in synthetic biology in response to COVID-19: the role of data positionality. *Ethics and information technology*, 23 (Suppl 1), 1-9. Advance online publication. doi.org/10.1007/s10676-020-09565-9
8. Charles E Cook, Oana Stroe, Guy Cochrane, Ewan Birney, Rolf Apweiler, The European Bioinformatics Institute in 2020: building a global infrastructure of interconnected data resources for the life sciences, *Nucleic Acids Research*, Volume 48, Issue D1, 08 January 2020, Pages D17–D23, doi.org/10.1093/nar/gkz1033
9. Charles E Cook, Oana Stroe, Guy Cochrane, Ewan Birney, Rolf Apweiler, The European Bioinformatics Institute in 2020: building a global infrastructure of interconnected data resources for the life sciences, *Nucleic Acids Research*, Volume 48, Issue D1, 08 January 2020, doi.org/10.1093/nar/gkz1033
10. Chen T Liang, Olivia M A Roscow, Wei Zhang, Recent developments in engineering protein-protein interactions using phage display, *Protein Engineering, Design and Selection*, Volume 34, 2021, gzab014, doi.org/10.1093/protein/gzab014
11. Chriki Sghaier, Hocquette Jean-François, The Myth of Cultured Meat: A Review, *Frontiers in Nutrition*, 7, 2020, DOI:10.3389/fnut.2020.00007, URL: [frontiersin.org/article/10.3389/fnut.2020.00007](https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fnut.2020.00007)
12. Clarke LJ, Kitney RI. Synthetic biology in the UK — An outline of plans and progress. *Synth Syst Biotechnol.* 2016; 1 (4). Published 2016 Oct 17. doi:10.1016/j.synbio.2016.09.003
13. CSIRO Synthetic Biology Future Science Platform. [research.csiro.au/synthetic-biology-fsp/public-attitudes/](https://www.research.csiro.au/synthetic-biology-fsp/public-attitudes/)
14. David Singh Grewal, Before Peer Production: Infrastructure Gaps and the Architecture of Openness in Synthetic Biology, 20 *Stanford Technology Law Review* 143 (2017) [Электронный ресурс]. URL: [law.stanford.edu/publications/before-peer-production-infrastructure-gaps-and-the-architecture-of-openness-in-synthetic-biology/](https://www.law.stanford.edu/publications/before-peer-production-infrastructure-gaps-and-the-architecture-of-openness-in-synthetic-biology/) (дата обращения: 16.01.2022).
15. Dieuliis, Diane. (2018). Biodata Risks and Synthetic Biology: A Critical Juncture. *Journal of Bioterrorism & Biodefense*. 09. doi:10.4172/2157-2526.1000159.
16. Decoene T, De Paepe B, Maertens J, et al. Standardization in synthetic biology: an engineering discipline coming of age. *Crit Rev Biotechnol.* 2018;38 (5). doi:10.1080/07388551.2017.1380600
17. Emerging Opportunities in Synthetic Biology Platforms, Synthetic Biology as a Profound Transformative Technology, TechVision Group of Frost & Sullivan, TechVision Analysis / D89D / 00. Published: 2019-03-30
18. FoodNet: Тренды и барьеры развития, SBS Consulting, октябрь 2021 год
19. Frost & Sullivan, Global Synthetic Biology Industry Outlook — Futuretech TechVisionOpportunity Engine. TechVision Group of Frost & Sullivan. TechVision Opportunity Engines / D835 / 30. Published: 2018-10-26
20. Future Directions of Synthetic Biology for Energy & Power. Virginia Tech Applied Research Corporation. 2018. URL: [basicresearch.defense.gov/Portals/61/Documents/future-directions/Synthetic%20Biology%20for%20Energy%20and%20Power%20-%20Final%20Report.pdf?ver=2018-10-29-133833-863](https://www.basicresearch.defense.gov/Portals/61/Documents/future-directions/Synthetic%20Biology%20for%20Energy%20and%20Power%20-%20Final%20Report.pdf?ver=2018-10-29-133833-863) (дата обращения: 16.01.2022).
21. Hayry M. (2017). Synthetic Biology and Ethics: Past, Present, and Future. *Cambridge Quarterly of Healthcare Ethics*, 26(2), doi:10.1017/S0963180116000803
22. Keiper F., Atanassova A. Regulation of Synthetic Biology: Developments Under the Convention on Biological Diversity and Its Protocols. *Front Bioeng Biotechnol.* 2020;8. Published 2020 Apr 9. doi:10.3389/fbioe.2020.00310
23. Li J, Zhao H, Zheng L and An W (2021) Advances in Synthetic Biology and Biosafety Governance. *Front. Bioeng. Biotechnol.* 9:598087. doi: 10.3389/fbioe.2021.598087
24. Lionel Clarke, Richard Kitney; Developing synthetic biology for industrial biotechnology applications. *Biochem Soc Trans* 28 February 2020; 48 (1). doi: doi.org/10.1042/BST20190349
25. Marc-Sven Roell, Matias D Zurbriggen, The impact of synthetic biology for future agriculture and nutrition, *Current Opinion in Biotechnology*, Volume 61, 2020, ISSN 0958-1669, doi.org/10.1016/j.copbio.2019.10.004
26. Maria Belén Paredes, Maria Eugenia Sulen. An overview of synthetic biology. DOI. 10.21931/RB/2020.05.01.14. URL: [revistabionatura.com/files/2020.05.01.14.pdf](https://www.revistabionatura.com/files/2020.05.01.14.pdf) (дата обращения: 16.01.2022).
27. Müller, Kristian & Arndt, Katja. (2012). Standardization in Synthetic Biology. *Methods in molecular biology* (Clifton, N.J.). doi:10.1007/978-1-61779-412-4_2.
28. Paul S. Freemont; Synthetic biology industry: data-driven design is creating new opportunities in biotechnology. *Emerg Top Life Sci* 11 November 2019; 3 (5). doi: doi.org/10.1042/ETLS20190040.
29. Predictive Models to Accelerate Gas Fermentation for Biomanufacturing [Электронный ресурс] URL: [agilebiofoundry.org/industrial-microbes-gas-fermentation/](https://www.agilebiofoundry.org/industrial-microbes-gas-fermentation/) (дата обращения: 16.01.2022).
30. Protein Industries Canada Annual Report 2021 URL: [proteinindustriescanada.ca/uploads/2021-Annual-Report.pdf](https://www.proteinindustriescanada.ca/uploads/2021-Annual-Report.pdf) (дата обращения: 16.01.2022).
31. Romanowski S, Eustáquio AS. Synthetic biology for natural product drug production and engineering. *Curr Opin Chem Biol.* 2020;58. doi:10.1016/j.cbpa.2020.09.006.
32. Science Direct, Scopus, Biotechnology Innovation Organization, National Human Genome Research Institute.
33. Scientists create glowing plants using mushroom genes [Электронный ресурс]. URL: [theguardian.com/science/2020/apr/27/scientists-create-glowing-plants-using-mushroom-genes](https://www.theguardian.com/science/2020/apr/27/scientists-create-glowing-plants-using-mushroom-genes) (дата обращения: 16.01.2022).
34. Scientists Create Simple Synthetic Cell That Grows and Divides Normally [Электронный ресурс]. URL: [nist.gov/news-events/news/2021/03/scientists-create-simple-synthetic-cell-grows-and-divides-normally](https://www.nist.gov/news-events/news/2021/03/scientists-create-simple-synthetic-cell-grows-and-divides-normally) (дата обращения: 16.01.2022).
35. Si, Tong & Zhao, Huimin. (2016). A brief overview of synthetic biology research programs and roadmap studies in the United States. *Synthetic and Systems Biotechnology*. 1. 10.1016/j.synbio.2016.08.003.
36. Sleator RD. JCVI-syn3.0 — A synthetic genome stripped bare! *Bioengineered.* 2016;7(2). doi:10.1080/21655979.2016.1175847.
37. Stephen K Burley, Charmi Bhikadiya, Chunxiao Bi, Sebastian Bittrich, Li Chen, Gregg V Crichlow, Cole H Christie, Kenneth Dalenberg, Luigi Di Costanzo, Jose M Duarte, Shuchismita Dutta, Zukang Feng, Sai Ganesan, David S Goodsell, Sutapa Ghosh, Rachel Kramer Green, Vladimir Guranović, Dmytro Guzenko, Brian P Hudson, Catherine L Lawson, Yuhe Liang, Robert Lowe, Harry Namkoong, Ezra Peisach, Irina Persikova, Chris Randle, Alexander Rose, Yana Rose, Andrej Sali, Joan Segura, Monica Sekharan, Chenghua Shao, Yi-Ping Tao, Yi-Ping Tao, Maria Voigt, John D Westbrook, Jasmine Y Young, Christine Zardecki, Marina Zhuravleva, RCSB Protein Data Bank: powerful new tools for exploring 3D structures of biological macromolecules for basic and applied research and education in fundamental biology, biomedicine, biotechnology, bioengineering and energy sciences, *Nucleic Acids Research*, Volume 49, Issue D1, 8 January 2021.

38. Synbiobeta. Built with biology Q2 2021 Report.
39. Synbiobeta: SynBio Stack [Электронный ресурс]. URL: synbiobeta.com/the-synbio-stack-part-1/ (дата обращения: 16.01.2022).
40. Synthetic Biology Is About to Disrupt Your Industry [Электронный ресурс]. URL: bcg.com/publications/2022/synthetic-biology-is-about-to-disrupt-your-industry (дата обращения: 16.01.2022).
41. Synthetic Biology Startups Raised \$3 Billion In The First Half Of 2020 [Электронный ресурс] URL: forbes.com/sites/johncumbers/2020/09/09/synthetic-biology-startups-raised-30-billion-in-the-first-half-of-2020/?sh=2f131a021265 (дата обращения: 16.01.2022).
42. Synthetic Biology UK A Decade of Rapid Progress 2009-2019 [Электронный ресурс] URL: ktn-uk.org/wp-content/uploads/2020/08/SBLC-combined-final.pdf (дата обращения: 16.01.2022).
43. Synthetic Minimal Cells [Электронный ресурс] URL: bio.academany.org/2018/synthetic_minimal_cells.html (дата обращения: 16.01.2022).
44. The European Synthetic Cell Initiative [Электронный ресурс] URL: syntheticcell.eu (дата обращения: 16.01.2022).
45. The Protein Cluster — TPC [Электронный ресурс] URL: theproteincluster.com (дата обращения: 16.01.2022).
46. Trump B. D., Galaitsi S. E., Appleton E., Bleijs D. A., Florin M. V., Gollihar J. D., Hamilton R. A., Kuiken T., Lentzos F., Mampuy R., Merad M., Novosiolova T., Oye K., Perkins E., Garcia-Reyero N., Rhodes C., & Linkov I. (2020). Building biosecurity for synthetic biology. *Molecular Systems Biology*, 16 (7), [e9723]. doi.org/10.15252/msb.20209723
47. Trump, Benjamin & Cummings, Christopher & Kuzma, Jennifer. (2017). A decision analytic model to guide early-stage government regulatory action: Applications for synthetic biology. *Regulation & Governance*. 12. 10.1111/rego.12142.
48. Vickers, C.E., Freemont, P.S. Pandemic preparedness: synthetic biology and publicly funded biofoundries can rapidly accelerate response time. *Nat Commun* 13, 453 (2022), doi.org/10.1038/s41467-022-28103-3
49. VTARC, Innovations in Pest Management, Renewable Gas and Fuel Production and Plastic Recycling, Report May 2020, Frost & Sullivan
50. World Economic Forum, Aleph Farms, Kazuko Sato, Cultured Meat Production Technology: Challenges and Future Development, Mitsui & Co Global Strategic Studies Institute Monthly Report November 2020. [Электронный ресурс] URL: mitsui.com/mgssi/en/report/detail/_icsFiles/afieldfile/2021/01/18/2011t_sato_e.pdf (дата обращения: 16.01.2022).
51. Xu C, Hu S, Chen X. Artificial cells: from basic science to applications. *Mater Today (Kidlington)*. 2016 Nov;19(9). doi: 10.1016/j.mattod.2016.02.020. PMID: 28077925; PMCID: PMC5222523
52. Zhao H. & Medema M. H. (2016). Standardization for natural product synthetic biology. *Natural product reports*, 33 (8). doi.org/10.1039/c6np00030d
53. База данных Science Direct [Электронный ресурс]. URL: sciencedirect.com (дата обращения: 16.01.2022).
54. База данных Scopus [Электронный ресурс]. URL: scopus.com (дата обращения: 16.01.2022).
55. Глобальный альянс биофаундрис (Global Biofoundries Alliance) [Электронный ресурс]. URL: biofoundries.org (дата обращения: 16.01.2022).
56. Государственное объединение научных и прикладных исследований (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, CSIRO) [Электронный ресурс]. URL: csiro.au (дата обращения: 16.01.2022).
57. Европейский институт биоинформатики (EMBL's European Bioinformatics Institute, EMBL-EBI) [Электронный ресурс]. URL: ebi.ac.uk/ (дата обращения: 16.01.2022).
58. Информационная служба сообщества по исследованиям и разработкам (European Commission CORDIS) [Электронный ресурс]. URL: cordis.europa.eu/ (дата обращения: 16.01.2022).
59. Интернет-портал Asia-Pacific Biotech [Электронный ресурс]. URL: asiabiotech.com (дата обращения: 16.01.2022).
60. Интернет-портал Bioökonomie.DE [Электронный ресурс]. URL: biooekonomie.de (дата обращения: 16.01.2022).
61. Интернет-портал Global Biodefense [Электронный ресурс]. URL: globalbiodefense.com (дата обращения: 16.01.2022).
62. Интернет-портал Golden [Электронный ресурс]. URL: golden.com (дата обращения: 16.01.2022).
63. Исследовательский совет по биотехнологии и биологическим наукам Великобритании (Biotechnology and Biological Sciences Research Council) [Электронный ресурс]. URL: bbsrc.ukri.org (дата обращения: 16.01.2022).
64. Карта кластеров России. НИУ ВШЭ [Электронный ресурс]. URL: map.cluster.hse.ru (дата обращения: 16.01.2022).
65. Обзор рынка биотехнологии в России и в мире. Барьеры и перспективы развития. Сентябрь 2019 [Электронный ресурс]. URL: biotech2030.ru/wp-content/uploads/2019/09/Orlova-N-V.pdf (дата обращения: 16.01.2022).
66. Онлайн-база патентов «Lens» [Электронный ресурс]. URL: lens.org (дата обращения: 16.01.2022).
67. Официальный портал CB Insight [Электронный ресурс]. URL: cbinsights.com (дата обращения: 16.01.2022).
68. Официальный портал SynBioBeta [Электронный ресурс]. URL: builtwithbiology.com (дата обращения: 16.01.2022).
69. Платформа Crunchbase [Электронный ресурс]. URL: crunchbase.com (дата обращения: 16.01.2022).
70. Природа под редакцией. Развитие синтетической биологии в России упирается в нехватку денег. Деловой Петербург [Электронный ресурс]. URL: dp.ru/a/2019/02/12/Priroda_pod_redakciej (дата обращения: 16.01.2022).
71. Российская венчурная компания (РВК) [Электронный ресурс]. URL: biotech2030.ru/instrumenty-gos-podderzhki/fondy/rvk (дата обращения: 16.01.2022).
72. Ученые впервые построили полноценную модель живой клетки [Электронный ресурс]. URL: news/2022/01/24/17182579.shtml (дата обращения: 16.01.2022).
73. Ученые ДГТУ и ВолгГМУ вырастят в лабораторных условиях котлету из мяса кролика [Электронный ресурс]. URL: donstu.ru/news/nauka/uchenye-dgtu-i-volggmu-vyrastyat-v-laboratornykh-usloviyakh-kotletu-iz-kletok-myasa-krolika (дата обращения: 16.01.2022).
74. Управление перспективных исследовательских проектов Министерства обороны США (Defense Advanced Research Projects Agency, DAPRA) [Электронный ресурс]. URL: dapra.com (дата обращения: 16.01.2022).
75. Университет Конкордия (Concordia University) [Электронный ресурс]. URL: concordia.ca (дата обращения: 16.01.2022).
76. «Мираторг» открыл инновационный центр геномной селекции [Электронный ресурс]. URL: miratorg.ru/press/news/miratorg_otkryl_innovatsionnyy_tsentr_genomnoy_se (дата обращения: 16.01.2022).
77. Министерство науки и технологий КНР (Ministry of Science and Technology of the People's Republic of China) [Электронный ресурс]. URL: en.most.gov.cn/ (дата обращения: 16.01.2022).
78. Совет по естественным наукам и инженерным исследованиям Канады (Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada) [Электронный ресурс]. URL: nserc-crsng.gc.ca (дата обращения: 16.01.2022).
79. «Эфко» — наш ответ Beyond Meat. Выпустит мясо из белка подсолнечника. РБК [Электронный ресурс]. URL: quote.rbc.ru/news/article/5f60f5c69a794702558a49fb (дата обращения: 16.01.2022).

Приложение 1

Лидирующие исследовательские центры синтетической биологии

В таблице представлен список научно-технологических фронтиров синтетической биологии, ранжированный по объему научных публикаций Scopus за период 2015–2020 гг. Для каждого научно-технологического фронта приведены мировые и российские исследовательские центры, выступающие лидерами по объему публикаций Scopus по данной тематике. Данный список дает возможность определить ключевых научных игроков, оценить географию концентрации исследований в области синтетической биологии, а также определить дефицитные зоны российских исследований в синтетической биологии.

№	Научно-технологические фронтиры	В мире	В России
1	Биоинформатика	Ministry of Education China (Китай), Chinese Academy of Sciences (Китай), CNRS Centre National de la Recherche Scientifique (Франция), Harvard Medical School (США), National Institutes of Health NIH (США), Shanghai Jiao Tong University (Китай), Fudan University (Китай), Inserm (Франция), Central South University (Китай), Zhejiang University (Китай)	РАН, МГУ, Институт цитологии и генетики СО РАН, СО РАН, НГУ, МФТИ, СПбГУ, Институт общей генетики им. Н. И. Вавилова РАН, Институт биоорганической химии им. М. М. Шемякина и Ю. А. Овчинникова РАН
2	Экспрессия генов	Harvard Medical School (США), Inserm (Франция), National Institutes of Health NIH (США), Ministry of Education China (Китай), Chinese Academy of Sciences (Китай), CNRS Centre National de la Recherche Scientifique (Франция), Howard Hughes Medical Institute (США), University of California (США), The University of Tokyo (Япония), University of Toronto (Канада)	РАН, МГУ, Министерство здравоохранения Российской Федерации, СО РАН, Институт цитологии и генетики СО РАН, Институт биоорганической химии им. М. М. Шемякина и Ю. А. Овчинникова РАН, Сеченовский университет, НГУ, СПбГУ, Институт молекулярной биологии им. В. А. Энгельгардта РАН
3	Биомаркеры: онкомаркеры, маркеры старения	Chinese Academy of Sciences (Китай), Inserm (Франция), CNRS Centre National de la Recherche Scientifique (Франция), National Institutes of Health NIH (США), Harvard Medical School (США), University of California (США), The University of Tokyo (Япония), University of Toronto (Канада), Baylor College of Medicine (США), Albert Einstein College of Medicine of Yeshiva University (США)	РАН, МГУ, Министерство здравоохранения РФ, Сеченовский университет, КФУ, РНИМУ им. Пирогова, СПбГУ
4	Полимеразная цепная реакция	Ministry of Education China (Китай), Chinese Academy of Sciences (Китай), Inserm (Франция), Universidade de São Paulo (Бразилия), CNRS Centre National de la Recherche Scientifique (Франция), Harvard Medical School (США), Fudan University (Китай), Chinese Academy of Agricultural Sciences (Китай), Sun Yat-Sen University (Китай), Nanjing Medical University (Китай)	РАН, Министерство здравоохранения Российской Федерации, МГУ, Сеченовский университет, СО РАН, Российский национальный исследовательский медицинский университет им. Н. И. Пирогова, НГУ, Институт цитологии и генетики СО РАН, КФУ, СПбГУ
5	Получение целевых метаболитов	Ministry of Education China (Китай), Chinese Academy of Sciences (Китай), CNRS Centre National de la Recherche Scientifique (Франция), University of Chinese Academy of Sciences (Китай), Harvard Medical School (США), Universidade de São Paulo (Бразилия), Inserm (Франция), Zhejiang University (Китай), Chinese Academy of Agricultural Sciences (Китай), Ministry of Agriculture of the People's Republic of China (Китай)	РАН, МГУ, Сеченовский университет, СО РАН, Министерство здравоохранения Российской Федерации, ДВО РАН, СПбГУ, Российский национальный исследовательский медицинский университет им. Н. И. Пирогова, КФУ, Тихоокеанский институт биоорганической химии им. Г. Б. Елякова ДВО РАН

№	Научно-технологические фронтиры	В мире	В России
6	Технологии культивирования клеток и тканей	Ministry of Education China (Китай), Chinese Academy of Sciences (Китай), CNRS Centre National de la Recherche Scientifique (Китай), Harvard Medical School (США), Inserm (Франция), National Institutes of Health NIH (США), Universidade de São Paulo (Бразилия), University of Chinese Academy of Sciences (Китай), Zhejiang University (Китай), Consiglio Nazionale delle Ricerche (Италия)	РАН, МГУ, Министерство здравоохранения Российской Федерации, Сеченовский университет, СО РАН, СПбГУ, Институт биоорганической химии им. М. М. Шемякина и Ю. А. Овчинникова РАН, КФУ, НГУ, Российский национальный исследовательский медицинский университет им. Н. И. Пирогова
7	Machine Learning в биологии	Carnegie Mellon University (США), Dalian University of Technology (Китай), Wuhan University (Китай), Hong Kong Polytechnic University (Китай), Harvard Medical School (США), ETH Zurich (Германия), Google LLC (США), Beijing Normal University (Китай), Huazhong University of Science and Technology (Китай), Fudan University (Китай)	Университет ИТМО, МФТИ, НИУ ВШЭ, Сколтех, МГУ, Yandex LLC, Университет Иннополис, Сеченовский университет, КФУ, ТПУ
8	Синтез и мутирование белков	Ministry of Education China (Китай), Chinese Academy of Sciences (Китай), CNRS Centre National de la Recherche Scientifique (Франция), University of Chinese Academy of Sciences (Китай), Harvard Medical School (США), Inserm (Франция), National Institutes of Health NIH (США), Zhejiang University (Китай), Universidade de São Paulo (Бразилия), Consejo Superior de Investigaciones Científicas (Испания)	РАН, МГУ, СО РАН, СПбГУ, Институт биоорганической химии им. М. М. Шемякина и Ю. А. Овчинникова РАН, Сеченовский университет, НГУ, КФУ, Министерство здравоохранения Российской Федерации, МФТИ
9	Белок-белковые взаимодействия	CNRS Centre National de la Recherche Scientifique (Франция), Harvard Medical School (США), National Institutes of Health NIH (США), Inserm (Франция), Howard Hughes Medical Institute (США), Ministry of Education China (Китай), Chinese Academy of Sciences (Китай), University of Toronto (Канада), University of California (США), University of Cambridge (США)	РАН, МГУ, СО РАН, Институт биологического приборостроения с опытным производством РАН, Институт биоорганической химии им. М. М. Шемякина и Ю. А. Овчинникова РАН, НГУ, ФГБУН институт цитологии РАН, Институт биомедицинской химии им. В. Н. Ореховича
10	Биореакторы	Chinese Academy of Sciences (Китай), Wageningen University (Нидерланды), National University of Singapore (Сингапур), Harbin Institute of Technology (Китай), The State Key Laboratory of Bioreactor Engineering (Китай), Chongqing University (Китай), Hohai University (Китай), Arizona State University (США), Delft University of Technology (Нидерланды), KU Leuven (Бельгия)	МГУ, Университет ИТМО, Институт физиологии растений им. К. А. Тимирязева РАН, Сеченовский университет, Институт органической химии им. Н. Д. Зелинского, КФУ, Институт молекулярной биологии им. В. А. Энгельгардта РАН, Центр теоретических проблем физико-химической фармакологии РАН, НИИ биомедицинской химии им. В. Н. Ореховича, Институт нефтехимического синтеза им. А. В. Топчиева РАН
11	Математическое моделирование в биоинжиниринге	Massachusetts Institute of Technology (США), KU Leuven (Бельгия), Virginia Polytechnic Institute and State University (США), Harbin Institute of Technology (Китай), Harvard T.H. Chan School of Public Health (США), Imperial College London (Великобритания), Wuhan University of Technology (Китай), Alma Mater Studiorum Universita di Bologna (Франция), China University of Mining and Technology (Китай), Yonsei University (Южная Корея)	МГУ, МФТИ, МГТУ им. Баумана, СПбГУ, Университет ИТМО, Сеченовский университет, Сколтех, УрФУ, ТПУ, ННГУ

№	Научно-технологические фронтиры	В мире	В России
12	Протеиновый фолдинг (предсказание структуры белка)	CNRS Centre National de la Recherche Scientifique (Франция), Chinese Academy of Sciences (Китай), Ministry of Education China (Китай), National Institutes of Health NIH (США), University of Cambridge (США), University of Chinese Academy of Sciences (Китай), Inserm (Франция), Harvard Medical School (США), Consiglio Nazionale delle Ricerche (Италия), Howard Hughes Medical Institute (США)	РАН, МГУ, Институт биологического приборостроения с опытным производством РАН, ФГБУН институт цитологии РАН, Институт биоорганической химии им. М. М. Шемякина и Ю. А. Овчинникова РАН, СПбГУ, СО РАН, Институт белка РАН
13	Микрофлюидика	Chinese Academy of Sciences (Китай), Ministry of Education China (Китай), CNRS Centre National de la Recherche Scientifique (Франция), Tsinghua University (Китай), Massachusetts Institute of Technology (США), University of Chinese Academy of Sciences (Китай), Harvard Medical School (США), Zhejiang University (Китай), ETH Zürich (Швейцария), Harvard University (США)	РАН, МГУ, СО РАН, Сеченовский университет, Университет ИТМО, Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, НГУ, СФУ, ТПУ, ИАП РАН
14	Секвенирование генома	Chinese Academy of Sciences (Китай), Harvard Medical School (США), Ministry of Education China (Китай), National Institutes of Health NIH (США), CNRS Centre National de la Recherche Scientifique (Франция), Wellcome Sanger Institute (Великобритания), Massachusetts Institute of Technology (США), University of Cambridge (Великобритания), Inserm (Франция), Broad Institute (США)	РАН, СПбГУ, МГУ, СО РАН, Институт цитологии и генетики СО РАН, НГУ, Институт общей генетики им. Н. И. Вавилова РАН, Сеченовский университет, МФТИ, КФУ
15	Инжиниринг белковых сетей	Ministry of Education China (Китай), Chinese Academy of Sciences (Китай), CNRS Centre National de la Recherche Scientifique (Франция), University of Chinese Academy of Sciences (Китай), Zhejiang University (Китай), Harvard Medical School (США), Massachusetts Institute of Technology (США), Shanghai Jiao Tong University (Китай), Ministry of Agriculture of the People's Republic of China (Китай), Sichuan University (Китай)	РАН, МГУ, СО РАН, СПбГУ, ИБХ РАН им. академиков М. М. Шемякина и Ю. А. Овчинникова, КФУ, Сеченовский университет, МФТИ, НГУ, Университет ИТМО
16	Получение вторичных метаболитов растений	Chinese Academy of Sciences (Китай), Ministry of Education China (Китай), CNRS Centre National de la Recherche Scientifique (Франция), University of Chinese Academy of Sciences (Китай), Universidade de São Paulo (Бразилия), Chinese Academy of Agricultural Sciences (Китай), Ministry of Agriculture of the People's Republic of China (Китай), Consiglio Nazionale delle Ricerche (Италия), Zhejiang University (Китай), King Saud University (Саудовская Аравия)	РАН, МГУ, СО РАН, ДВО РАН, СПбГУ, ДВФУ, Тихоокеанский институт биоорганической химии им. Г. Б. Елякова ДВО РАН, Сеченовский университет, КФУ, Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений
17	Сайт-направленный мутагенез	Chinese Academy of Sciences (Китай), CNRS Centre National de la Recherche Scientifique (Франция), University of Toronto (Канада), University of Pittsburgh (США), University of Wisconsin-Madison (США), University of Pennsylvania (США), Cornell University (США), ETH Zurich (Швейцария), University of Oxford (США), Aarhus Universitet (Дания)	МГУ, ИБХ РАН им. академиков М. М. Шемякина и Ю. А. Овчинникова, НИЦ «Курчатовский институт», НИИ биомедицинской химии им. В. Н. Ореховича, СПбГУ, НГУ, Институт биохимии и физиологии микроорганизмов РАН, Институт эволюционной физиологии и биохимии им. И. М. Сеченова РАН, КФУ, Институт цитологии и генетики СО РАН

№	Научно-технологические фронтиры	В мире	В России
18	Удешевление персонализированной медицины	Harvard Medical School (США), CNRS Centre National de la Recherche Scientifique (Франция), Columbia University (США), Charite Universitätsmedizin Berlin (Германия), German Cancer Research Center (Германия), Massachusetts General Hospital (США), University College London (Великобритания), University of California (США), University of Pennsylvania (США), University of Washington (США)	РНИМУ им. Пирогова, МГУ, СПбГУ, ТГУ, СибГМУ
19	Омиксные технологии	Chinese Academy of Sciences (Китай), Ministry of Education China (Китай), Harvard Medical School (США), CNRS Centre National de la Recherche Scientifique (Франция), Inserm (Франция), University of Chinese Academy of Sciences (Китай), University of California, San Diego (США), National Institutes of Health NIH (США), Københavns Universitet (Дания), Imperial College London (Великобритания)	РАН, МГУ, Сеченовский университет, Институт биомедицинской химии им. В. Н. Ореховича, СПбГУ, МФТИ, Министерство здравоохранения Российской Федерации, СО РАН, ИБХ РАН им. академиков М. М. Шемякина и Ю. А. Овчинникова, Институт цитологии и генетики СО РАН
20	Экстракция генетического материала	Ministry of Education China (Китай), Chinese Academy of Sciences (Китай), CNRS Centre National de la Recherche Scientifique (Франция), University of Chinese Academy of Sciences (Китай), Chinese Academy of Agricultural Sciences (Китай), Universidade de São Paulo (Бразилия), Ministry of Agriculture of the People's Republic of China (Китай), Zhejiang University (Китай), Inserm (Франция), Københavns Universitet (Дания)	РАН, МГУ, СО РАН, СПбГУ, КФУ, ИБХ РАН им. академиков М. М. Шемякина и Ю. А. Овчинникова, ДВО РАН, Сеченовский университет, МФТИ, Институт общей генетики им. Н. И. Вавилова РАН
21	Адресная доставка биопрепаратов, лекарств	Ministry of Education China (Китай), Chinese Academy of Sciences (Китай), Harvard Medical School (США), CNRS Centre National de la Recherche Scientifique (Франция), University of Chinese Academy of Sciences (Китай), Sichuan University (Китай), Fudan University (Китай), Zhejiang University (Китай), Shanghai Jiao Tong University (Китай), Inserm (Франция)	РАН, МГУ, Сеченовский университет, СО РАН, КФУ, ИБХ РАН им. академиков М. М. Шемякина и Ю. А. Овчинникова, СПбГУ, Министерство здравоохранения Российской Федерации, МИСиС, Университет ИТМО
22	CRISPR-Cas9 (с 2013 г.)	Chinese Academy of Sciences (Китай), Harvard Medical School (США), Ministry of Education China (Китай), Howard Hughes Medical Institute (США), Massachusetts Institute of Technology (США), University of Chinese Academy of Sciences (Китай), National Institutes of Health NIH (США), CNRS Centre National de la Recherche Scientifique (Франция), Broad Institute (США), University of California, San Francisco (США)	РАН, СО РАН, МГУ, Институт цитологии и генетики СО РАН, НГУ, Институт химической биологии и фундаментальной медицины СО РАН, Министерство здравоохранения Российской Федерации, Институт биологии гена РАН, Сеченовский университет, ФГБУ ГНЦ институт иммунологии ФМБА России
23	Метагеномика	Chinese Academy of Sciences (Китай), CNRS Centre National de la Recherche Scientifique (Франция), University of California, San Francisco (США), Ministry of Education China (Китай), University of California, San Diego (США), U.S. Department of Energy Joint Genome Institute (США), Københavns Universitet (Дания), Lawrence Berkeley National Laboratory (США), Massachusetts Institute of Technology (США), University of California, Berkeley (США)	РАН, МФТИ, СПбГУ, МГУ, СО РАН, Федеральный научно-клинический центр физико-химической медицины Федерального медико-биологического агентства России, ФГБУН институт микробиологии им. С. Н. Виноградского Российской академии наук, Институт биоинженерии в составе ФИЦ Биотехнологии РАН, КФУ, Лимнологический институт СО РАН

№	Научно-технологические фронтиры	В мире	В России
24	Кибербезопасность	Chinese Academy of Sciences (Китай), Carnegie Mellon University (США), Amrita University (Индия), Chengdu University of Information Technology (Китай), Arizona State University (США), Austrian Institute of Technology (Австрия), Delft University of Technology (Нидерланды), Imperial College London (Великобритания), The University of Arizona (США), Universiteit Twente (Нидерланды)	НИЯУ МИФИ, СПбПУ, Университет ИТМО, СПбГЭТУ «ЛЭТИ», СПбГУ, ТПУ, Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, Университет Иннополис, МГТУ им. Баумана, ТУСУР, СПб ФИЦ РАН
25	Биобанк данных биологических и генетических ресурсов	Harvard Medical School (США), University of Oxford (Великобритания), University of Oxford Medical Sciences Division (Великобритания), Karolinska Institutet (Швеция), King's College London (Великобритания), University College London (Великобритания), University of Cambridge (Великобритания), Imperial College London (Великобритания), Inserm (Франция), The University of Edinburgh (Великобритания)	РАН, Сеченовский университет, МГУ, Министерство здравоохранения Российской Федерации
26	Анализ биотехнологического потенциала редких экстремофильных микроорганизмов, растений, грибов	Chinese Academy of Sciences (Китай), Chinese Academy of Agricultural Sciences (Китай), Central South University (Китай), Wageningen University (Нидерланды), China Agricultural University (Китай), Jiangnan University (Китай), Tsinghua University (Китай), Consiglio Nazionale delle Ricerche (Италия), Centre de Biotechnologie de Borj Cedria (Тунис), Delft University of Technology (Нидерланды)	Институт биохимии им. А. Н. Баха РАН, МГУ, КФУ, ФИЦ «Фундаментальные основы биотехнологии» РАН, НИЦ «Курчатовский институт», Институт микробиологии им. С. Н. Виноградского, Институт биохимии и физиологии микроорганизмов РАН, ИБХ РАН им. академиков М. М. Шемякина и Ю. А. Овчинникова, НИИ биомедицинской химии им. В. Н. Ореховича, ТГУ
27	Клеточная фабрика	Danmarks Tekniske Universitet (Дания), Ministry of Education China (Китай), Chinese Academy of Sciences (Китай), Novo Nordisk Foundation (Международный фонд), Chalmers University of Technology (Швеция), CNRS Centre National de la Recherche Scientifique (Франция), Jiangnan University (Китай), University of Chinese Academy of Sciences (Китай), National Institutes of Health NIH (США), Consejo Superior de Investigaciones Científicas (Испания)	МГУ, РАН, Институт биологии гена РАН, СПбГУ, Институт общей генетики им. Н. И. Вавилова РАН, ИрНИТУ, Сеченовский университет, Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х. М. Бербекова, ФГБНУ ВНИИ сельскохозяйственной микробиологии
28	Описательный анализ геномов микроорганизмов	Chinese Academy of Sciences (Китай), Wellcome Sanger Institute (Великобритания), Imperial College London (Великобритания), University of Cambridge (Великобритания), University of Oxford (Великобритания), CNRS Centre National de la Recherche Scientifique (Франция), National Institutes of Health NIH (США), University of Melbourne (Австралия), The University of Sydney (Австралия), The University of Edinburgh (Великобритания)	РАН, СПбГУ, Северо-Западный государственный медицинский университет им. И. И. Мечникова, ФГБНУ Институт экспериментальной медицины, Национальный исследовательский центр эпидемиологии и микробиологии им. Н. Ф. Гамалеи, УО РАН, УФУ, НИИЭМ им. Пастера, Санкт-Петербургский институт биорегуляции и геронтологии
29	Нейрогенез и терапия нейродегенеративных заболеваний	Harvard Medical School (США), Inserm (Франция), Ministry of Education China (Китай), CNRS Centre National de la Recherche Scientifique (Франция), Chinese Academy of Sciences (Китай), University of Toronto (Канада), National Institutes of Health NIH (США), Massachusetts General Hospital (США), Karolinska Institutet (Швеция)	РАН, МГУ, Сеченовский университет, Институт цитологии и генетики СО РАН, СПбГУ, Министерство здравоохранения Российской Федерации, СО РАН, Российский национальный исследовательский медицинский университет им. Н. И. Пирогова, НГУ, Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН

№	Научно-технологические фронтиры	В мире	В России
30	Генное редактирование, создание растений с «запрограммированными» свойствами	Tianjin University (Китай), Stanford University (США), The University of Tokyo (Япония), Southeast University (Китай), Jiangsu University (Китай), Arizona State University (США), Carnegie Mellon University (США), Cornell University (США), NC State University (США), Technical University of Munich (Германия)	МГУ, СПбГУ, Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н. И. Вавилова, Сколтех, НГУ, УрФУ, ЮУрГУ, ТПУ, ЮФУ
31	Поиск новых «таргетов» в медицине	Charite Universitatsmedizin Berlin (Германия), University of California (США), Stanford University School of Medicine (США), Capital Medical University (Китай), Baylor College of Medicine (США), Anhui Medical University (Китай), Beth Israel Deaconess Medical Center (США), Case Western Reserve University (США), Centro de Investigacion Biomedica en Red de Enfermedades Hepaticas y Digestivas (Испания), Graduate School of Medicine (Япония)	Сеченовский университет, Институт молекулярной генетики РАН, РНИМУ им. Пирогова, КФУ, Институт цитологии РАН, КГМУ В. Ф. Войно-Ясенецкого
32	Производство биопрепаратов	Harvard Medical School (США), Inserm (Франция), Ministry of Education China (Китай), CNRS Centre National de la Recherche Scientifique (Франция), Chinese Academy of Sciences (Китай), Baylor College of Medicine (США), Anhui Medical University (Китай), University of Toronto (Канада), National Institutes of Health NIH (США), The University of Tokyo (Япония)	РНИМУ им. Пирогова, МГУ, Сеченовский университет, Институт молекулярной генетики РАН, КФУ, Институт молекулярной биологии им. В. А. Энгельгардта РАН, Институт химической биологии и фундаментальной медицины СО РАН
33	Вирусные векторы доставки	National Institutes of Health NIH (США), CNRS Centre National de la Recherche Scientifique (Франция), Ministry of Education China (Китай), Chinese Academy of Sciences (Китай), Inserm (Франция), Harvard Medical School (США), University of Oxford (Великобритания), University of Florida (США), Chinese Academy of Agricultural Sciences (Китай), University of Pennsylvania (США)	РАН, МГУ, Государственный научный центр вирусологии и биотехнологии «Вектор», Сеченовский университет, СО РАН, Министерство здравоохранения Российской Федерации, НГУ, ИБХ РАН им. академиком М. М. Шемякина и Ю. А. Овчинникова, КФУ, Институт химической биологии и фундаментальной медицины СО РАН
34	Синтез РНК	National Institutes of Health NIH (США), CNRS Centre National de la Recherche Scientifique (Франция), Inserm (Франция), Harvard Medical School (США), Howard Hughes Medical Institute (США), The University of Tokyo (Япония), Chinese Academy of Sciences (Китай), Ministry of Education China (Китай), University of California, San Francisco (США), University of Wisconsin-Madison (США)	РАН, МГУ, СО РАН, Институт химической биологии и фундаментальной медицины СО РАН, НГУ, ИБХ РАН им. академиком М. М. Шемякина и Ю. А. Овчинникова, Институт молекулярной биологии им. В. А. Энгельгардта РАН, Сколковский институт науки и технологий, Институт цитологии и генетики СО РАН, Сеченовский университет
35	Фаговые библиотеки	Fudan University (Китай), Albert Einstein College of Medicine of Yeshiva University (США), Huazhong Agricultural University (Китай), Forschungszentrum Julich (FZJ) (Германия), Genentech Inc. (США), Harvard Medical School (США), Imperial College London (Великобритания), German Cancer Research Center (Германия), Hanyang University (Южная Корея), Harbin Medical University (Китай)	РАН, ИБХ РАН им. академиком М. М. Шемякина и Ю. А. Овчинникова, МГУ, ННГУ им. Лобачевского, ГНЦ вирусологии и биотехнологии «Вектор», Институт белка РАН

№	Научно-технологические фронтиры	В мире	В России
36	Молекулярные машины	Chinese Academy of Sciences (Китай), CNRS Centre National de la Recherche Scientifique (Франция), Ministry of Education China (Китай), Massachusetts Institute of Technology (США), Harvard Medical School (США), University of Cambridge (Великобритания), The University of Tokyo (Япония), University of California, San Diego (США), Howard Hughes Medical Institute (США), Stanford University (США)	РАН, МГУ, МФТИ, Сколковский институт науки и технологий, КФУ, Сеченовский университет, Университет ИТМО, МИСиС, ИБХ РАН им. академиков М. М. Шемякина и Ю. А. Овчинникова, НИУ ВШЭ
37	Клеточные взаимодействия	Harvard Medical School (США), Inserm (Франция), CNRS Centre National de la Recherche Scientifique (Франция), National Institutes of Health NIH (США), Chinese Academy of Sciences (Китай), Howard Hughes Medical Institute (США), Ministry of Education China (Китай), University of California, San Francisco (США), University of Toronto (Канада), University of California, San Diego (США)	РАН, МГУ, СО РАН, ИБХ РАН им. академиков М. М. Шемякина и Ю. А. Овчинникова, СПбГУ, Сеченовский университет, НГУ, МФТИ, Министерство здравоохранения Российской Федерации, КФУ
38	Скафолд белков	CNRS Centre National de la Recherche Scientifique (Франция), Massachusetts Institute of Technology (США), Colorado State University (США), Duke University (США), Graduate School of Medicine (Япония), Osaka University (Япония), Consiglio Nazionale delle Ricerche (Италия), University of Chinese Academy of Sciences (Китай), Shandong University (Китай), The University of North Carolina at Chapel Hill (США)	Институт цитологии РАН, МГУ, Институт аналитического приборостроения РАН, ИБХ РАН им. академиков М. М. Шемякина и Ю. А. Овчинникова, КФУ, Институт химической биологии и фундаментальной медицины РАН, НИИ биомедицинской химии им. В. Н. Ореховича, ТПУ
39	Молекулярные инструменты	Harvard Medical School (США), Inserm (Франция), CNRS Centre National de la Recherche Scientifique (Франция), Chinese Academy of Sciences (Китай), University of Cambridge (Великобритания), The University of Tokyo (Япония), Howard Hughes Medical Institute (США), Stanford University (США), Imperial College London (Великобритания), Tianjin University (Китай)	МГУ, Институт биоорганической химии им. академиков М. М. Шемякина и Ю. А. Овчинникова, РНИМУ им. Пирогова, Институт молекулярной биологии им. В. А. Энгельгардта РАН, Институт химической биологии и фундаментальной медицины СО РАН, Институт биологии гена РАН, Медико-генетический научный центр, РХТУ им. Менделеева, НГУ, КФУ
40	Нормативно-правовое регулирование синтетич. биологии	Chinese Academy of Sciences (Китай), Jiangnan University (Китай), University of Washington (США), Chalmers University of Technology (Швеция), ETH Zurich (Швейцария), China Academy of Chinese Medical Sciences (Китай), Chinese Academy of Agricultural Sciences (Китай), Academy of Scientific and Innovative Research (Индия), Centre for Applied Synthetic Biology (Канада), Sorbonne Universite (Франция)	МГУ, НГУ, СПбГУ, НИИ Аджиномото-Генетика, Сколтех, ТГУ, Институт биохимии им. А. Н. Баха РАН, РНИМУ им. Пирогова, НИЦ «Курчатовский институт», Санкт-Петербургский химико-фармацевтический университет
41	Маркеропосредованная селекция	Chinese Academy of Agricultural Sciences (Китай), USDA Agricultural Research Service (США), Ministry of Agriculture of the People's Republic of China (Китай), United States Department of Agriculture (США), Ministry of Education China (Китай), Chinese Academy of Sciences (Китай), Northwest A&F University (Китай), Indian Council of Agricultural Research (Индия), ICAR — Indian Agricultural Research Institute, New Delhi (Индия), Huazhong Agricultural University (Китай)	Всероссийский институт растениеводства им. Н. И. Вавилова, Институт цитологии и генетики СО РАН, СО РАН, РАН, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной биотехнологии», Российский государственный аграрный университет — МСХА им. К. А. Тимирязева, НГУ, СПбГУ, Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений, Институт общей генетики им. Н. И. Вавилова РАН

№	Научно-технологические фронтиры	В мире	В России
42	Концепция «one health»	Harvard Medical School (США), University of Toronto (Канада), National Institutes of Health NIH (США), Ministry of Education China (Китай), University of Melbourne (Австралия), Chinese Academy of Sciences (Китай), Inserm (Франция), University College London (Великобритания), The University of Sydney (Австралия), Karolinska Institutet (Швеция)	Министерство здравоохранения Российской Федерации, РАН, Сеченовский университет, МГУ, Российский национальный исследовательский медицинский университет им. Н. И. Пирогова, СО РАН, СПбГУ, КФУ, РУДН, НИУ ВШЭ
43	Производство химерных белков (содержащих активность двух и более целевых белков)	Chinese Academy of Sciences (Китай), Harvard Medical School (США), National Institutes of Health NIH (США), Ministry of Education China (Китай), CNRS Centre National de la Recherche Scientifique (Франция), Inserm (Франция), University of Pennsylvania (США), University of Pennsylvania Perelman School of Medicine (США), University of Texas MD Anderson Cancer Center (США), University of California, San Diego (США)	РАН, МГУ, ИБХ РАН им. академиков М. М. Шемякина и Ю. А. Овчинникова, СО РАН, Сеченовский университет, НГУ, Министерство здравоохранения Российской Федерации, Институт молекулярной биологии им. В. А. Энгельгардта РАН, СПбГУ, Институт химической биологии и фундаментальной медицины СО РАН
44	Синтез питательных сред для выращивания клеточной массы	Beijing University of Chemical Technology (Китай), Chinese Academy of Sciences (Китай), Friedrich-Alexander-Universitat (Германия), Adolphe Merkle Institute (Швейцария), Amgen Inc. (США), Bristol-Myers Squibb (США), ETH Zurich, (Швейцария), University College London (Великобритания), Consiglio Nazionale delle Ricerche (Италия), Universidade do Porto (Португалия)	МГУ, Институт химической биологии и фундаментальной медицины СО РАН, Институт цитологии РАН, ФНЦ БСТ РАН, Институт биохимической физики им. Н. М. Эмануэля РАН, НИЦЭМ им. Н. Ф. Гамалеи, КФУ, РХТУ им. Менделеева, СПбГУ, ДВФУ
45	Организмы с модифицированными ДНК/РНК	Chinese Academy of Sciences (Китай), Ministry of Agriculture of the People's Republic of China (Китай), Ministry of Education China (Китай), CNRS Centre National de la Recherche Scientifique (Франция), Chinese Academy of Agricultural Sciences (Китай), China Agricultural University (Китай), Wageningen University & Research (Нидерланды), Universiteit Gent (Бельгия), Harvard Medical School (США), Consejo Superior de Investigaciones Científicas (Испания)	РАН, МГУ, ИБХ РАН им. академиков М. М. Шемякина и Ю. А. Овчинникова, СО РАН, СПбГУ, НГУ, Федеральный исследовательский центр питания, биотехнологии и безопасности пищи, Институт цитологии и генетики СО РАН, Сеченовский университет, Министерство здравоохранения Российской Федерации
46	Биосурфактанты	Ministry of Education China (Китай), Chinese Academy of Sciences (Китай), CNRS Centre National de la Recherche Scientifique (Франция), Universiteit Gent (Бельгия), Universidade Catolica de Pernambuco (Бразилия), University of Massachusetts Amherst (США), Universidade de São Paulo (Бразилия), Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (Аргентина), University of Chinese Academy of Sciences (Китай), Ulster University (Ирландия)	РАН, Институт экологии и генетики микроорганизмов УРО РАН, Пермский государственный университет, МГУ, Институт биохимии и генетики Уфимского федерального исследовательского центра РАН, КФУ, Институт биохимии и физиологии микроорганизмов им. Г. К. Скрябина РАН, ФГБУН институт микробиологии им. С. Н. Виноградского Российской академии наук, УРО РАН, СО РАН
47	Культированная кожа	Chinese Academy of Sciences (Китай), Ministry of Education China (Китай), Tsinghua University (Китай), University of Chinese Academy of Sciences (Китай), CNRS Centre National de la Recherche Scientifique (Франция), Harvard Medical School (США), National University of Singapore (Сингапур), Massachusetts Institute of Technology (США), Zhejiang University (Китай), Shanghai Jiao Tong University (Китай)	РАН, МГУ, Сеченовский университет, Министерство здравоохранения Российской Федерации, Университет ИТМО, СО РАН, МФТИ, Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», НМИЦ трансплантологии и искусственных органов им. академика В. И. Шумакова, ТПУ

№	Научно-технологические фронтиры	В мире	В России
48	Редактирование клеток человека (клетки крови, стволовые клетки и другие)	Harvard Medical School (США), Massachusetts Institute of Technology (США), Broad Institute (США), University of California (США), Center for iPS Cell Research and Application (Япония), Central South University (Китай), Charite Universitätsmedizin Berlin (Германия), Children's Hospital Boston (США), Seoul National University (Южная Корея), China Pharmaceutical University (Китай)	МГУ, Институт биоорганической химии им. академиков М. М. Шемякина и Ю. А. Овчинникова, РНИМУ им. Пирогова, Институт молекулярной биологии им. В. А. Энгельгардта РАН, Институт химической биологии и фундаментальной медицины СО РАН, НМИНЦ им. Е. Н. Мешалкина, Институт биологии гена РАН, Медико-генетический научный центр, НГУ, КФУ
49	Геномные библиотеки растений и микроорганизмов	University of California (США), Ministry of Agriculture of the People's Republic of China (Китай), University of Wisconsin-Madison (США), South China Agricultural University (Китай), Nanjing Agricultural University (Китай), Tohoku University (Япония), Ruhr-Universität Bochum (Германия), University of Pretoria (ЮАР), Huazhong Agricultural University (Китай), University of Wisconsin-Madison (США)	МГУ, Институт биоорганической химии им. академиков М. М. Шемякина и Ю. А. Овчинникова, СПбГУ, Всероссийский НИИ сельскохозяйственной биотехнологии, Сеченовский университет, Всероссийский НИИ сельскохозяйственной микробиологии, БРЦ ВКПМ НИЦ «Курчатowski институт», Сколтех, Медико-генетический научный центр
50	Исследование глиобластомы, механизма блокирования передачи	Harvard Medical School (США), German Cancer Research Center (Германия), Capital Medical University (Китай), Columbia University (США), Beijing University of Chinese Medicine (Китай), Anhui Medical University (Китай), Arizona State University (США), Baylor College of Medicine (США), Beijing University of Chinese Medicine (Китай), Karolinska Institutet (Швеция)	МГУ, НГУ, Институт цитологии РАН, Институт химической биологии и фундаментальной медицины СО РАН, ЮФУ
51	Создание рекомбинантных белков	Ministry of Education China (Китай), Chinese Academy of Sciences (Китай), CNRS Centre National de la Recherche Scientifique (Франция), National Institutes of Health NIH (США), Inserm (Франция), Harvard Medical School (США), Chinese Academy of Agricultural Sciences (Китай), Jiangnan University (Китай), Universidade de São Paulo (Бразилия), Ministry of Agriculture of the People's Republic of China (Китай)	РАН, МГУ, Институт биоорганической химии им. академиков М. М. Шемякина и Ю. А. Овчинникова, Сеченовский университет, Министерство здравоохранения Российской Федерации, СО РАН, СПбГУ, ФИЦ Биотехнологии РАН, КФУ, Национальный исследовательский центр «Курчатowski институт»
52	Биопечать органов	Ministry of Education China (Китай), Harvard Medical School (США), Chinese Academy of Sciences (Китай), Nanyang Technological University (Китай), Tsinghua University (Китай), Massachusetts Institute of Technology (США), Brigham and Women's Hospital (США), Zhejiang University (Китай), School of Mechanical and Aerospace Engineering (Великобритания), Wake Forest School of Medicine (США)	Сеченовский университет, РАН, МГУ, ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Министерство здравоохранения Российской Федерации, Институт химической физики им. Н. Н. Семенова РАН, Национальный медицинский исследовательский центр радиологии, СПбПУ, Московский политех
53	Биоданные	Biocomplexity Institute of Virginia Tech (США), Chinese Academy of Agricultural Sciences (Китай), Geisel School of Medicine at Dartmouth (США), Harvard Medical School (США), Wageningen University (Нидерланды), University of Pennsylvania (США), University College London (Великобритания), Universität Bielefeld (Германия), University of California (США), University of Cambridge (Великобритания)	НИИ биомедицинской химии им. В. Н. Ореховича, МГУ, МФТИ, Сколтех, Сеченовский университет, Институт общей генетики им. Н. И. Вавилова РАН, Институт проблем передачи информации им. А. А. Харкевича РАН, Институт биологии гена РАН, РНИМУ им. Пирогова, Институт математических проблем биологии РАН

№	Научно-технологические фронтиры	В мире	В России
54	Сетевые биолaborатории	Ministry of Education China (Китай), Chinese Academy of Sciences (Китай), University of Chinese Academy of Sciences (Китай), Tsinghua University (Китай), Shanghai Jiao Tong University (Китай), Zhejiang University (Китай), CNRS Centre National de la Recherche Scientifique (Франция), Peking University (Китай), Beijing University of Posts and Telecommunications (Китай), Huazhong University of Science and Technology (Китай)	РАН, МГУ, МФТИ, НГУ, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Институт теоретической и экспериментальной физики, Институт физики высоких энергий
55	Культивирование клеток	Chinese Academy of Sciences (Китай), Shandong University (Китай), State Oceanic Administration China (Китай), Istituto Di Chimica Dei Composti Organometallici (Италия), Rice University (США), Chinese Academy of Agricultural Sciences (Китай), Universiteit Maastricht (Нидерланды), University of Kalyani (Индия), Westfalische Wilhelms-Universitat Munster (Германия), University of Minnesota Twin Cities (США)	Институт биохимии им. А. Н. Баха РАН, МГУ, Институт общей генетики им. Н. И. Вавилова РАН, НГУ, Институт цитологии и генетики СО РАН
56	De novo получение клеток через геномное редактирование	Chinese Academy of Sciences (Китай), Ministry of Education China (Китай), Ministry of Agriculture of the People's Republic of China (Китай), Chinese Academy of Agricultural Sciences (Китай), CNRS Centre National de la Recherche Scientifique (Франция), University of Chinese Academy of Sciences (Китай), Nanjing Agricultural University (Китай), USDA Agricultural Research Service (США), Huazhong Agricultural University (Китай), University of California, Davis (США)	РАН, СПбГУ, МГУ, СО РАН, Институт общей генетики им. Н. И. Вавилова РАН, НГУ, Институт цитологии и генетики СО РАН, ИБХ РАН им. академиков М. М. Шемякина и Ю. А. Овчинникова, СФУ, Сколковский институт науки и технологий
57	Методы лечения орфанных заболеваний	Harvard Medical School (США), Broad Institute (США), Children's Hospital Boston (США), KU Leuven (Бельгия), Fudan University (Китай), Columbia University (США), Inserm (Франция), Harvard Stem Cell Institute (США), Hopital Gui de Chauliac (Франция), Medizinische Universitat Wien (Австрия)	РНМУ им. Пирогова, ПСПбГМУ им. Павлова, Сеченовский университет, НИИ общественного здоровья, НИМЦ здоровья детей, Медико-генетический научный центр, СПбГУ, Томский НИМЦ, НИМЦ кардиологии, УрФУ
58	Производство альтернативных белков	University of Oxford (Великобритания), University of Chinese Academy of Sciences (Китай), Yale University (США), Washington University (США), University of Toronto (США), Zhejiang University (Китай), Westfalische Wilhelms-Universitat Munster (Германия), Vanderbilt University (США), Weizmann Institute of Science Israel (Израиль), University of Wisconsin-Madison (США)	РАН, МГУ, ИБХ РАН им. академиков М. М. Шемякина и Ю. А. Овчинникова, Сколтех, Сеченовский университет, Институт цитологии РАН, МФТИ, СПбГУ, НГУ
59	Анализ микроорганизмов-термофилов	Central South University (Китай), NC State University (США), Universidade de Vigo (Испания), Oak Ridge National Laboratory (США), Chinese Academy of Sciences (Китай), Indian Institute of Technology Banaras Hindu University (Индия), Huazhong Agricultural University (Китай), University of Tehran (Иран), Kobenhavns Universitet (Дания), Arizona State University (США)	МГУ, Институт микробиологии им. С. Н. Виноградского, Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН, Институт цитологии и генетики СО РАН, ФИЦ «Фундаментальных основ биотехнологий» РАН, Лимнологический институт СО РАН, Институт биоорганической химии им. академиков М. М. Шемякина и Ю. А. Овчинникова, ИГУ

№	Научно-технологические фронтиры	В мире	В России
60	Редактирование микроорганизмов для биоремедиации	Chinese Academy of Sciences (Китай), Collaborative Innovation Center of Chemical Science and Engineering (Китай), Jiangnan University (Китай), Massachusetts Institute of Technology (США), Technical University of Denmark (Дания), NC State University (Китай), CSIC — Centro Nacional de Biotecnología (CNB) (Испания), Huazhong Agricultural University (Китай), Qingdao Institute of Bioenergy and Bioprocess Technology (Китай), Institute of Plant Physiology and Ecology (Китай)	МГУ, Всероссийский НИИ сельскохозяйственной биотехнологии, Институт молекулярной биологии им. В. А. Энгельгардта РАН, Институт биохимии и генетики УФИЦ РАН, БРЦ ВКПМ НИЦ «Курчатовский институт», РХТУ им. Менделеева, Сколтех
61	Трансформация бактериальной клетки	Chinese Academy of Sciences (Китай), Ministry of Education China (Китай), CNRS Centre National de la Recherche Scientifique (Франция), University of Chinese Academy of Sciences (Китай), Ministry of Agriculture of the People's Republic of China (Китай), Consejo Superior de Investigaciones Científicas (Испания), Zhejiang University (Китай), Chinese Academy of Agricultural Sciences (Китай), Nanjing Agricultural University (Китай), Tsinghua University (Китай)	РАН, МГУ, СО РАН, Институт биохимии и физиологии микроорганизмов им. Г. К. Скрыбина РАН, Институт биорганической химии им. академиков М. М. Шемякина и Ю. А. Овчинникова, КФУ, ДВО РАН, Институт общей генетики им. Н. И. Вавилова РАН, СПбГУ, РАМН
62	Определение экологических ролей симбиотических микроорганизмов	Chinese Academy of Sciences (Китай), CNRS Centre National de la Recherche Scientifique (Франция), Ministry of Education China (Китай), Consejo Superior de Investigaciones Científicas (Испания), University of Chinese Academy of Sciences (Китай), Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (Аргентина), Universidade de São Paulo (Бразилия), Sorbonne Université (Франция), Wageningen University & Research (Нидерланды), Københavns Universitet (Дания)	РАН, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной биотехнологии», МГУ, СПбГУ, СО РАН, Лимнологический институт СО РАН, ФиЦ Биотехнологии РАН, КФУ, ФГБУН «Институт микробиологии им. С. Н. Виноградского» Российской академии наук, Институт биохимии и физиологии микроорганизмов им. Г. К. Скрыбина РАН
63	Генетические библиотеки	National Institutes of Health NIH (США), Harvard Medical School (США), Chinese Academy of Sciences (Китай), CNRS Centre National de la Recherche Scientifique (Франция), Howard Hughes Medical Institute (США), Ministry of Education China (Китай), Massachusetts Institute of Technology (США), Inserm (Франция), The University of Tokyo (Япония), University of California, San Francisco (США)	РАН, МГУ, СПбГУ, НГУ, Институт биорганической химии им. академиков М. М. Шемякина и Ю. А. Овчинникова, СО РАН, Институт молекулярной биологии им. В. А. Энгельгардта РАН, КФУ, Институт общей генетики им. Н. И. Вавилова РАН, Российский национальный исследовательский медицинский университет им. Н. И. Пирогова
64	Цифровое моделирование в биодизайне	Capital Normal University (Китай), Yale University (США), Tsinghua University (Китай), Politecnico di Milano (Италия), Urban Environmental Processes and Digital Modeling Laboratory (Китай), Technical University of Munich (Германия), Sapienza Università di Roma (Италия), University of Chemistry and Technology (Чехия), Southeast University (Китай), Korea Advanced Institute of Science and Technology (Южная Корея)	Институт математических проблем биологии РАН, СПбПУ, НИУ МГСУ, МГТУ им. Баумана, МФТИ, РХТУ им. Менделеева
65	Оцифровка сознания и Wetware для переноса сознания	University of Oxford (Великобритания), University of Toronto (Канада), University College London (Великобритания), Monash University (Австралия), University of Melbourne (Австралия), The University of Sydney (Австралия), Helsingin Yliopisto (Финляндия), University of Michigan, Ann Arbor (США), The University of British Columbia (Канада), Aarhus Universitet (Дания)	РАН, СПбГУ, МГУ, КФУ, НИУ ВШЭ, СПбПУ

№	Научно-технологические фронтиры	В мире	В России
66	Химерные животные	Harvard Medical School (США), National Institutes of Health NIH (США), Chinese Academy of Sciences (Китай), Inserm (Франция), Ministry of Education China (Китай), CNRS Centre National de la Recherche Scientifique (Франция), University of Pennsylvania (США), University of California, San Diego (США), University of Pennsylvania Perelman School of Medicine (США), University of Melbourne (Австралия)	РАН, МГУ, Институт биоорганической химии им. академиков М. М. Шемякина и Ю. А. Овчинникова, СО РАН, Первый Московский государственный медицинский университет им. И. М. Сеченова, НГУ, Министерство здравоохранения Российской Федерации, Институт молекулярной биологии им. В. А. Энгельгардта РАН, СПбГУ, Институт химической биологии и фундаментальной медицины СО РАН
67	Хранение информации с помощью микроорганизмов (с 2010 г.)	University of California, Berkeley (США), Imperial College London (Великобритания), The University of Edinburgh (Великобритания), Harvard University (США), National University of Singapore (Сингапур), Chinese Academy of Sciences (Китай), Bharath Institute of Higher Education and Research (Индия), Osaka Prefecture University (Япония), University of Toronto (Канада), National Research Centre (Египет)	МГУ, ФИЦ «Информатика и управление» РАН, МФТИ
68	Платформы ИИ в биоинжиниринге	Carnegie Mellon University (США), Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (Германия), Shandong University (Китай), Tsinghua University (Китай), University of Chinese Academy of Sciences (Китай), University of Surrey (Великобритания), Wayne State University (США), School of Computer Science and Engineering (Сингапур), RMIT University (Австралия), Technische Universiteit Eindhoven (Нидерланды)	Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН
69	Создание искусственных нуклеиновых кислот	National Institutes of Health NIH (США), Harvard Medical School (США), Chinese Academy of Sciences (Китай), CNRS Centre National de la Recherche Scientifique (Франция), Howard Hughes Medical Institute (США), Massachusetts Institute of Technology (США), Inserm (Франция), The University of Tokyo (Япония), Massachusetts College of Pharmacy and Health Sciences (США), Tsinghua University (Китай)	НИИ биомедицинской химии им. В. Н. Ореховича, МГУ, Институт общей генетики им. Н. И. Вавилова РАН, Институт молекулярной биологии им. В. А. Энгельгардта РАН, Институт химической биологии и фундаментальной медицины СО РАН
70	Создание новых лекарственных платформ	Houston Methodist (США), Fudan University (Китай), Tulane University (США), Universitat Ulm (Германия), Università degli Studi di Torino (Италия), Université de Montpellier (Франция), Zhejiang University School of Medicine (Китай), IMT School for Advanced Studies Lucca (Италия), Wuhan University (Китай), Université de Tunis El Manar (Тунис)	Отсутствуют
71	Химерные микроорганизмы	Harvard Medical School (США), National Institutes of Health NIH (США), Chinese Academy of Sciences (Китай), Inserm (Франция), Ministry of Education China (Китай), CNRS Centre National de la Recherche Scientifique (Франция), University of Chinese Academy of Sciences (Китай), University of California, San Diego (США), University of Pennsylvania Perelman School of Medicine (США), University of Melbourne (Австралия)	Отсутствуют

№	Научно-технологические фронтиры	В мире	В России
72	Персонализированная ветеринарная диагностика (с 2010 г.)	VA Medical Center (США), West Virginia University (США), The University of Tampa (США), Pennsylvania State University (США), Harvard University (США), Texas State University (США), Syracuse University (США), Ontario Veterinary College (Канада), The University of Queensland (Австралия), Massachusetts College of Pharmacy and Health Sciences (США)	Отсутствуют
73	Исследование «темных» РНК для использования в качестве биомаркеров в персонализированной медицине (с 2016 г.)	Westfälische Wilhelms-Universität Münster (Германия), University of Miami Leonard M. Miller School of Medicine (США), St. Laurent Institute (США), Oregon State University (США), Brown University (США), Harvard Medical School (США), Cornell University (США), Fudan University (Китай), Max Planck Institute for Evolutionary Biology (Германия), Istituto Nazionale di Genetica Molecolare (Италия)	НИИ биомедицинской химии им. В. Н. Ореховича, Институт общей генетики им. Н. И. Вавилова РАН
74	Микробиом, метаболомика, метаболомика (с 2017 г.)	Northwest University (Китай), Ministry of Agriculture of the People's Republic of China (Китай), Central South University (Китай), Sorbonne Université (Франция), Wake Forest School of Medicine (США), China Pharmaceutical University (Китай), Guangzhou University of Chinese Medicine (Китай), University of Alberta (Канада), Université d'Ottawa (Канада), University of Luxembourg (Люксембург)	Отсутствуют
75	Синтез новых платформ вакцин	Harvard Medical School (США), National Institutes of Health NIH (США), Chinese Academy of Sciences (Китай), Inserm (Франция), Zhejiang University (Китай), University of Chinese Academy of Sciences (Китай), Shandong University (Китай), Massachusetts Institute of Technology (США), University of Cambridge (Великобритания), Baylor College of Medicine (США)	Отсутствуют

Табл. 6.
Исследовательские центры, лидирующие по объему публикаций по научно-технологическим фронтам синтетической биологии, 2015-2020 гг., по данным Scopus

Разработке доклада предшествовала форсайт-сессия «Фронтиры в новых науках», организованная Фондом «Центр стратегических разработок «Северо-Запад» совместно с Фондом поддержки инноваций и молодежных инициатив Санкт-Петербурга при поддержке Правительства Санкт-Петербурга и Минобрнауки России.

Дата проведения: 9-10 ноября 2021 г.

Формат: конференция и совместная работа в группах по направлениям

Направления: новая химия, синтетическая биология, искусственный интеллект в промышленности, «зеленый переход» в промышленности и городах

Участники: 168 участников, представляющие российские вузы из 19 субъектов РФ

Результаты по каждому из направлений:

- определены тренды развития тематик научных исследований в фокусе до 2030 и 2050 гг.;
- определены наиболее актуальные темы для проведения высокорисковых исследований BlueSkyResearch;
- спроектированы программы подготовки ключевых исследователей школы PI



ISBN 978-5-9909736-6-4



9 785990 973664

Проект доклада от 18.05.2022



ПРАВИТЕЛЬСТВО
САНКТ-ПЕТЕРБУРГА



ФОНД ИНИЦИАТИВ
САНКТ-ПЕТЕРБУРГА