НАУКА ЗА РУБЕЖОМ

Сентябрь, 2020 (№ 92)

БИОРЕВОЛЮЦИЯ:
ТРАНСФОРМИРУЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ

Наука за рубежом

№ 92, сентябрь 2020

Ежемесячное аналитическое обозрение
Издается с 2011 г., индексируется в РИНЦ
Электронное издание:

www.issras.ru/global_science_review

DOI: <https://dx.doi.org/10.37437/2222517X-2020-92-7-1-61>

Редакционная коллегия:

Л. К. Пипия (руководитель проекта), В. С. Дорогокупец,
О. Е. Осипова, Н. В. Шашкова, В. А. Хохлова

**Рубрика «Биотехнологии и генетика. Сельское хозяйство,
пищевая и химическая промышленность»**

Авторы выпуска: **Л. К. Пипия, В. С. Дорогокупец**

Перевод: **В. С. Дорогокупец**

Выпускающее подразделение: **Сектор анализа зарубежной науки**

Редактор О. Е. Осипова

Компьютерная верстка: Н. В. Шашкова

Художник А. Н. Горностаева

Размещение в сети Интернет: К. В. Никитин, Н. В. Шашкова

СОДЕРЖАНИЕ

1. Применение новых биотехнологий в здравоохранении	4
2. Сельское хозяйство, аквакультура и пищевые продукты	16
3. Потребительские товары и услуги	23
4. Материалы, химикаты и энергия	30
5. Устойчивое развитие	36
6. Интерфейсы биомашин	43
7. Биовычисления	47
ПРИЛОЖЕНИЕ	50
Рис. 1. Новая волна инноваций в здравоохранении	50
Рис. 2. Прогнозируемый прямой экономический эффект от применения биотехнологий в области здравоохранения: 2030–2040	51
Рис. 3. Прогноз ежегодного эффекта применения биотехнологий для профилактики, диагностики и лечения заболеваний: 2030–2040	52
Рис. 4. Прогноз годового прямого экономического эффекта на рынке потребительских товаров: 2030–2040	53
Рис. 5. Примеры использования нейропротезирования	54
Табл. 1. Оценка сроков внедрения биотехнологий в сфере здоровья и работоспособности человека	55
Табл. 2. Оценка сроков внедрения биотехнологий в сфере сельского хозяйства, аквакультуры и пищевой промышленности	56
Табл. 3. Оценка сроков выведения биотехнологий на потребительский рынок	57
Табл. 4. Оценка сроков внедрения биотехнологий в сфере материалов, химической продукции и энергии	58
Табл. 5. Оценка сроков внедрения биотехнологий в сфере биомашинных интерфейсов	59

В этом выпуске мы продолжаем обзор доклада «Биореволюция. Инновации, изменяющие экономику, общество и наши жизни», подготовленного экспертами McKinsey Global Institute в мае текущего года. Биореволюция разворачивается прежде всего по четырем основным направлениям: биомолекулы, биосистемы, интерфейсы биомашин и биовычисления. В обзоре приводятся конкретные возможности использования результатов биологических исследований и рассматриваются сферы применения достижений биологической науки в ключевых областях экономики, таких как здравоохранение, сельское хозяйство, производство потребительских товаров, энергетика и окружающая среда. Новые биотехнологии по-разному принимаются обществом, характеризуются различной степенью экономической целесообразности и имеют разные оценки объема потенциального воздействия на рынок. Примеры использования биотехнологий, приведенные в обзоре, не являются исчерпывающими. Вполне вероятно, что в ближайшие годы появится множество других новинок, разработанных учеными, а отдельные инновации повлекут за собой целую цепочку взаимосвязанных нововведений. Предоставляя широкий спектр потенциальных возможностей, биотехнологические инновации вместе с тем приносят новые риски и проблемы, о которых всегда следует помнить, принимая решение об использовании новых биотехнологических процессов и запуская производство новых биопродуктов.

1. Применение новых биотехнологий в здравоохранении

Спектр технологий, используемых в настоящее время в здравоохранении, неуклонно расширяется. Первая волна фармацевтических инноваций принесла средства, которые улучшили традиционные методы лечения, в частности были разработаны малые молекулы, нерекombинантные вакцины и натуральные экстракты [1]. Вторая волна связана с использованием белковых биологических препаратов, таких как пептиды и моноклональные антитела. В настоящее время идет третья волна, открывающая новые виды терапии – клеточную, генную и РНК-терапию (рис. 1). Следует также отметить прорыв в области интерфейсов биомашин, которые помогают улучшить здоровье людей и их работоспособность, о чем речь пойдет ниже.

Предполагаемые темпы внедрения новых биотехнологий несомненно будут варьироваться (табл. 1). Сроки внедрения и возможность использования всего спектра генной терапии во многом зависят от снижения расходов благодаря конкурентной борьбе или новым моделям

финансирования. В целом вероятно, что генная терапия моногенных заболеваний будет применяться раньше, чем полигенных, более сложных заболеваний. Но и среди полигенных заболеваний пути внедрения инновационного лечения в общую практику заметно разнятся. Клеточная терапия CAR-T, разработанная для лечения некоторых видов рака, уже обнаружила признаки коммерческой жизнеспособности и получила одобрительные отзывы специалистов. В то же время исследования в области основных нейродегенеративных заболеваний находятся на ранней стадии, и эффективные методы лечения еще не обнаружены.

Согласно оценкам специалистов, в ближайшие два десятилетия использование биомолекул и инновационных разработок в области биосистем потенциально оценивается от 500 млрд до 1,2 трлн долл. США во всем мире, что составляет 33% общего прямого экономического эффекта. Подобный результат связан с улучшением состояния здоровья и производительности труда, которые напрямую коррелируют со снижением заболеваемости (рис. 2). Наибольшее влияние на жизнь людей в краткосрочной перспективе, вероятно, окажут технологии, обеспечивающие персонализированный подход и точность диагностики, поскольку соответствующие разработки уже практически готовы. Прецизионная (персонифицированная) медицина в терапии стволовыми клетками, например, развивается с 1980-х гг. Немаловажным фактором для здравоохранения является возможность ускорить проводимые исследования (например, создаются библиотеки, хранящие информацию о генах и связанных с ними заболеваниях). Биологические разработки в сфере здравоохранения потенциально могут повлиять на любую болезнь. Обширные исследования ведутся не только в области геномики, которая на сегодняшний день лидирует, но и в других областях, таких как эпигеномика и протеомика. Изыскиваются новые способы профилактики, диагностики и лечения заболеваний и смягчения проблем со здоровьем, вызванных старением. По мере того как ученые получают более детальное понимание молекулярных путей развития болезни, появляется надежда, что в перспективе полный спектр омиков будет применяться уже во всех клинических областях. Наступает новая эра регенеративной медицины и новых подходов к проблемам, связанным со старением.

В фокусе внимания международного сообщества находятся четыре основных направления.

1) Профилактика инфекционных заболеваний

Согласно статистическим данным, 20% всех заболеваний приходится на долю инфекционных болезней. Предпринимаемые меры способствуют уменьшению их распространения.

Генный драйв для снижения трансмиссивных болезней. Согласно оценкам, ежегодно в мире от трансмиссивных инфекционных заболеваний умирает около 700 тыс. человек. До недавнего времени борьба с такими заболеваниями путем изменения генома всей популяции переносчиков считалась сложной задачей, поскольку переносчики размножаются в дикой природе и теряют любые генетические изменения в течение нескольких поколений. Однако с появлением метода CRISPR вероятность передачи модифицированных генов потомству приближается к 100%. Это позволит решить проблему профилактики большинства трансмиссивных заболеваний, включая малярию, лихорадку денге, шистосомоз и болезнь Лайма. Уже была проведена работа по генной инженерии комаров, которая могла бы позволить избавиться от паразитов, вызывающих малярию у людей, но до 2014 г. исследователям не удалось найти гарантии того, что соответствующие гены быстро распространятся в дикой популяции. На данный момент перспективные генные драйвы еще не созданы, а те, что разработаны, влекут за собой значительные риски¹. Американские ученые из Национальной академии наук предупреждают о значительных пробелах в знаниях об экологических и эволюционных эффектах генных драйвов.

Секвенирование ДНК в целях исследования патогенов и выявления вспышек заболеваний. Диагностика на основе геномики позволяет быстро выделить патогенные микроорганизмы и мутировавшие штаммы, что очень ценно в случае пандемий или внезапного появления новых заболеваний, особенно вспышек внутрибольничных инфекций. С момента первого бактериального геномного секвенирования в 1995 г. недорогая технология секвенирования ДНК со сверхвысокой пропускной способностью развилась настолько, что из дорогостоящей процедуры превратилась в рутинную операцию. Помимо эпидемиологических исследований эти методы диагностики способны выявить антимикробную восприимчивость патогенов и, следовательно, помочь врачам

¹ О рисках и опасностях применения генного драйва см.: Биореволюция: риски и возможности // Наука за рубежом. 2020. Август (№ 91).

быстро ввести нужные антимикробные препараты. Прямая ежегодная экономическая выгода от секвенирования патогенов может составлять от 2 до 4 млрд долл. США. Многие компании, включая Illumina, Thermo Fisher и BGI Genomics, уже предлагают услуги по секвенированию ДНК для исследования патогенов. Кроме того, ДНК-сенсоры, которые могут обнаруживать патогенную ДНК в окружающей среде – в пище, воде и воздухе, – доступны уже с 2002 г., но еще не получили широкого распространения.

В конце 2019 – начале 2020 г. страны столкнулись с угрозой новой инфекции – коронавируса COVID-19. Распространение заболевания отчетливо показало, что угроза носит глобальный характер. Вместе с тем она служит примером очевидного прогресса, достигнутого в области научного понимания и деконструкции подобных патогенов. Китайские ученые секвенировали геном вируса и опубликовали данные в сети Интернет 10 января 2020 г., т. е. через несколько недель после того, как в Ухане было получено первое сообщение о пневмонии, вызванной неизвестным вирусом. Лаборатории по всему миру начали разработки методов диагностики, лечения и вакцинации.

2) Инновации для улучшения здоровья и характеристик будущих поколений

Безусловно, в число первостепенных задач системы здравоохранения входит улучшение здоровья населения, а также качеств, или характеристик, будущих поколений. Уровень развития современной биологии позволяет заявить, что в перспективе данная задача вполне достижима. Но какой ценой? Грань между целями и применяемыми средствами очень тонка и не позволяет отмежеваться от значительных противоречий. Известно, что конечная стратегия профилактики большинства генетических нарушений – выявление и предотвращение их до рождения человека. Здесь кроется огромный потенциал для научных исследований, но в то же время появляются и серьезные этические проблемы. В ближайшие два десятилетия общий объем применения всех омических и молекулярных технологий, используемых при скрининге и вмешательстве в жизнь человека, оценивается примерно в 25–50 млрд долл. США.

В репродуктивной сфере рассматриваются три этапа, где важную роль играют методы скрининга и вмешательства в организм на основе оми-ков: предварительное планирование, зачатие и беременность. На первом этапе скрининг носителей – это генетический тест будущих родителей, планирующих создать семью; тест помогает определить, являются ли они носителями рецессивных заболеваний. Еще не так давно скрининг позволял выявить лишь небольшое число заболеваний.

На втором этапе (зачатии) будущие родители, которые идентифицированы как носители определенных генетических заболеваний, могут прибегнуть к помощи передовых репродуктивных технологий, таких как экстракорпоральное оплодотворение (ЭКО) с отбором и скринингом эмбрионов. А в отдаленном будущем появится возможность даже редактировать эмбрионы, чтобы предотвратить возможные нарушения. В настоящее время ЭКО может быть использовано для скрининга таких заболеваний, как синдром Дауна или муковисцидоз (генетическое заболевание), но в будущем оно позволит исключить риск развития полигенного заболевания, например диабета. Кроме того, уже в настоящее время возможно редактировать эмбрионы с помощью метода CRISPR. Однако применение этого метода является весьма спорным с точки зрения этики. В ноябре 2018 г. заголовки газет пестрили заявлениями китайского ученого, который уверял, что ему удалось отредактировать человеческие эмбрионы, защитив их от ВИЧ. Китайское правительство привлекло ученого к ответственности в 2019 г. за «незаконную медицинскую практику» и приговорило к трем годам тюремного заключения. Изменения характеристик/черт эмбриона, не обусловленных вопросами здоровья, при помощи новых технологий (например, изменение текстуры волос) могут привести к еще более сложным проблемам этики и морали.

На третьем этапе беременности проводится неинвазивное пренатальное тестирование. Оно позволяет со значительной долей вероятности диагностировать хромосомные нарушения, такие как синдром Дауна. В будущем генетический материал нерожденных детей, находящийся в материнской крови, можно будет использовать для диагностики моногенных нарушений.

3) Профилактика, диагностика и лечение заболеваний, включая болезни, связанные со старением

Наибольший экономический эффект в сфере здравоохранения, вероятно, будет получен благодаря профилактике, диагностике и лечению болезней. Данное воздействие измеряется от 500 млрд до 1,2 трлн долл. США в год, при этом учитываются самые разные заболевания (рис. 3). Наибольшую выгоду принесут профилактика, диагностика и лечение рака, инфекционных заболеваний и недомоганий, связанных со старением. Пока еще слишком много неопределенностей в сфере развития технологий и ценовой политике на инновационные лекарства и методы лечения, а следовательно, и в их доступности для пациентов. Особые надежды возлагаются на персонализированную медицину. Риск заболеваний, связанных с определенными генами, теперь можно предсказать, проверив геномику отдельных людей. На основе омиков были разработаны клинические диагностические тесты для сегментирования заболеваний. Одним из примеров является тестирование белка HER2 при раке молочной железы. Некоторые инновационные методы лечения уже были одобрены. Микробиомика – изучение микробов, живущих в организме человека, – важна для диагностов и терапевтов. Многочисленные стартапы, в том числе Kallyope и Dermibiont, рассматривают возможность применения микробиотики при лечении в случае проблем с кожей, желудочно-кишечным трактом и репродуктивной системой.

Моногенные заболевания. По оценкам специалистов, поражение одного гена способно спровоцировать у человека до 10 тыс. болезней. Диагностика и лечение этих заболеваний сегодня ограничены даже в тех случаях, когда ученым и врачам известна точная генетическая причина заболевания. Диагностические тесты для некоторых моногенных расстройств существуют уже давно. Например, анализ крови, подтверждающий наличие серповидноклеточного заболевания, был разработан в 1955 г. Однако быстрая и точная диагностика всех известных моногенных нарушений стала доступной в последние десять лет только благодаря достижениям в области крупномасштабного параллельного секвенирования ДНК. Сегодня уже существуют одобренные генные методы лечения бета-талассемии и спинальной мышечной атрофии, проводятся испытания методов лечения других моногенных заболеваний, включая серповидноклеточную анемию. Среди заболеваний, которые в настоящее время можно лечить с помощью генной терапии, есть ряд болезней крови, например гемофилия, а также редкие заболевания,

такие как наследственная слепота и иммунодефицит. Внедрение инновационных методов лечения должно быть достаточно активным в странах с высоким уровнем дохода, учитывая отсутствие альтернативных методов лечения и разрушительный характер этих заболеваний. Несмотря на ожидаемый высокий уровень внедрения новых биотехнологий, их результативность будет не столь очевидной широкой общественности, поскольку моногенные заболевания относительно редки.

Онкологические заболевания. На долю онкологии приходится 9% всех болезней, а в 2017 г. каждая шестая преждевременная смерть случалась от рака. Генетическая основа рака изучается по меньшей мере два десятилетия; мутации генов BRCA1 и BRCA2, восприимчивых к раку молочной железы (BRCA – Breast Cancer susceptibility genes), были впервые обнаружены в начале 1990-х гг. Сегодня средства, основанные на омиках и молекулярных технологиях, становятся все более эффективными на всех стадиях лечения рака: скрининга, диагностики, определения стадии, классификации, лечения и мониторинга. Общее прямое воздействие ряда технологий, которые изучались, может варьироваться от 400 до 870 млн долл. США в год в глобальном масштабе в ближайшие двадцать лет. На протяжении десятилетий основными методами лечения рака были хирургия, химиотерапия и лучевая терапия. За последние 20 лет применение лекарств, которые нацелены на раковые клетки путем выявления в них определенных молекулярных изменений, стало стандартным методом лечения. В настоящее время разрабатывается целый ряд методов генной и клеточной терапии рака. Клеточная терапия применяется к разным группам клеток в иммунной системе, включая Т-клетки (используется клеточная терапия CAR-T), естественные клетки-киллеры, дендритные клетки и другие лимфоциты во врожденной и адаптивной иммунной системе.

Современные исследования сосредоточены на таких областях, как: генетически модифицированные вирусы, способные убивать раковые клетки; генные драйверы, которые модифицируют функционирование клетки и тем самым убивают раковые клетки; клеточная иммунотерапия, применяющая вакцины против рака, которые повышают способность иммунной системы организма не только находить и убивать раковые клетки, но и предотвращать их образование. Последний подход называется адаптивным переносом клеток. Наиболее клинически развитой среди нескольких

видов адаптивного клеточного переноса является клеточная терапия CAR-T, когда из крови пациента берутся иммунные клетки, модифицируются в лаборатории для более эффективной борьбы с раковыми клетками, а затем вводятся обратно пациенту. Данная клеточная терапия применяется только для определенных типов рака крови, которые не поддаются другим методам лечения. По мере снижения затрат и повышения безопасности этот метод будет использоваться и на ранних стадиях заболевания.

Идентификация биомаркеров облегчает раннюю диагностику и целенаправленную терапию рака с помощью жидких биопсий. В этот подход вкладываются значительные средства, поскольку он позволяет оценить размер опухоли, выбрать правильное лечение, следить за ходом этого лечения и выявлять рецидивы — и все это с помощью простого анализа крови вместо привычных биопсий опухолевой ткани. Наконец, появляются новые методы лечения твердоклеточного рака, включающие целенаправленную терапию, ингибиторы контрольных точек и другие подходы, в том числе с использованием онколитических вирусов. Некоторые компании, например Moderna, разрабатывают индивидуальные терапевтические вакцины против рака. Каждая индивидуальная вакцина кодирует белковые мутации непосредственно для опухоли пациента. Вакцина, введенная пациенту, может помочь его иммунной системе лучше распознать раковые клетки как чужеродные и уничтожить их. Такие технологии образуют фундамент персонализированной медицины, позволяя повышать эффективность лечения и снижать токсичность.

Другие полигенные заболевания. Большинство заболеваний имеют полигенный компонент. Применение омиков и связанных с ними биомолекулярных методов помогает в профилактике, диагностике и лечении сердечно-сосудистых, нейродегенеративных, аутоиммунных, метаболических, репродуктивных и других заболеваний. Эти болезни, как правило, протекают очень тяжело. Полногеномные исследования ассоциаций GWAS² позволяют разобраться в связях между генами и путями развития заболеваний. Оценка риска возникновения полигенного заболевания может установить вероятность возникновения таких заболеваний, как диабет

² Полногеномные исследования ассоциаций GWAS (genome wide association study) – направление генетических исследований, позволяющее выявить связь (ассоциации) между специфическими вариациями генома и фенотипическими признаками.

2-го типа, после чего вмешательство в организм поможет предотвратить развитие болезни.

Биомаркеры на основе омиков могут быть использованы для прогнозирования и мониторинга некоторых заболеваний, в частности глаукомы. Компания Mirvie предлагает сделать анализ крови и измерить экспрессию генов плаценты (количество молекул РНК, транскрибированных из ДНК) в материнской крови для прогнозирования преждевременных родов.

Наконец, понимание путей развития болезни может позволить определить гены, которые помогут в лечении или смягчении симптомов хронических заболеваний. Стартапы, такие как Verve Therapeutics, изучают возможности генной терапии при лечении сердечных заболеваний. Несколько компаний, включая Axiom и Voyager Therapeutics, проводят клинические испытания генной терапии для лечения нейродегенеративных расстройств, таких как болезнь Паркинсона, и метаболических нарушений, например дефицит ферментов. Клеточная терапия CAR-T перспективна в лечении аутоиммунных заболеваний, таких как рассеянный склероз. В настоящее время проводятся контролируемые исследования для выяснения преимуществ полного геномного секвенирования для новорожденных, результаты которого можно включить в медицинскую карту каждого ребенка.

Инфекционная патология. Генетика влияет на инфекционные заболевания по-разному, включая восприимчивость, идентификацию патогенов и лечение. Например, наличие двух пар мутации гена CCR5 придает устойчивость к ВИЧ-инфекции. Геномные данные пациентов могут указывать на повышенный риск инфекционных заболеваний и способствовать раннему их выявлению и профилактике. Что касается идентификации патогенов, то секвенирование следующего поколения, предлагаемое несколькими компаниями, может идентифицировать более 1000 патогенов, включая бактерии, вирусы, грибы и простейшие организмы, при помощи плазмы крови. Результаты анализа можно получить в течение одного дня. Быстрая диагностика способствует целенаправленному лечению и предотвращает неблагоприятные реакции на лекарственные препараты. Секвенирование позволяет выявить устойчивость к антибиотикам и, следовательно, скорректировать лечение.

Наконец, разрабатываются новые методы лечения инфекционных заболеваний, включая, например, генную терапию для лечения ВИЧ, которая в настоящее время проходит клинические испытания. Метод CRISPR может быть использован в качестве антибиотика для уничтожения патогенов непосредственно или через модифицированные фаги (также известные как бактериофаги, т. е. вирусы, которые размножаются внутри бактерий). Терапия siRNA (малые интерферирующие РНК) для лечения вирусных заболеваний находится в стадии клинических испытаний.

Регенеративная медицина. Регенеративная медицина – это отрасль тканевой инженерии и молекулярной биологии. Она занимается заменой, проектированием или регенерацией клеток, тканей или органов человека или животных для восстановления естественной функции. Омики и молекулярные технологии позволили добиться значительных успехов в этой области. Они дают немало надежд на создание лечения (не существующего на сегодняшний день) для пациентов с травмами спинного мозга, тех, кто нуждается в трансплантации органов, или страдающих от целого ряда проблем – от дисфункции органов до облысения. Только в США ежегодно происходит около 18 тыс. травм спинного мозга, и более 360 тыс. человек вынуждены сталкиваться с огромными трудностями, которые вызваны последствиями таких травм.

Ни для кого не секрет, что в мире ощущается острая нехватка органов, необходимых для трансплантации. В США каждые 10 мин в список нуждающихся в пересадке органов добавляется еще одна фамилия. В среднем из-за отсутствия доступных органов умирают 20 человек в день. Во всех этих случаях стволовые клетки или ацеллюлярные матриксы могли бы стимулировать рост или восстановление поврежденных органов, а также смягчить иммунную реакцию на трансплантацию. Наибольшие успехи были достигнуты в использовании стволовых клеток в регенеративной медицине. Стволовые клетки применялись, например, при травмах спинного мозга, облысении и болезни Крона. Хорошо известны методы лечения лейкемии стволовыми клетками при помощи трансплантации костного мозга. Обычные стволовые клетки получали из эмбрионов, но в последнее время появилась возможность генерировать плюрипотентные (способные продуцировать несколько биологических реакций) стволовые клетки из клеток взрослого организма. Большинство методов лечения для замены тканей являются новыми разработками. Были

достигнуты также некоторые успехи в выращивании кожи для больных, пострадавших от ожогов.

Старение. Относительно новая область биомедицинских исследований – геронтология изучает, как молекулярное старение приводит к заболеваниям, и использует эти знания для замедления темпов старения и обращения вспять его последствий, в числе которых геномная нестабильность, истирание теломер (теломерные концы хромосом становятся короче по мере деления клеток, что является признаком старения) и эпигенетические изменения. В то время как геронтология предусматривает ограничение калорий и физические упражнения, различные омики, включая геномику, эпигеномику, транскриптомику и протеомику, также включились в борьбу со старением. Эпигеномика, в частности, стала мощным инструментом отслеживания биомаркеров для измерения процесса старения. В настоящее время разрабатываются и тестируются инновационные методы омолаживающей терапии, такие как стволовые клетки и генная терапия. Стволовые клетки потенциально могут регенерировать и восстанавливать ткани и органы, заменяя поврежденные или мертвые клетки здоровыми. Однако до настоящего времени не было одобрено ни одного подхода, который удлинял бы продолжительность здоровой жизни, способствовал бы восстановлению или поддержанию когнитивных и физических функций организма. Компании Alkahest, Longeveron и Rejuvenate Bio работают над заменой стволовых клеток и органов с целью омоложения. Тем не менее на пути к открытию эффективных методов омолаживающей терапии существует множество препятствий. Одна из главных проблем заключается в том, что исследования продолжительности человеческой жизни и определения клинической конечной точки занимают годы, если не десятилетия. Была начата определенная работа по поиску и проверке «суррогатных конечных точек» старения, которые были бы приемлемы для регулирующих органов; это могут быть тесты мышечной силы или циркулирующие цитокины (небольшие белки, используемые в клеточной сигнализации). Кроме того, омолаживающие процедуры обнаруживают не только преимущества, но и ряд недостатков, с которыми ученые пока не могут справиться. Например, обращение вспять повреждений, вызванных старением, может увеличить риск развития онкологического заболевания.

Целенаправленный уход. Реакция человека на лекарства во многом зависит от его генов. Например, белки в печени изменяют химический состав лекарства, и эти изменения могут сделать лекарства более или менее активными или стать причиной побочных эффектов. Даже небольшие различия в генах этих белков способны оказать большое влияние на безопасность или эффективность препарата. В долгосрочной перспективе врачи могут выбрать лекарства и дозы, наиболее подходящие для каждого человека, используя индивидуальный геномный профиль, подход, который называется фармакогеномика. Особенно важно это при таких заболеваниях, как рак и психические расстройства, лечение которых связано с высокой частотой нежелательных реакций на лекарственные препараты. После утверждения первого фармакогеномного теста в 2004 г. несколько компаний, в частности Color Genomics, Oneome и Genelex, начали предлагать потребителям лабораторные тесты. В дополнение к фармакогеномике анализ на основе микрочипов способен помочь выявить ключевые механизмы в развитии заболевания, резистентности к лечению и риске рецидива, а также позволит скорректировать метод лечения.

4) Применение микрочипов и молекулярных технологий для разработки и биодоступности лекарственных препаратов

Микрочипы и молекулярные технологии могут помочь в идентификации новых молекулярных путей и биодоступности лекарственных препаратов, в перепрофилировании лекарств, а также в создании экспериментальных и прогностических моделей здоровья и болезней человека. Новые технологии должны сыграть значительную роль в сокращении времени и затрат на разработку и тестирование лекарств. «Органы на чипе» – микроконтейнеры, облицованные живыми человеческими клетками, которые воспроизводят архитектуру и функции живых человеческих органов, – являются одним из таких примеров. В сочетании с данными микрочипов и молекулярных технологий эти устройства обладают высокой пропускной способностью и являются альтернативой традиционным испытаниям на животных при разработке лекарств и моделировании заболеваний. Усовершенствованные прогностические модели могут снизить затраты на исследования и разработки более чем на 10%. Они также способны сократить временной разрыв между доклиническими испытаниями и испытаниями на людях.

2. Сельское хозяйство, аквакультура и пищевые продукты

В течение тысяч лет люди выращивали зерновые культуры и разводили скот, используя постоянно совершенствующиеся технологии, инструменты и методы. С самого зарождения сельского хозяйства стала применяться селекция, чтобы улучшать определенные качества растения или животного. Последние биологические достижения опираются на эту долгую историю, предоставляя новые инструменты, которые позволяют перейти к совершенно иным бизнес-моделям и цепочкам создания стоимости, изменить методы производства и получить новые генетические формы.

В 1990-х гг. генная инженерия стала применяться в коммерческих целях для улучшения характеристик растений (таких как урожайность и продуктивность), выходя за рамки традиционной селекции. Исторически сложилось так, что первая волна генно-инженерных культур была названа генетически модифицированными организмами (ГМО) или организмами с чужеродным (трансгенным) генетическим материалом. В настоящее время достижения в области геной инженерии (например, редактирование генов и метод CRISPR) позволили осуществить высокоспецифичные цисгенные изменения (использование генов из растений репродуктивно совместимых) и внутригенные (изменение комбинаций генов и регуляторных секвенирований, принадлежащих растению-реципиенту).

Согласно прогнозам, к 2050 г. население планеты вырастет примерно на 2 млрд человек, притом что уже сейчас 820 млн человек не имеют достаточного количества пищи. В силу этого обстоятельства инновации в сфере сельского хозяйства жизненно важны, чтобы обеспечить все население Земли едой. Однако производство продуктов питания оказывает огромное давление на устойчивость природных ресурсов. Например, разведение животных для производства мяса, яиц и молока обходится с точки зрения экологии недешево. По данным ФАО, этой деятельности сопутствует выброс парниковых газов – 14,5% всего мирового объема.

Биологические науки могли бы помочь решить эти проблемы различными способами, включая селекцию с помощью маркеров, геноую инженерию, применение результатов секвенирования микробиома и модификацию микробиома. Кроме того, существует потенциал в разработке

альтернативных белков и использовании омиков для обеспечения большей безопасности пищевых продуктов. Сроки введения новых биотехнологий в повседневную жизнь будут варьироваться (табл. 2). Генетическое редактирование пищевых продуктов методом CRISPR уже осуществляется, хотя и находится на относительно ранней стадии. На рынок уже поступил новый растительный белок. В США в 2019 г. продажи растительного белка выросли на 14% по сравнению с предыдущим годом, достигнув 1 млрд долл. В то же время объем продаж мяса практически не изменился. Что касается лабораторного мяса, то его выращивание находится на ранней стадии разработки, а производство – сложнее и дороже по сравнению с традиционным способом получения мяса как продукции животноводства.

В сельском хозяйстве и аквакультуре выделяют три области, в которых развиваются биотехнологии: маркерная селекция, генная инженерия и микробиом.

Маркерная селекция

Селекционное разведение животных и растений уже довольно хорошо налажено. Полукарликовый сорт пшеницы был выведен в Мексике в 1940–1950-х гг., и в настоящее время до 99% мировых посевных площадей пшеницы приходится именно на этот сорт. Преимуществ у полукарликового сорта перед обычной пшеницей несколько. Во-первых, стебли короче и прочнее (и менее склонны сгибаться на ветру, оставляя колос на земле, где он портится), во-вторых, зерно созревает быстрее и его можно собирать с помощью тяжелой сельскохозяйственной техники. Позднее были выведены полукарликовые сорта риса, что привело к увеличению урожайности. Компания Bayer разработала гибридный карликовый сорт кукурузы под названием short stature corn, который отличается повышенным содержанием бета-каротина. Традиционная селекция основывается на использовании видимых или измеримых признаков продукта, однако такой метод является дорогостоящим. Теперь на первый план выходит маркерная селекция, идентифицирующая гены с помощью маркеров; этот метод в несколько раз более быстрый, чем селективный способ старого образца. В прошлом выведение новых сортов сельскохозяйственных культур занимало до 25 лет, а маркерная селекция сократила этот срок до семи-десяти лет, одновременно сделав отбор более эффективным, достигая большей точности и снижая затраты. Высокоточные микрочипы позволили обнаружить экспрессию тысяч генов одновременно, а новые поколения технологий секвенирования стали еще более мощными. Современная

маркерная селекция лучше подходит для отбора целевых генотипов и может использоваться в качестве замены фенотипирования; фермерам и ученым больше не нужно ждать, пока растение вырастет, а затем долго наблюдать за ним, прежде чем выбрать целевой ген или несколько генов. Количество линий, которые необходимо протестировать, сокращается, что позволяет более эффективно использовать тепличное или полевое пространство.

Использование генетических маркеров для предварительного скрининга животных на наличие желаемых признаков также зарекомендовало себя как экономически выгодное. На рынке генетики животных одна только компания Neogen в 2017 г. определила генотип более 2 млн животных. Отбор с помощью маркеров широко применяется в экономически развитых странах, но в развивающихся странах он менее популярен.

Генная инженерия

Первым растением, полученным в 1983 г. генно-инженерным способом, был табак. В 1994 г. Управление по контролю качества пищевых продуктов и лекарственных средств одобрило первую генетически модифицированную культуру – томат Flavr Savr, который поступил в продажу в том же году и пользовался большим спросом из-за его замедленного созревания. Спрос на помидоры оставался высоким в течение значительного периода времени, однако продукт не стал прибыльным из-за высоких производственных и сбытовых издержек. Другие генно-инженерные культуры были быстро внедрены во многих странах. Не секрет, что генная инженерия стала самой быстро внедряемой технологией растениеводства в мире. Сегодня генетически модифицированные культуры занимают 12% пахотных земель, более половины из них находятся в развивающихся странах.

Первая волна генно-модифицированных культур сосредоточилась на входных признаках (например, устойчивость к насекомым и гербицидам), которые влияют на сельскохозяйственную практику, например использование химических веществ. В настоящее время больше внимания уделяется инженерным характеристикам самой продукции, например длительный срок хранения. Определенный интерес представляют генетически модифицированные культуры с улучшенными потребительскими качествами, способствующими оздоровлению и поступлению большего количества питательных веществ. Новые технологии, в том числе методы генетического редактирования CRISPR и TALEN, позволяют более

точно редактировать гены растений и животных. Сельскохозяйственные культуры при этом адаптируют к местным условиям, таким как влажность, тип почвы и температура.

Чтобы использовать преимущества новых технологий редактирования генов, ведущие сельскохозяйственные компании сотрудничают с организациями, проводящими научные исследования. В рамках соглашения о сотрудничестве и лицензировании с компанией Monsanto³ компания Pairwise Plants изучает технологию редактирования генов кукурузы, сои, пшеницы, хлопка и рапса. Ожидается, что продукция, модифицированная по методу CRISPR, появится на полках продуктовых магазинов США в ближайшие десять лет. Вероятнее всего, первой появится сладкая клубника с увеличенным сроком хранения. Инновации в отношении сроков хранения более широкого спектра пищевых продуктов могли бы внести значительный вклад в глобальное продовольственное снабжение, учитывая, что примерно треть продовольствия, производимого в мире для потребления человеком каждый год, – примерно 1,3 млрд т – теряется или тратится впустую. Продление срока хранения и уменьшение признаков порчи продукции особенно актуальны для сокращения пищевых отходов в промышленно развитых странах, где более 40% потерь приходится на розничный и потребительский уровни. В развивающихся странах 40% потерь приходится на послеуборочную обработку, хранение и переработку.

Стоит отметить инновации, выходящие за рамки генной инженерии, которые позволяют бороться с болезнями растений и увеличивают срок их хранения. Портативные устройства для секвенирования ДНК и другие достижения в области биосенсорной технологии (такие как CRISPR-Chip) обнаруживают потенциал при диагностике болезней растений самими фермерами, что позволит устранить необходимость массового применения пестицидов. Исследователи, принимающие участие в проекте CRISPR-Chip компании Cardea, утверждают, что потребуются около пяти лет исследований, чтобы найти правильные биомаркеры, создать необходимые чипы и разработать особо прочное устройство, которое можно будет использовать в полевых условиях.

³ Monsanto, многоотраслевая транснациональная компания по разработке и производству ГМО-семян, а также инсектицидов и гербицидов, была приобретена Bayer в 2018 г.

Редактирование генов животных с целью их оздоровления и продуктивности (молочный и мясной скот, свиньи и домашняя птица) все еще находится в зачаточном состоянии. Первые морепродукты с модифицированной производственной системой, например лосось, который растет в два раза быстрее обычного лосося, были одобрены в США в ноябре 2015 г., а в Канаде – на шесть месяцев позже. Однако предложение лосося американским потребителям было отложено из-за вопроса о соответствующей маркировке. Совсем недавно исследователи генетически сконструировали новые признаки устойчивости к распространенным заболеваниям репродуктивной и респираторной систем животных. Аналогичный научный подход использовался и для производства более ароматной говядины. Вспышка африканской чумы свиней в 2019 г. вызвала интерес к новым подходам, способным защитить сельскохозяйственных животных, включая генную инженерию. Однако в ближайшем будущем ответной мерой на заболевания, скорее всего, станет обычная вакцина, а не генетически модифицированный иммунитет. В целом генно-инженерные системы растениеводства и животноводства в следующие 20 лет несут в себе потенциал ежегодного прямого экономического воздействия в размере 130–350 млрд долл. США за счет снижения смертности, повышения производительности, а также качества продукции по вкусовым параметрам и содержанию питательных веществ.

Картирование генов и модификация микробиома

В дополнение к селекции и генной инженерии наиболее полное раскрытие потенциала микроорганизмов – бактерий, грибов и вирусов – становится все более актуальным направлением биологических исследований. Микробиом растений, почвы, животных и воды играет важную роль в сельскохозяйственном производстве. Применение знаний о микробиоме в этой области может внести значительный вклад в повышение устойчивости сельскохозяйственных культур, сокращение потерь от засухи, вредителей и болезней, а также в повышение урожайности. В мире, где климатические риски растут, а продовольственная безопасность остается серьезной проблемой, новые возможности могут оказаться весьма полезными. Основанная в 2014 г. компания Indigo предлагает фермерам перед посадкой обрабатывать семена составом (в виде спрея или порошка) на основе природных микробов, таких как дружественные растениям бактерии или грибы. Компания Novozymes, которая не так давно вышла из состава фармацевтической компании Novo Nordisk,

предлагает генно-инженерные микроорганизмы (среди прочих продуктов) вместо традиционных химикатов для повышения урожайности и качества.

Интерес потребителей к альтернативным источникам белка растет во всем мире вследствие заботы о здоровье, окружающей среде и благополучии животных. Анализ потребительских поисковых запросов в Google показал, что культивируемое мясо и новые поколения растительных заменителей мяса вызывают все больший интерес. В период с 2004 по 2019 г. продажи выросли совокупными годовыми темпами на 19 и 29% соответственно. Не исключено, что к 2030 г. большая часть потребителей будет считать потребление мяса традиционных животных аморальным. Постепенно меняется потребительское отношение к белкам из обычных животных источников. Растительное мясо, доступное сегодня, в первую очередь конкурирует с обычным мясом по своим вкусовым качествам.

Альтернативные белки

В современном мире меняется отношение к типу пищи, которую мы едим. Растет осведомленность потребителей и интерес к мясу растительного происхождения или выращенному в лабораторных условиях. Растительное мясо получают из богатых белком семян, таких как соя, нут и рапс. Вкус и текстура этих заменителей становятся все ближе к животным белкам, производители расширяют свой основной рынок за счет увеличения спектра потребителей от вегетарианцев и веганов до мясоедов. Растительное молоко (продукты без молочных белков) приобрело невероятную популярность в середине 2000-х гг. и теперь составляет около 15% розничных продаж молока в США и 8% в Великобритании. Ключевым препятствием для широкого внедрения альтернативных белков является проблема эффективного с точки зрения затрат производства. Хотя альтернативные белки могут иметь значительный потенциал, этот рынок все еще находится в зачаточном состоянии, составляя, по некоторым оценкам, лишь 2% мирового розничного рынка белков. Массовое внедрение альтернативных белков будет в значительной степени зависеть от их ценовой конкурентоспособности и вкусовых предпочтений потребителей.

Несколько компаний внедряют новые технологии и ингредиенты для производства альтернативных белков. Компании Finless Foods, Mosa Meat, Memphis Meats и Meatable экспериментируют, используя различные под-

ходы, в том числе синтетические молекулы и плюрипотентные (способные производить несколько биологических реакций) стволовые клетки в качестве альтернативы дорогостоящему фактору роста. Цена культивированного мяса уже упала с более чем 300 тыс. долл. за первый выращенный в лаборатории гамбургер в 2013 г. до примерно 11 долл. в 2015 г.

Переход на альтернативные белки может иметь важные экологические последствия. Производство продуктов питания является основным источником антропогенного выброса метана, который, по оценкам, примерно в 85 раз мощнее выбросов CO₂. Согласно крупнейшему на сегодняшний день метаанализу глобальных продовольственных систем, в котором использовались данные более чем 38 тыс. коммерческих ферм в 119 странах, производство растительных продуктов становится причиной гораздо меньшего объема выбросов, чем производство мяса и молочных продуктов. Бургер из растительных белков производит примерно на 97% меньше выбросов парниковых газов, чем традиционная говядина, которая является самым ресурсоемким видом мяса. Кроме того, производство альтернативных белков может значительно сократить использование земли и воды по сравнению с традиционными процессами производства мяса. Землю, используемую для производства мяса, можно было бы сохранить как среду обитания и биоразнообразия. Сохранение среды обитания и лесовосстановление помогут смягчить последствия изменения климата.

Растущее потребление морепродуктов оказывает негативное влияние на морскую среду. Чрезмерный вылов приводит многие виды рыб на грань вымирания, ставя под угрозу морское биоразнообразие и экосистемы. Производство альтернативных белков могло бы помочь восстановить морскую среду, но для этого оно должно осуществляться в гораздо больших масштабах, чем предполагает нынешнее производство.

Генетическое отслеживание происхождения, безопасности и подлинности пищевых продуктов

Безопасность пищевых продуктов – вопрос очень важный. По оценкам ВОЗ, почти каждый десятый человек (600 млн человек) в мире заболевает в результате потребления загрязненной пищи. По этой же причине ежегодно умирает более 400 тыс. человек. Анализ ДНК сырых и обработанных пищевых продуктов может дать представление об их безопасности

и качестве; аллергены, наличие модифицированных генов могут быть идентифицированы с помощью генетических маркеров. Лаборатория FoodChainID, основанная в 1996 г., была одной из первых, где начали использовать технологию штрихкодирования ДНК по всей цепочке создания стоимости, чтобы уменьшить вероятность мошенничества с продуктами питания. Первоначально основное внимание уделялось рыбным продуктам. В лаборатории Clear Labs используют преимущества секвенирования ДНК и других технологий, что сокращает время выполнения тестов на безопасность пищевых продуктов – 24 часа вместо трех-пяти дней. В этой же лаборатории создаются доступные для дальнейшего поиска базы данных по безопасности пищевых продуктов. И не напрасно – потребители все чаще хотят знать, что именно они употребляют в пищу.

3. Потребительские товары и услуги

Растущий объем информации о человеке благодаря омикам открывает новые возможности для персонализации и маркетинга продуктов и услуг, основанных на биологических данных потребителей. Определить скорость внедрения новых биотехнологий довольно трудно, не в последнюю очередь из-за растущей озабоченности вопросами конфиденциальности данных и безопасности потребителей (табл. 3).

Снижение стоимости секвенирования ДНК позволило создать наиболее зрелые технологии, в основе которых лежат знания о геноме и микробиологии. Ранние генетические тесты DTC (direct-to-customer⁴) в США в 2000 г. были сосредоточены на немедицинских целях. Люди стремились получить информацию о своих предках. Генетическое тестирование DTC с целью выявить риски для здоровья стало доступно позже отчасти потому, что возникла необходимость предоставить более убедительные доказательства связи между генетическими данными и состоянием здоровья, как того требовали органы надзора в США. Медицинская ценность тестирования DTC до сих пор не доказана, а посему услуга не получила должного распространения. Еще меньше потребители принимают биотехнологии, основанные на других омиках (таких как персонализированная диета, в фундаменте которой заложена протеомика). В целом, по оценкам специалистов, в следующие 20 лет ежегодный объем прямого воздействия

⁴ Напрямую потребителю.

технологий, основанных на биомолекулах и биосистемах, на потребительские рынки может составить от 200 до 700 млрд долл. США во всем мире, или 16% от общего объема воздействия всех биотехнологий (рис. 4). Этот потенциал базируется на генетическом тестировании DTC и микробиоме с последующей персонализацией продуктов и услуг, таких как передовые пробиотики, необходимые для здоровья кишечника, восстановления нормального веса тела и ухода за кожей.

Инновации в области биомолекул и биосистем применяются в четырех сферах потребительских товаров и услуг: генетическое тестирование DTC, здоровье, красота и личная гигиена, домашние животные и уход за ними.

Генетическое тестирование DTC

Завершение проекта «Геном человека» в 2003 г. вызвало огромный спрос со стороны отдельных людей, которые хотели получить информацию о своей наследственности. Появление в начале 2000-х гг. в США генетического тестирования по запросу потребителя удовлетворило возникший спрос. Доступ людей к информации осуществлялся без участия медицинских работников. Потребители отправляли образец слюны по почте, а затем могли просмотреть результаты на веб-сайте или в мобильном приложении. Ежегодное прямое воздействие генетического тестирования DTC, связанное со здоровьем, оценивается в размере от 50 до 110 млрд долл. США. Однако реализация этого потенциала в значительной степени зависит от того, как потребители и регулирующие органы решат вопросы конфиденциальности данных.

К концу 2018 г. в США более 26 млн человек прошли ДНК-тест для определения своих предков. Перечень услуг расширился, и теперь в лабораториях исследуют потенциальную связь между индивидуальными генетическими особенностями человека и его способностями, предпочтениями, образом жизни, включающим фитнес и питание. Однако некоторые из подобных связей являются слабыми или сомнительными. Современное генетическое тестирование DTC второго поколения ориентировано на выявление генетических предрасположенностей к определенным заболеваниям.

Большинство современных генетических тестов DTC обычно используют метод, основанный на анализе однонуклеотидных полиморфизмов (SNP), который включает в себя использование микрочипа ДНК для обнаружения наличия или отсутствия специфических вариаций во всех

генах⁵. При анализе SNP обычно секвенируется менее 1% генома человека. Однако более полное секвенирование генома становится все более популярным, поскольку его стоимость снижается благодаря техническому прогрессу. Секвенирование ДНК может стать пожизненным ресурсом, позволяющим потребителям все больше узнавать о себе по мере развития соответствующей науки.

По сравнению с США в Китае рынок генетического тестирования DTC еще только зарождается. В 2009 г. появилась программа Шанхайской корпорации биочипов, которая, основываясь на генетическом тестировании детей, прогнозирует такие черты характера, как эмоциональный контроль, сосредоточенность, память, а также спортивные способности. Крупнейший поставщик услуг генетического тестирования для китайских потребителей 23MoFang протестировал лишь около 500 тыс. потребителей из 1,4 млрд жителей по состоянию на осень 2019 г. Поскольку стоимость секвенирования ДНК упала, тесты стали более доступными для средней китайской семьи, что привело на этот рынок более 100 компаний за последние пять лет. Среди них – шэньжэньский WeGene и пекинский Novogene. Компании адаптируют свои предложения для восточноазиатских потребителей. Данные генома открывают новые возможности для персонализации на потребительских рынках. Полный спектр научно обоснованных возможностей еще неясен, но некоторые компании уже начали экспериментировать с персонализированными онлайн-свиданиями, услугами питания, индивидуальным фитнесом и другими технологиями, использование которых основано на личных биологических данных.

Здоровье

Здоровье потребителей – важная область применения биологии. Регулярно обновляемая информация о микробиомах кишечника и кожи, а также других молекулах, соответствующих различным клеточным функциям, может служить руководством для образа жизни потребителей. Биохакеры активно тестируют редактирование генов для увеличения мышечной массы, и не исключено, что услуга появится на рынке

⁵ Однонуклеотидный полиморфизм (англ. Single nucleotide polymorphism, SNP) – это замена одного нуклеотида в молекуле ДНК в геноме особей одной породы (вида) или между гомологичными участками гомологичных хромосом. Однонуклеотидный полиморфизм широко используется в качестве молекулярно-генетических маркеров наследственных аномалий, продуктивности, устойчивости к болезням и т. д. (источник: www.science-education.ru).

примерно через десять лет. Признавая, что генетические данные сами по себе рассказывают только часть истории о биологии потребителей, некоторые исследователи ориентируются на комплексные подходы.

Ученые продвинулись в понимании того, как микробиом влияет на здоровье человека, причем большая часть подобного влияния осуществляется через диету. Тестирование нарушений микробиома находится на самой ранней стадии развития. Потребители собирают образец кала и отправляют его по почте для тестирования. В будущем генетическую информацию о микробах можно будет получить из слюны, и для этого будет достаточно взять мазок с внутренней стороны щеки. Израильская компания DayTwo, проводя анализ микробиома и анализ крови, предоставляет больным диабетом людям информацию о питании через специальное приложение, предназначенное для поддержания нормального уровня сахара в крови.

Еще одно интересное направление – новые пробиотики и витаминные добавки, адаптированные к нуждам человека на основе изучения его микробиома, а не анкет об образе жизни. Компании ProTrea, Thryve и SunGenomics предлагают персонализированные пробиотики. В ближайшие несколько десятилетий появится возможность измерять и анализировать еще более широкий спектр биологической информации экономически эффективным и удобным способом. Современные портативные устройства обычно носят на запястье. Не исключено, что их заменят наклейки на кожу или даже сенсоры, которые нужно проглотить. Датчики кожи работают путем измерения потливости, летучих органических соединений, микробов или частиц в окружающей среде. Компания LogicInk разрабатывает датчики кожи, которые сигнализируют об изменении биомаркеров, связанных с гидратацией и алкоголем в крови. Проглатываемые датчики представляют собой электронное устройство размером с таблетку, которое может передавать видеоданные и информацию о кислотности, температуре, давлении и восприимчивости к лекарствам на смартфон.

Красота и личная гигиена

Генная терапия, которая проводится не для медицинских целей, получает лишь небольшое государственное финансирование, поскольку в качестве приоритетного направления руководителями государств и учеными избрано лечение заболеваний. Однако если частные компании,

развивающие рынок красоты и личной гигиены, будут инвестировать в эту область исследований, то не исключено, что генная терапия появится на рынке косметических услуг до 2050 г. Известные косметологические компании проводят научные исследования (иногда совместно с медиками), касающиеся роли геномики и микробиомики в инновационных антивозрастных продуктах по уходу за кожей. Некоторые открытия становятся побочным продуктом исследований в других областях. Например, препарат Латиссе был создан для лечения катаракты, а в качестве побочного эффекта отмечался рост ресниц. В результате это средство стало применяться в косметологии для улучшения состояния ресниц.

Исследования микробиома кожи продолжаются. В микробиоме кожи насчитываются примерно 1000 видов бактерий, которые могут не только влиять на здоровье и внешний вид кожи, но и способствовать развитию распространенных кожных заболеваний, таких как акне и экзема, а также вызывать старение кожи. Компания Aobiome Mother Dirt разрабатывает средства общей и личной гигиены с живыми окисляющими аммиак бактериями, которые чаще всего встречаются в грязи и необработанной воде. Бактерии перерабатывают раздражающие компоненты пота (аммиак и мочевину) и превращают их в побочные продукты, которые приносят пользу коже. Активное использование мыла, дезодорантов и других средств личной гигиены значительно сократило популяцию нужных бактерий. Восстановление этих бактерий может устранить неприятный запах тела или раздражение кожи, сократить потребность в частом использовании душа и химических веществ, а также помочь в уходе за ранами. Производители устоявшихся брендов, таких как La Mer, переходят на пробиотики (для которых нет стандартизированного определения). Однако в отличие от микробиомных продуктов, выпускаемых Mother Dirt, подавляющее большинство предлагаемых сегодня пробиотиков не содержат живых микроорганизмов, которые требуют хранения в холодильнике.

Продолжаются также исследования взаимосвязи микробиома кишечника с кожей, называемой осью кишечник – кожа. Кишечник может взаимодействовать с кожей несколькими способами, например через поглощение питательных веществ, непосредственно воздействующих на кожу, или тех, которые могут стимулировать гормональные изменения, влияющие на кожу. Тест микробиома кишечника Viome, например, устанавливает связи между кишечными бактериями и кожными заболеваниями,

такими как акне и экзема, стирая грань между потребительскими рынками и здравоохранением. Сингапурская компания Imagene Lab, занимающаяся генетическими исследованиями и разработками, предлагает персонализированную сыворотку на основе результатов тестов ДНК кожи, которые учитывают такие факторы, как преждевременное разрушение коллагена.

Исследователи не обошли стороной вопросы, связанные с гигиеной полости рта и косметическими процедурами, основанными на микробиоме полости рта. Например, пробиотики, полученные из зубного налета здоровых людей, вступают в резкий конфликт с кариесогенными бактериями (бактериями полости рта, вызывающими кариес). Однако поскольку стоимость проведения клинических исследований слишком высока, а кариес не представляет собой серьезную угрозу для жизни человека, новым биотехнологиям непросто пробиться на потребительский рынок. Пробиотики для ухода за полостью рта ценны не только с медицинской точки зрения, но и с точки зрения косметологии. Например, недавнее клиническое исследование показало, что жидкость для полоскания рта, содержащая три природных бактериальных штамма, продуцирующих перекись водорода, обладает статистически значимым отбеливающим эффектом.

Поиск генетических средств для лечения выпадения волос и предотвращения образования морщин на коже является целью многочисленных компаний, производящих продукцию по уходу за стареющей кожей. Наиболее распространенной формой генетического выпадения волос является андрогенетическая алопеция, которая к 50 годам поражает около половины мужчин и одну четверть женщин. Благодаря генной терапии луковицы волоса с DHT-чувствительными клетками можно изменить, превратив в фолликулы с DHT-резистентными клетками, и из луковиц продолжат расти волосы в течение всей жизни. Однако генная терапия для косметических целей, таких как предотвращение старения кожи и выпадения волос, вряд ли будет иметь значительный экономический потенциал в ближайшие десятилетия. Эти достижения пока неприменимы к людям, и остается неясным, могут ли эти разработки быть коммерчески жизнеспособными, так как последствия их применения остаются неопределенными.

Домашние животные и уход за ними

Существуют предпосылки к применению генетического и микробио-

логического тестирования, а также персонализированного питания и точной медицины для домашних животных. Успехи в этой области могут представлять интерес, учитывая, что глобальный рынок ухода за домашними животными предположительно будет оцениваться в 60–100 млрд долл. США к 2025 г. Сейчас генетическое и микробиологическое тестирование DTC становится возможным для владельцев домашних животных. В 2005 г., т. е. менее чем через три года после того, как был секвенирован геном человека, исследователи опубликовали карту генома собаки, используя ДНК боксера. Сегодня такие компании, как Wisdom Panel (подразделение Mars Petcare), Embark Veterinary и Basepaws, предлагают домашние тесты ДНК для кошек и собак, которые дают представление о происхождении, породе, предрасположенности к заболеваниям и чертах характера.

Развивается прецизионная ветеринарная медицина. Например, одна медицинская компания в настоящее время проводит секвенирование раковых опухолей собак и рекомендует целевую терапию, обычно используемую для лечения людей. Компания AnimalBiome предлагает тесты микробиома, добавки, а также капсулы для трансплантации фекального микробиома, чтобы восстановить отсутствующие полезные бактерии и здоровье кишечника домашнего животного. В целом, по оценкам, прямые ежегодные затраты на инновации в сфере ухода за домашними животными в ближайшие 10–20 лет составят от 60 до 102 млрд долл. США.

Под брендом GloFish, охватывающим 15% рынка США по продаже рыб, с 2004 г. продаются генетически модифицированные флуоресцирующие аквариумные рыбки. Генная инженерия потенциально может осуществить скрещивание пород (например, голдендудель – помесь ретривера и пуделя), а также решить проблемы здоровья домашних животных, например связанных с аллергией. Генная терапия поможет улучшить состояние здоровья, исправляя генетическую предрасположенность некоторых пород к таким заболеваниям, как дисплазия тазобедренного сустава у золотистых ретриверов и лабрадоров, а также болезни сердца у датских догов. В некоторых случаях этот метод лечения может также улучшить работоспособность животных. Например, в Аргентине ученые уже использовали метод CRISPR для перезаписи последовательности гена миостатина, который имеет решающее значение для развития мышц у клонированных

поло-пони, наиболее часто клонируемого животного в мире. Клонирование домашних животных было доступно в течение многих лет в Южной Корее и США, однако занимавшиеся этим компании ViaGen Pets и Sooam не нашли своей ниши на рынке. Пекинская коммерческая компания по клонированию домашних животных Sinogene уже много лет занимается клонированием собак, а с 2019 г. начала клонировать кошек.

4. Материалы, химикаты и энергия

Подобно тому как изобретение пластмассы в 1940–1950-х гг. преобразило мир, последние достижения в области биологических материалов, химикатов и энергетики способны изменить не только многие отрасли промышленности, но и нашу повседневную жизнь. Однако потребуется время, чтобы осознать произошедшие перемены. Хотя многие технологии могут достаточно быстро выйти на рынок (в ближайшие десять лет), большинству из них тем не менее в грядущие несколько десятилетий не удастся достигнуть своего звездного часа (табл. 4).

Лаборатории по всему миру в настоящее время используют генетически модифицированные микробы для улучшения процессов ферментации, разработки новых процессов и даже производства новых материалов, обладающих уникальными свойствами, такими как способность тканей к самовосстановлению. Биотехнологии могут позволить генетически отслеживать происхождение тканей и определять их подлинность. Производство биотоплива, а также новые формы хранения энергии находятся в стадии разработки. Однако, за редкими исключениями, масштаб исследований не оправдал ожиданий. Научные работы приводят теоретические доказательства возможности хранить энергию, но на рынок новейшие технологии еще не поступили.

Многие специалисты весьма сдержанны в определении сроков коммерциализации обещанных инноваций по ряду причин. Во-первых, масштабное применение новых технологий в области материалов, химических веществ и энергетики исторически всегда осуществлялось со значительными трудностями. Стоимость зачастую является критическим фактором, поскольку цена инновационного продукта оказывается дороже, чем традиционной продукции, с которой они должны конкурировать,

включая пластмассы и природный газ, имеющие хорошо отлаженные цепочки поставок. Например, биотопливо обещало стать жизнеспособной альтернативой нефти, но оно еще не заменило традиционное топливо. Инновации в процессах производства материалов происходят медленно из-за высоких постоянных затрат. Приходится признать, что биотехнологии остаются более дорогими, чем производство продукции на основе нефти, например, биотопливо, получаемое путем ферментации. Хотя производство углеводородного топлива из биомассы технически возможно, снижение производственных затрат до коммерчески приемлемого уровня остается сложной задачей. Таким образом, даже если наука не стоит на месте, возникают проблемы с формированием убедительного предложения для клиентов.

В области материалов и химикатов следует выделить три направления: совершенствование уже применяемых процессов ферментации, разработка новых биопутей для производства существующих материалов и химикатов и производство новых материалов и химикатов. Достижения в области материалов и химикатов повлияют на развитие многих отраслей, таких как фармацевтика, строительство, производство пластмассы, парфюмерии, тканей.

Совершенствование процессов ферментации

Первым направлением потенциального воздействия является дальнейшая оптимизация производства товаров, создающихся путем ферментации. Известные во всем мире многие крупные компании, включая Corbion, DSM и Novozymes, делают значительные инвестиции в дальнейшее совершенствование своих технологических платформ, а также возможностей. Кроме того, за последнее десятилетие появился ряд новых биотехнологических компаний, предлагающих улучшенные биологические возможности более быстрой ферментации.

Новые биопуты для существующих материалов и химикатов

Еще одним динамично развивающимся направлением являются новые биопуты, в основном использующие методы ферментации для производства продуктов, которые трудно или дорого синтезировать химическим путем или извлекать из природных ресурсов. Одной из перспективных отраслей, вызывающих значительный интерес, является текстильная

промышленность. В последние годы были разработаны способы получения альтернативных нейлоновых, шелковых, хлопчатобумажных тканей и красителей для них биологическим путем. По мере того как растет эффективность этих методов производства материалов и химикатов, в других сегментах рынка (химикаты и фармакологические препараты, строительство и косметология) с преобладанием традиционных методов природной экстракции или химических реакций появляются новые биопуты. Для многих из этих отраслей использование новых биотехнологий привлекательно не только с точки зрения эффективности, но и для устойчивого развития. Рассмотрим нейлон, который традиционно изготавливался из нефтехимических компонентов. Недавно на рынке появился новый путь производства нейлона с использованием микроорганизмов. Например, капролактам, ключевой ингредиент в создании 100%-ного устойчивого нейлона, производится биологическими средствами. Mango Materials использует отработанный метан для производства PHA – полимера, который затем прядется в нить. Bolt Threads в сотрудничестве с The North Face в 2015 г. разработала парку из искусственного паучьего шелка. Парка так и не появилась на рынке, но четыре года спустя компании создали ткань из синтетических ферментированных белков. Эти методы могут нанести непоправимый ущерб существующему производству, которое сегодня оценивается более чем в 200 млрд долл. США.

Точно так же промышленное производство косметики выиграет от перехода на новые биопуты. Одним из ярких примеров является биологическое производство сквалена, который традиционно получают из неустойчивых источников, включая побочные продукты переработки нефти и печень акул. Amyris Biossance торгует заменителем из сахарного тростника, который используется для производства высококачественных, высокоэффективных косметических продуктов.

Производство новых материалов и химикатов

Биопуты используются для создания совершенно новых материалов и химических веществ с превосходными свойствами, такими как особая прочность и долговечность, а также способность к самовосстановлению. В апреле 2019 г. компания Zymergen объявила о партнерстве с компанией Sumitomo Chemical, целью которого является разработка биопутей для создания новых строительных блоков следующего поколения. Компании объявили, что их совместная работа ориентирована на такие области

применения, как оптические пленки для дисплеев, твердые покрытия, которые нельзя поцарапать, гибкие электронные схемы и клеевые материалы.

В настоящее время ведется разработка материалов для сельского хозяйства, которые используют биопуты для производства улучшенных удобрений и пестицидов. Например, методы глушения генов RNAi разрабатываются для создания нового вида пестицидов. Экспрессия гена, критически важного для жизнедеятельности насекомых, ингибируется специфической РНК путем распыления или перорально. Первый инсектицид RNAi был одобрен для коммерческого использования в 2017 г.

Некоторые изменения происходят в производстве биотоплива, добыче сырья и хранении энергии. Потенциал биологического топлива, представляющий альтернативу традиционному ископаемому топливу, помогает удовлетворить растущий спрос на энергию и решить глобальные проблемы, связанные с выбросами CO₂ и изменением климата.

Виды биотоплива

Биотопливо первого поколения, в частности биоэтанол для транспортировки, производимый из сахаров и крахмала, существует уже несколько десятилетий. Этанол был получен с помощью ферментации углеводов сахаро- или крахмалосодержащих растений, таких как кукуруза или сахарный тростник. Спрос на биоэтанол неуклонно растет, и это подогревает интерес к совершенствованию технологий на основе достижений в области биологии. В современной биотопливной промышленности ряд нововведений может в конечном итоге оказать влияние на транспортную отрасль. Некоторые компании используют генетически модифицированные микробы в процессе создания топлива для авиационной и морской промышленности. Базирующаяся в Соединенных Штатах компания Gevo, специализирующаяся в области биохимии и биотоплива, разработала авиационное топливо, которое синтезирует углеводороды для создания возобновляемого реактивного топлива. Она также работает над процессом ферментации для получения изобутанола из ферментируемого сахара на основе кукурузы. Компания Algenol Biofuels продемонстрировала способность производить этанол, используя генно-модифицированные водоросли. Норвежская круизная и паромная компания Hurtigruten пла-

нирует обеспечивать свои суда энергией за счет переработки отходов рыбной и животноводческой промышленности.

Многие из означенных технологий находятся еще на стадии развития. Биоинновации требуют больших первоначальных капиталовложений, им трудно достичь достаточного масштаба производства, чтобы добиться экономической прибыли. Попытки многих компании потерпели неудачу. Одним из примеров является программа правительства США по производству целлюлозного этанола из растений, осуществлявшаяся в течение 11 лет. В результате выросло производство биотоплива второго поколения, для которого используется не только крахмал растения, но и вся биомасса, что делает производственный процесс более эффективным. Однако к 2017 г. было произведено всего 10 млн галлонов, т. е. менее 0,1% от целевого показателя. Учитывая относительно низкую стоимость нефтепереработки, более устойчивые варианты развития, вероятно, будут по-прежнему сталкиваться с серьезной конкуренцией. В результате, хотя эта область и представляется перспективной, ее потенциал остается относительно небольшим, если исходить из анализа текущей ситуации на рынке.

Добыча энергоресурсов и другого сырья

При извлечении сырья, включая нефть, можно использовать генно-модифицированные микробы. Секвенирование микроорганизмов дает возможность определить оптимальную площадку для бурения нефтяных скважин; ДНК-тестирование микробов из образцов горных пород поможет точно определить районы с наибольшим потенциалом, что приведет к снижению затрат на 10%. Наработки в области микробиологии позволяют снизить влияние коррозии, вызванной микроорганизмами (микроорганизмы прилипают к поверхностям металлических и неметаллических материалов, образуя биопленку, под которой происходит коррозия), при добыче и транспортировке нефти. Если эта технология принесет свои плоды, ее можно будет применить и при добыче золота и других металлов.

Хранение энергии

Биологические исследования в области хранения энергии являлись предметом широкого интереса в академических кругах в течение последних нескольких десятилетий, однако практическое применение результатов научных изысканий было ограничено. Усилия были сосредоточены на двух основных областях, потенциально способных нарушить

энергетический ландшафт, – биоаккумуляторах и использовании генно-модифицированных микроорганизмов для создания передовых электродов для аккумуляторов следующего поколения.

Биоаккумуляторы – это по сути топливные элементы, в которых используются ферменты для производства электричества из сахара. Их способность превращать удобное для хранения топливо, содержащееся в обыкновенном сахаре, в электричество вызывает неподдельный интерес ученых. При 596 А·ч/кг плотность сахара была бы в десять раз больше, чем у литий-ионных батарей. Среди дополнительных преимуществ можно упомянуть низкие затраты на топливо, возможность легкой транспортировки и устойчивость. Однако последние достижения не привели к каким-либо экономически конкурентоспособным решениям, и практическое применение данных разработок вряд ли относится к обозримому будущему. Главным препятствием коммерциализации этой технологии служит прежде всего небольшой срок жизнеспособности микроорганизмов и снижение эффективности по мере увеличения объема растворов.

Потенциально более применимым в ближайшей перспективе является использование искусственных микроорганизмов для создания усовершенствованных электродов в батареях следующего поколения. В целом микроорганизмы, в том числе бактерии, грибки и вирусы, могут создавать высокоэффективные электроды, потому что они способны к быстрому размножению и подвержены модификации генов, биоминерализации и самосборке. В частности, литиево-воздушные устройства пристально изучаются как учеными, так и предпринимателями и рассматриваются в качестве потенциальной аккумуляторной технологии следующего поколения, но потребность в усовершенствованных электродах остается. Экспериментально уже доказано, что синтез этих электродов с использованием микроорганизмов возможен в процессе, управляемом определенными типами вирусов. По мере того как повышается промышленный интерес к производству высокоэффективных электродных материалов такого типа, микроорганизмы все чаще рассматривают как потенциальное средство обеспечения недорогого синтеза, который может ускорить развитие в области накопления энергии.

5. Устойчивое развитие

Мир сталкивается с взаимосвязанными экологическими проблемами. Меняется климат, по некоторым оценкам, средняя температура планеты поднялась на 1,1°C из-за выбросов парниковых газов антропогенного происхождения. Предположительно средняя температура будет расти и дальше. Угрозы чрезмерной засухи и наводнений становятся все более частыми и серьезными. Повышается уровень морской поверхности. По оценкам ВОЗ, около 4,2 млн преждевременных смертей во всем мире происходят из-за загрязненной окружающей среды (прежде всего воздуха). По данным ООН, нашей планете грозит вымирание миллиона видов растений и животных в течение ближайших десятилетий. Специалисты ФАО утверждают, что биоразнообразие в области продовольствия и сельского хозяйства вызывает серьезное беспокойство.

Биосеквестрация

Выбросы парниковых газов, в том числе в результате изменений в землепользовании, достигли в 2018 г. рекордного уровня – 75,9 Гт эквивалента CO₂. Стабилизация климата требует немедленного прекращения вредных выбросов, а также масштабного удаления углекислого газа из атмосферы. Удаление CO₂ из атмосферы при помощи биологических средств называется биосеквестрацией. Три основных компонента лежат в основе процесса изъятия углекислого газа из воздуха; это элементы, на работе которых строится принцип биосеквестрации: растения, водоросли и бактерии. Эффективность связывания углерода потенциально может быть повышена с помощью разработок на основе омиков и молекулярных технологий.

Растения. Даже при крайне оптимистичных предположениях о возможностях новых подходов к удалению углекислого газа объем работы по природному удалению CO₂ чрезвычайно велик. Растения выполняют эту роль на протяжении миллионов лет, но потеря лесных массивов ограничила масштабы естественного поглощения углерода. Для решения первостепенных экологических задач, по мнению экспертов, требуется массовое восстановление лесов в период до 2030 г. Ежегодно в мире должна засаживаться лесами территория, площадь которой по меньшей мере вдвое больше Исландии. Омики и молекулярные технологии способны оказать посильную помощь в достижении этой важной цели. Генетически модифицированные растения могли бы накапливать больше CO₂ в течение более длительного

периода времени, чем их природные аналоги. Растения обычно поглощают CO_2 из атмосферы и накапливают углерод в своих корнях. Ученые из Института Солка предлагают использовать генное редактирование для создания растений с более развитыми и мощными корневыми системами, которые смогут накапливать больше углерода, чем обычные растения. Корни получали бы большее количество суберина, вещества богатого природным углеродом, которое обогащает почву и помогает растениям противостоять стрессу. Умирая, генно-модифицированные растения будут выбрасывать в атмосферу меньше углерода, чем обычные растения. Если бы около 5% пахотных земель в мире (что эквивалентно площади, на которой выращивали генно-модифицированные соевые бобы в США в 2018 г.) были засеяны культурами с описанными характеристиками, то, как утверждают специалисты из Института Солка, каждый год можно было улавливать до 0,8 Гт эквивалента CO_2 . Для сравнения: общий объем выбросов CO_2 мировой авиационной промышленностью в 2018 г. составил около 0,9 Гт.

Однако широкое внедрение генно-инженерных растений сопряжено со сложностями, неопределенностью и рисками. До сих пор большинство генно-модифицированных растений было разработано в лаборатории и еще не прошло испытания в полевых условиях. Кроме того, нормативные барьеры выступают серьезным препятствием к внедрению лабораторных растений. В июле 2018 г. Суд Европейского союза постановил, что генетически отредактированные культуры должны подпадать под те же строгие правила, что и обычные ГМ-организмы. Очевидно, что любой переход к генно-модифицированным растениям для целей биосеквестрации не произойдет быстро.

Водоросли. Присутствующие во всей биосфере, особенно в морской и пресноводной среде, водоросли являются наиболее эффективными организмами для связывания углерода и фотосинтеза; они даже более эффективны, чем наземные растения. Отработанная биомасса из микроорганизмов после секвестрации может применяться для производства биодизеля, корма для скота, а также красителей и витаминов. Использование микроводорослей для секвестрации углерода имеет ряд преимуществ. Они не нуждаются в пахотных землях и хорошо выживают в местах, непригодных для других культурных растений, например в солончаково-щелочных и сточных водах. Поскольку микроводоросли имеют крошечные размеры, их можно разместить практически в любом месте, включая горо-

да. Они быстро растут. Самое важное, что их эффективность фиксации CO_2 оценивается в 10, а то и в 50 раз выше, чем у наземных растений.

Инструменты редактирования, включая методы CRISPR-Cas9 и TALEN, уже активно используются для изменения генов микроводорослей. В 2017 г. группа ученых генетически модифицировала один из видов микроводорослей и увеличила его способность к фотосинтезу в 1,2 раза. Несколько компаний, в том числе Fermentalg и UEZ, пытаются вывести технологии на основе микроводорослей на рынок. Они разработали генетически модифицированные водоросли, способные улавливать CO_2 и превращать его в биотопливо. Несмотря на огромный потенциал, биосеквестрация на основе микроводорослей не достигла значительных масштабов по ряду причин. Например, метод выращивания водорослей с использованием аквасуспензии отличается низкой продуктивностью биомассы, поскольку требует большого количества воды и энергии, что делает внедрение биотехнологий на основе микроводорослей довольно сложной задачей.

Бактерии. Многие бактерии обладают способностью поглощать атмосферный CO_2 . Они характеризуются такими преимуществами, как возможность быстрого разведения, хорошая фиксация углерода, высокая способность производить широкий спектр аддитивных (биоразлагаемых) продуктов, включая биотопливо и биопластики. Кроме того, бактерии относительно легко поддаются генной инженерии. Ученые трансформировали бактерию, которая питается простыми сахарами, в другую, которая строит свои клетки, поглощая CO_2 . В настоящее время коммерческое применение данной технологии ограничено, поскольку остается нерешенным ряд технических проблем, например связанных с улучшением фиксации углерода. Однако прогресс, возможно, приведет к разработке генно-модифицированных микробов, которые будут извлекать CO_2 из воздуха и превратят его в лекарства и другие ценные соединения.

Биоремедиация

Сегодня некоторые ученые пытаются применить знания генной инженерии в биоремедиации. Биоремедиация представляет собой комплекс мер, направленный на очищение окружающей среды – почвы, воды и атмосферы – с помощью биологических организмов, включая растения, водоросли, грибы и микроорганизмы. Одним из перспективных направлений является использование генетически модифицированных микробов для

расщепления отходов и токсинов, а также для восстановления шахт. Определенные успехи достигнуты в применении микробов для переработки текстильных изделий. Например, переработка хлопчатобумажных отходов требует больших ресурсов, а ограниченность нефти сдерживает производство волокон, получаемых нефтехимическим путем, таких как акрил, полиэстер, нейлон и спандекс. Количество отходов растет в геометрической прогрессии, поскольку изношенная и поврежденная одежда зачастую выбрасывается, а не ремонтируется. Менее 1% материала, используемого для производства одежды, перерабатывается в новую одежду, что представляет собой упущенную выгоду в размере более 100 млрд долл. США в год. Лос-анджелесская компания Amberscycle создала генетически модифицированные микробы, которые переваривают полимеры старых тканей и превращают их в полимеры для новых текстильных волокон.

Генно-модифицированные микробы могут оказать неоценимую помощь в очистке сточных вод в США, превращая ее в питьевую. Это особенно значимо, если учесть, что на системы сточных вод приходится от 3 до 4% потребления энергии в год, а выделяется при этом более 45 млн т парниковых газов. Микробы могут не только преобразовывать сточные воды в чистую воду, но и вырабатывать электричество, которое питает этот процесс.

Как и в случае с биосеквестрацией, большинство технологий по биоремедиации все еще тестируются в лабораториях, они не применяются повсеместно и не представлены широко на рынке. В данном случае еще предстоит преодолеть опасения общественности и регулирующих органов, которые могут возникнуть из-за опасений, связанных с использованием всех видов генной инженерии при создании микробов.

Мониторинг окружающей среды

Геномика послужит отличным подспорьем при мониторинге генетического биоразнообразия, проведении биозащиты от инвазивных видов, выявлении экологических проблем, таких как загрязнение окружающей среды. В частности, генетические инструменты могут быть использованы для сохранения исчезающих видов путем улучшения мониторинга генетического биоразнообразия и получения генетической информации в качестве доказательства в суде по делам о браконьерстве. Кроме того, основанные на геномике системы используются для более качественного, быстрого и дешевого тестирования токсичности тысяч химических ве-

ществ, которые влияют на здоровье экосистем и животных, например при разливе нефти и химических веществ или при изготовлении повседневной фармацевтической и косметической продукции. При этом тестирование проводилось без участия животных.

Применение некоторых биотехнологий в оборонном секторе

Формирующийся спектр новейших биотехнологий, основанный на омиках или молекулярной биологии, имеет важнейшее значение для оборонного сектора и безопасности государства. При создании новых технологий неминуемо возникают этические проблемы. Обществу и правительствам предстоит тщательно взвесить сопряженные с ними риски и возможные непреднамеренные последствия. С одной стороны, биотехнологии имеют некоторые преимущества перед существующими на сегодняшний день уже привычными технологиями, с другой стороны, их использование может подорвать общественное доверие или увеличить геополитический риск. Некоторые достижения в сфере биологии уже поставлены на службу государственной безопасности и используются правоохранительными органами (напомним о секвенировании ДНК и данных, переданных полиции), что вызывает серьезные опасения в отношении конфиденциальности⁶. Вероятна возможность использования в будущем ДНК-тестирования для биометрической проверки при открытии банковских счетов, предотвращения мошенничества с кредитными картами или даже для обеспечения безопасности в аэропортах. Маловероятно, что стоимость и скорость тестирования ДНК окажутся на приемлемом уровне в ближайшие 30 лет, чтобы заменить сканирование отпечатков пальцев, которое является мгновенным и недорогим.

В сфере обороны рассматриваются, но не определены по масштабности возможные области применения биотехнологий, которые включают повышение эффективности вооруженных сил с помощью генной инженерии и разработку наступательного или оборонительного биологического оружия. Весьма вероятно, что демократические страны окажут сильное сопротивление любому намерению продвигать вопросы генетического модифицирования военных. Однако в случае если преимущества таких войск на местах представятся достаточно убедительными, то некоторые

⁶ О рисках безопасности и конфиденциальности см.: Биореволюция: риски и возможности // Наука за рубежом. 2020. Август (№ 91).

страны, вероятно, попытаются сделать шаги в этом направлении, что неизбежно приведет к новой гонке вооружений⁷.

Биоинновации и образование

Биоинновации можно применить в сфере образования и развития талантов. Генетический анализ позволяет составить схему персонализированного обучения. Если омики и молекулярные технологии дадут возможность более тонко понимать, что нужно каждому ребенку для наиболее эффективного обучения, то, вероятно, анализ ДНК и данных ребенка, таких как память, время реакции и способность к обучению, окажется нелишним. Возможно, появится генетическое профилирование для выявления учащихся, которые склонны бросить школу, и им будет выделяться больше ресурсов, чтобы предотвратить преждевременное окончание обучения. Кроме того, на ранней стадии можно активно выявлять нарушения в процессе обучения, которые обусловлены генетическими данными (такими как дислексия) и принимать соответствующие терапевтические меры. Наиболее перспективных спортсменов можно отбирать на основе их генетики, что уже происходит в Австралии и Китае.

Этические соображения и здесь выступают сильным сдерживающим фактором, которым нельзя пренебречь. Профессиональная ориентация, основанная на генетике, чревата опасностями, и тому есть масса доказательств. Известно, что мнения учителей относительно способностей их учеников, оказывают сильное влияние на реальные результаты обучающихся. Поэтому даже простое предположение учителя о том, что некоторые ученики менее склонны к успеху, может восприниматься учеником как программа к действию. Кроме того, определение путей развития детей на основе их генетики может усилить социальное неравенство, если эти инструменты будут открыты только для богатых. По перечисленным выше причинам к биологическим достижениям в этой области следует относиться с предельной осторожностью.

Биоинновации в освоении космического пространства

Биоинновации могут оказаться полезными для космических исследований. Использование омиков и молекулярных технологий в космической

⁷ Следует особенно подчеркнуть, что в настоящем обзоре обсуждаются возможности применения биотехнологий на основе уже достигнутых научных результатов. Однако реальное воплощение многих биоинноваций лежит за гранью добра и зла.

промышленности – это увлекательно, но на данный момент весьма спекулятивно. Поэтому даже специалисты с большой осторожностью говорят о потенциальных возможностях. В любом случае данная тема не будет широко обсуждаться ранее 2050 г. Вполне возможно, что омики и молекулярные технологии в конечном счете будут использоваться для разработки мест обитания в космосе или для изучения процессов старения в космосе. Не исключено, что в будущем удастся использовать генетически модифицированные микробы для формирования на других планетах той среды, которая существует на Земле. Например, такую возможность потенциально можно рассматривать для создания среды обитания, пригодной для человека, на Марсе. Протестировав миллионы образцов ДНК, можно было бы идентифицировать организмы, наиболее подходящие для окружающей среды или наиболее полезные в качестве источника пищи на Марсе. Можно также создать марсианскую среду обитания более эффективно и экологически ответственно, используя грибы. Однако в ближайшей перспективе, отложив пока формирование земных условий жизни на другой планете, омики и молекулярные технологии могли бы с пользой обеспечить более устойчивое производство кислорода и источников пищи в контролируемых средах.

Вопросы космической медицины являются более актуальными и занимают умы ученых уже давно. Пилотируемые космические полеты совершаются с 1961 г., и биоинновации могут оказаться полезными сразу в нескольких областях. Медицинские достижения способствуют сохранению здоровья и выживанию в условиях космоса, и наоборот, благодаря медицинским исследованиям в космосе становятся достижимыми результаты, которые трудно или невозможно получить на Земле. Вероятно, удастся адаптировать фармакологию к личному геномному профилю космонавта. В настоящее время НАСА изучает процессы старения в космосе. Считается, что живые существа в космосе стареют быстрее. С целью понимания физиологии старения и прогрессирования болезней на Земле НАСА проводило эксперименты с участием близнецов, один из которых проработал год на Международной космической станции. Ученые исследовали молекулярные и физиологические особенности длительного пребывания в космосе. Проведенные исследования близнецов показали, что длина теломера, которые важны для деления клеток, существенно меняется во время космического полета, а по возвращении на Землю возвращается в прежнее

состояние. Кроме того, были выявлены изменения в метилировании ДНК в иммунных клетках, а также сердечно-сосудистые и когнитивные эффекты. Программа НАСА «Артемиды» изучает влияние частичной гравитации на тело и сравнивает результаты наблюдений с данными о микрогравитации. Результаты исследований по данному направлению будут полезны во время полетов космонавтов на Марс.

6. Интерфейсы биомашин

За последнее десятилетие более сложные и усовершенствованные алгоритмы и системы позволяют создавать настоящие интерфейсы для биомашин. Передовые методы обнаружения сигналов мозга дают возможность получать качественные и детализированные данные. Обширная аналитическая обработка, поддерживаемая все более сложным искусственным интеллектом и системой машинного обучения, позволяет лучше интерпретировать сигналы, поступающие из мозга, с перспективой в будущем идентифицировать конкретные фразы или сознательные команды от пользователей. Другие технические усовершенствования позволяют точно переводить данные, поступающие из мозга, в действие; примером может служить разработка протезов рук, способных совершать разнообразные движения. Существует потенциал для создания стабильных систем, в которых компьютеры и искусственный интеллект увеличивают возможности мозга. Область применения интерфейсов биомашин очень широка. Прежде всего это нейропротезирование, которое восстанавливает утраченные человеком сенсорные способности – слух или зрение, возвращая его к нормальной жизни. Во-вторых, немаловажный интерес представляют повязки для мониторинга уровня стресса на основе поступающих из мозга электрических сигналов. Сейчас трудно сказать, как быстро та или иная биотехнология поступит на рынок. Самые передовые интерфейсы биомашин в настоящее время уже используются в системе здравоохранения. А многие из возможных услуг вряд ли будут предлагаться на коммерческой основе в ближайшие десять лет (табл. 5).

Нейропротезирование связывает нервную систему человека с компьютерами, обеспечивая тем самым контроль над протезами конечностей и восстанавливая утраченные сенсорные функции. Уже хорошо зарекомендовали себя кохлеарные имплантаты (слуховой аппарат), доступные с конца 1980-х гг. Однако ученые не останавливаются на достигнутом,

стараясь усовершенствовать устройства так, чтобы их было легче имплантировать и использовать. Например, за последние 20 лет в области бионического зрения произошли значительные изменения. Компания SecondSight разработала ретинальный имплантат под названием Argus II, который восстановил у пациентов некоторые утраченные функции, включая способность различать формы, воспринимать свет и даже читать крупные печатные тексты. ЕС одобрил применение Argus II в 2011 г. В США разрешение на использование этого имплантата было выдано в 2013 г. Данная технология является относительно новой, поэтому требуется усовершенствовать качество предоставляемого зрения, что позволит расширить круг пациентов.

Значительный прогресс наблюдается в нейропротезировании поврежденных или утраченных конечностей, а также конечностей, не поддающихся контролю из-за повреждения нервной системы. Пациенты, у которых сохранились нервные связи, могут использовать миоэлектрические устройства, реагирующие на электрические сигналы, поступающие от мышц (рис. 5). В настоящее время исследователи разрабатывают нейропротезы конечностей, которые получают сигналы от чипа, хирургически имплантированного в мозг пациента. В частности, финансирование для разработки данного проекта получила команда ученых из Чикагского университета. Ведется усовершенствование нейропротезов с двигательным контролем, благодаря которому информация от протезов поступает непосредственно в мозг, создавая чувство осязания, которое позволяет лучше контролировать движение. Ученые из ETH Zurich создали датчики в бионических стопах, которые посылают сигналы обратно к большеберцовому нерву в ноге, позволяя пациентам чувствовать свои протезы в режиме реального времени. Были достигнуты большие успехи в протезировании пациентов с параличом нижних конечностей. Устройство MoreGrasp представляет собой гарнитуру с внешними электродами, которая интерпретирует сигналы мозга. Другие аналогичные устройства имплантируются в мозг.

Ученые исследуют возможность прямого вывода на компьютер внутренней речи непосредственно из мозга пациента; связь между мозгом и устройством осуществляется с помощью хирургически введенного нейропротеза. Этот метод может значительно облегчить жизнь пациентам, страдающим параплегией и потерявшим способность контролировать ра-

боту голосовых связок. Сегодня такие пациенты либо не могут общаться, либо вынуждены использовать такие технологии, как устройства слежения за движениями глаз, при этом пациенту приходится старательно «выписывать» глазами слова, буква за буквой. В 2019 г. исследователи из Калифорнийского университета в Сан-Франциско сообщили об использовании нейрорепротезирования для приема и интерпретации сигналов мозга в той части коры, которая контролирует гортань. Оказалось, что возможно распознать слова в 80% синтезированных предложений.

Помимо нейрорепротезирования инновации в сфере биомашинных интерфейсов могут оказаться полезными для диагностики и лечения различных заболеваний. Сигналы электроэнцефалограммы (ЭЭГ) в сочетании с результатами поведенческих тестов используются для выявления у пациентов болезни Альцгеймера и Паркинсона. Среди других часто используемых технологий для понимания мозговой активности с целью диагностики заболевания известны компьютерная томография, МРТ и спектроскопия.

Стимуляция глубинных структур головного мозга осуществляется при помощи устройства, которое посылает импульсы электрического тока, смягчая тем самым некоторые последствия неврологических заболеваний. Эта технология была одобрена в США в 1997 г. для лечения эссенциального тремора, часто наблюдаемого при болезни Паркинсона. В настоящее время ведутся исследования на предмет возможности стимулирования глубинных структур головного мозга у пациентов, которым диагностировали болезнь Альцгеймера, депрессию и тревожность (для этой категории пациентов стимуляция еще не была одобрена).

В будущем возможно появление более совершенных устройств, которые смогут «считывать» эмоциональное состояние пациентов и, следовательно, послужить полезным подспорьем в терапии. В 2013 г. исследователи из Университета Карнеги – Меллона использовали функциональную магнитно-резонансную томографию и алгоритм машинного обучения для калибровки машины, которая распознает эмоции испытуемых с разумной точностью. Если эта техника будет усовершенствована, то, возможно, ее будут применять при оказании помощи пациентам во время терапевтических сеансов.

Достижения в области биомашинных интерфейсов вызвали немалый интерес и у простых обывателей. В частности, на потребительском рынке появились медицинские портативные повязки для контроля над состоянием стресса. Одним из самых ранних доступных потребительских биомашинных интерфейсов, интерпретирующих сигналы ЭЭГ, была повязка Muse, работа над которой началась в 2003 г., а на рынке она появилась в 2014 г. Команда канадских нейробиологов провела неделю среди космонавтов, для которых на Гавайях была создана среда обитания, приближенная к марсианским условиям. Там ученые наблюдали в режиме реального времени за состоянием мозга космонавтов, которые готовились к полету на Марс и носили сенсорную повязку Muse. После интерпретации сигналов ЭЭГ базовым способом для описания уровня стресса пользователя можно использовать эту информацию для тестирования и оптимизации эргономического дизайна помещений, таких как кабины самолетов, чтобы минимизировать стресс и оптимизировать когнитивные функции.

Гипотетически если нейропротезирование способно подавать световые сигналы на зрительный нерв, то можно было бы пойти дальше и разработать технологию, способную передавать другие сигналы, например инфракрасные, для улучшения зрения людей, не имеющих патологий. Французская компания Pixium Vision в сотрудничестве со Стэнфордским университетом изготовила бионические имплантаты, способные улавливать инфракрасные лучи. Микропроцессор, встроенный в глаз, воспринимает инфракрасный свет и затем переводит его в виде электрического сигнала к клеткам зрительного нерва.

Потенциальное применение биомашин в оборонных целях может осуществляться в рамках программы, которая изучает связь между мозгом человека, находящимся отдаленно от мозга человека, который находится на поле боя, а также способы управления интегрированных экзоскелетов с дополнительными приспособлениями, контролируемые через нейронную связь. В марте 2018 г. Управление перспективными исследовательскими проектами Министерства обороны США (DARPA) объявило о четырехлетней программе разработки нейротехнологий нового поколения, известной как N3. Шесть групп ученых из различных университетов и научно-исследовательских центров получили 20 млн долл. США на разработку передовых интерфейсов биомашин. Цели проекта как будто заимствованы из научно-фантастических романов: одна из проектных групп изучает способы

генной инженерии клеток мозга, чтобы активированные железом белки излучали инфракрасный свет, который затем обрабатывается магнитной головной гарнитурой для стимуляции определенных клеток с тем, чтобы передать изображения в мозг. Хотя такие проекты носят в высшей степени спекулятивный характер, они демонстрируют растущий интерес военной и оборонной промышленности к использованию новых технологий.

7. Биовычисления

Молекулярная биология и современная компьютерная наука активно взаимодействуют, создавая совершенно новые функциональные возможности, включая появление биовычислений. Под биовычислениями понимается технология, использующая биологические молекулы для выполнения функций обработки данных и анализа, традиционно выполняемых в устройствах, созданных на основе кремния. Для Кремниевой долины и других глобальных технологических центров это новый технологический рубеж. Так, тема биовычислений стала заключительной на конференции Microsoft Ignite в 2019 г.

Наибольший интерес в сфере биовычислений представляют два направления: хранение данных на нуклеиновой кислоте и параллельные вычисления на биологической основе.

Хранение данных на нуклеиновой кислоте означает хранение данных в нитях ДНК. Использование РНК для хранения возможно, но ДНК более стабильна. Сегодня данные хранятся на полупроводниковых и магнитных устройствах, однако можно представить себе будущее, в котором автоматизированные машины хранят информацию, синтезируя нити ДНК; пары оснований могут кодировать текст, изображения и даже фильмы. Часть ДНК, в которой хранятся данные, должна быть идентифицирована, пары считаны и данные переданы на компьютер. Поскольку в настоящее время сложнее манипулировать парами оснований для хранения данных на биологической основе, чем использовать обычное хранилище информации на основе кремния, весьма вероятно, что хранилище данных на основе нуклеиновой кислоты не заменит обычные системы хранения данных полностью, а будет использоваться для больших объемов данных, к которым не нужно иметь быстрый доступ.

Это может показаться вымыслом, но работы над данной технологией уже идут полным ходом. Первое кодирование 659-килобайтной книги на ДНК было проведено в 2011 г. в Гарвардском университете, а годом позже команда ученых продемонстрировала гораздо более высокую точность и сумела сохранить намного больше данных – более пяти мегабайт. Сейчас частные компании, включая Intel, Micron и Microsoft, инвестируют в эту технологию. Прогресс в этой области поможет найти решения растущей проблемы хранения данных, которые создаются в настоящее время. Каждую минуту через Snapchat отправляется 16 млн текстовых сообщений и более полумиллиона фотографий. Каждый день в мире производится 2,5 квинтиллиона байт данных⁸. По некоторым оценкам, к 2040 г. в мире может закончиться запас кремния для хранения данных. Хранение данных на ДНК представляет собой вероятное решение этой проблемы, поскольку ДНК чрезвычайно компактна. Она примерно в миллион раз плотнее, чем обычные жесткие диски; если отбросить технические ограничения, то на одном килограмме ДНК можно было бы сохранить все данные, существующие на сегодняшний день в мире. Еще одним преимуществом хранения данных на нуклеиновых кислотах является долговечность среды при соблюдении правильных условий хранения. Хранение данных на нуклеиновых кислотах может гарантировать, что любые данные, к которым нет регулярного доступа, могут находиться в безопасности очень долго – десятки или даже сотни лет.

Однако реальность не так радужна. Прежде чем хранение нуклеиновых кислот может быть использовано в коммерческих целях, необходимо преодолеть значительные трудности. Во-первых, стоимость хранения в настоящее время непомерно высока как при синтезе (записи), так и при секвенировании (чтении) данных. Кодирование одного мегабайта данных с помощью ДНК обошлось в 2017 г. в 3500 долл., запись на жесткий диск равного объема информации обходится сегодня в 2 цента. Вместе с тем затраты могут быстро снизиться, как это было с кремниевым хранилищем, ведь еще в 2012 г. мегабайт ДНК для кодирования стоил 12 400 долл. США. Второй проблемой является отсутствие в настоящее время распределенной автоматизированной системы для записи и чтения и для последующего доступа к данным на нуклеиновых кислотах. Организациям или корпорациям, размещающим эти данные, потребуется оборудование, способное преобразовывать их непосредственно из электронных данных

⁸ 2,5 квинтиллиона байт = $2,5 \times 10^{18}$ байт.

в молекулы ДНК. Точный синтез ДНК требует сложной гидродинамической инженерии. Однако эта трудность не является непреодолимой.

В будущем биологический компьютер может использовать биомолекулы для решения параллельно сразу нескольких задач и, следовательно, получать ответ гораздо быстрее, чем традиционные вычислительные машины. Биологические параллельные вычисления используют сконструированные молекулы или клетки в качестве аналогов решений или логических операций, создавая тем самым новые алгоритмические подходы к решению задач, опирающихся на биологические субстраты. Преимущества этой технологии заключаются в большей энергоэффективности и скорости. Исследователи из Университета Макгилла создали чип с микроскопическими каналами, покрытыми миозином, молекулярным двигателем, обнаруженным в мышечных клетках, через который перемещаются белковые нити. Создав макет устройства, исследователи смогли задать «задачу коммивояжера», в которой требуется найти ответ на такой сложный вопрос: «Какой маршрут следует выбрать, чтобы посетить все места хотя бы один раз и вернуться в исходную точку?». В то время как традиционный вычислительный подход потребовал бы тестирования каждого единственного возможного решения из множества возможных маршрутов, метод параллельных вычислений на основе белков показал оптимальные ответы быстрее, чем обычные компьютеры. Кроме того, биокомпьютерный чип нашел ответ, используя в 10 тыс. раз меньше энергии, чем традиционный компьютер при решении той же проблемы. В ходе описанных экспериментов решались простые задачи. Однако исследователи твердо уверены, что в будущем сложные задачи, которые трудно или даже невозможно решить с помощью традиционных вычислений, можно было бы быстрее решить с помощью параллельной обработки биокомпьютеров. Интерес к этой зарождающейся области знаний растет. В рамках своей флагманской научно-исследовательской программы Horizon 2020 ЕС запустил в 2017 г. пятилетний проект Bio4Comp с первоначальными инвестициями в размере 6,1 млн евро, целью которого является создание прототипа биокомпьютера. Не секрет, что использование ДНК вызывает интерес у правительств и оборонных ведомств. Например, DARPA выделило 15,3 млн долл. США в качестве гранта тем компаниям, которые занимаются вопросами хранения данных на ДНК.

Приложение

Рисунок 1. Новая волна инноваций в здравоохранении

Волны биоинноваций в фармацевтике

Число продуктов, с I по III фазу*

* Только инновационные препараты, исключая аналогичные формулы и биоаналоги; состояние на июнь каждого года с недостающими неаппроксимированными фазами; фаза, основанная на наиболее прогрессирующих показателях.

** Третья волна инноваций включает в себя множество инновационных терапевтических средств, основанных на революционных биотехнологиях, улучшающих здоровье человека. Однако примеры не являются исчерпывающими, не отражено применение в других областях, таких как сельское хозяйство, потребительские рынки и т. д.

Рисунок 2. Прогнозируемый прямой экономический эффект от применения биотехнологий в области здравоохранения: 2030–2040

Ежегодное воздействие на сферу здоровья и работоспособности человека может составить 0,5–1,2 трлн долл. США.

Частичная оценка диапазона годового потенциального прямого экономического эффекта, 2030–2040 гг.

■ Низкий □ Высокий ◐ Воздействие не оценено*

Миллиарды долларов

Примеры применения биотехнологий, прошедших оценку

* Включая, но не ограничиваясь этим, косвенное воздействие как оцененных, так и еще не подвергавшихся оценке биотехнологий.

** ГПС – генетический преимплантационный скрининг; НПТ – неинвазивное пренатальное тестирование.

Рисунок 3. Прогноз ежегодного эффекта применения биотехнологий для профилактики, диагностики и лечения заболеваний: 2030–2040

Общий годовой эффект от использования биотехнологий для профилактики, диагностики и лечения заболеваний может достигать 1,2 трлн долл. США.

Частичная оценка диапазона годового потенциального прямого экономического эффекта, 2030–2040 гг.

■ Низкий □ Высокий ▸ Воздействие не оценено*

Миллиарды долларов

* Включая, но не ограничиваясь этим, косвенное воздействие как оцененных, так и еще не подвергавшихся оценке биотехнологий.

Рисунок 4. Прогноз годового прямого экономического эффекта на рынке потребительских товаров: 2030–2040

Ежегодное воздействие на рынок потребительских товаров и услуг может составить 0,2–0,7 трлн долл. США в ближайшие десять-двадцать лет.

Частичная оценка диапазона годового потенциального прямого экономического эффекта, 2030–2040 гг.

■ Низкий □ Высокий ▒ Воздействие не оценено*

Миллиарды долларов

Примеры применения биотехнологий, которые вошли в оценку

* Включая, но не ограничиваясь этим, косвенное воздействие как оцененных и еще не подвергавшихся оценке биотехнологий.

Рисунок 5. Примеры использования нейропротезирования

Нейропротезирование может восстановить контроль над движениями при различных состояниях.

Пациенты с физической потерей конечностей

Миоэлектрические устройства

Считывание электрических сигналов от мышцы оставшейся конечности для управления протезом конечности

Пациенты с параличом конечностей (поражение нервной системы)

Стимуляция мышц

Сигналы считываются непосредственно из мозга через хирургически имплантированный чип или головную гарнитуру и преобразуются в электрические сигналы, стимулирующие мышцы, которые управляют поврежденной конечностью

Нейронный имплантат или гарнитура на голову

Считывание сигналов непосредственно из мозга через хирургически имплантированный чип или головную гарнитуру, чтобы управлять искусственной конечностью

Экзоскелет

Считывание электрических сигналов непосредственно из мозга через хирургически имплантированный чип или головную гарнитуру, чтобы управлять экзоскелетом

Таблица 1. Оценка сроков внедрения биотехнологий в сфере здоровья и работоспособности человека

Примеры применения

Таблица не является исчерпывающей

Расчетные временные показатели точки ускорения использования биотехнологий в сфере здоровья и работоспособности человека

Точка ускорения – момент времени, когда внедренная технология начинает активно использоваться*

Существующие До 2020 г.	Краткосрочный период 2020–2030 гг.	Среднесрочный период 2030–2040 гг.	Долгосрочный период После 2040 г.
Расширенные исследования и разработки лекарственных средств в рамках омиков	Ткани, полученные из стволовых клеток (например, волосные фолликулы) Жидкая биопсия	Генные стимулы для снижения трансмиссивных заболеваний Клеточная терапия CAR-T твердых опухолей	Омики, изучающие процессы молекулярного старения Пересадка органов, полученных из стволовых клеток
Исследование на носительство	Митохондриальный перенос	Клеточная и генная терапия для снижения риска отторжения пересаженных органов	Скрининг, диагностика и лечение нейродегенеративных заболеваний (например, болезни Альцгеймера) на основе омиков
Неинвазивное пренатальное тестирование	Клеточная терапия CAR-T жидких опухолей Генная терапия моногенных заболеваний	Основанные на омиках скрининг, диагностика и лечение инфекционных заболеваний и отдельных полигенных заболеваний (например, метаболических, сердечно-сосудистых, иммунных нарушений)	Управляемый уход с использованием современных омиков
Предимплантационное генетическое тестирование эмбрионов на наличие генетических нарушений			Редактирование эмбрионов в медицинских целях (например, с помощью метода CRISPR)
Восстановление тканей с помощью бесклеточных биоматериалов (например, дюральный пластырь)			Скрининг эмбрионов на наличие немедицинских признаков (например, цвета волос)
Фармакогеномика			Редактирование эмбрионов для выявления немедицинских признаков (например, с помощью метода CRISPR)

* Точка, в которой ускоряется процесс внедрения. Степень внедрения и сроки для каждого варианта использования зависят от многих переменных, включая коммерческую доступность, нормативное регулирование и общественное признание. Эти оценки не отражают в достаточной мере показатели риска или вероятности.

Таблица 2. Оценка сроков внедрения биотехнологий в сфере сельского хозяйства, аквакультуры и пищевой промышленности

Примеры применения

Таблица не является исчерпывающей

**Расчетные временные показатели точки ускорения использования биотехнологий
в сфере сельского хозяйства, аквакультуры и пищевой промышленности**

Точка ускорения – момент времени, когда внедренная технология начинает активно использоваться*

Существующие До 2020 г.	Краткосрочный период 2020–2030 гг.	Среднесрочный период 2030–2040 гг.	Долгосрочный период После 2040 г.
Селекция, основанная на применении маркеров (зерновые)	Диагностика микробиома сельскохозяйственных культур и обработка пробиотиками	Генно-модифицированные растения и животные, используемые в пищу, увеличенный срок хранения пищевых продуктов	Генно-модифицированные растения, усиленный фотосинтез
Животноводство, основанное на маркерах (животные, используемые в пищу)	Диагностика микробиома почвы и микробиологическая обработка семян	Генно-модифицированные растения и животные, используемые для борьбы с устойчивостью к пищевым заболеваниям	
Генетическое отслеживание происхождения, безопасности и подлинности пищевых продуктов (например, аллергенов, видов, патогенов)	Диагностика микробиома воды и микробиологическая обработка воды (например, пероральная вакцина на основе микроводорослей для аквакультуры)	Генно-модифицированные растения и животные, используемые в пищу, более высокое содержание питательных веществ, улучшенный вкус, особые формы	
Генно-модифицированные культуры, устойчивые к засухе	Генно-модифицированные культуры, повышенная эффективность (например, использование оросительной воды)	Культивированное мясо Генно-модифицированные животные, используемые в пищу, более быстрый рост	
	Растительные белки (например, мясо, молочные продукты, яйца)	Генно-модифицированные животные, используемые в пищу, сокращение выбросов парниковых газов

* Точка, в которой ускоряется процесс внедрения. Степень внедрения и сроки для каждого варианта использования зависят от многих переменных, включая коммерческую доступность, нормативное регулирование и общественное признание. Эти оценки не отражают в достаточной мере показатели риска или вероятности.

Таблица 3. Оценка сроков вывода биотехнологий на потребительский рынок

Примеры применения

Таблица не является исчерпывающей

Расчетные временные показатели точки ускорения использования биотехнологий на потребительском рынке

Точка ускорения – момент времени, когда внедренная технология начинает активно использоваться*

Существующие До 2020 г.	Краткосрочный период 2020–2030 гг.	Среднесрочный период 2030–2040 гг.	Долгосрочный период После 2040 г.
Генетическое тестирование для выявления проблем, обращение к прошлым поколениям	<p>Генетическое тестирование DTC, личная информация о здоровье и образе жизни</p> <p>Персонализированные услуги знакомств на основе генетического профиля</p> <p>Персонализированные услуги питания на основе генетического и микробиомного профиля</p> <p>Персонализированные пробиотики и витамины на основе генетического и микробиомного профиля</p> <p>Генетическое тестирование домашних животных и генная терапия</p> <p>Тестирование микробиома домашних животных и микробиологическая обработка (например, фекальная трансплантация)</p> <p>Генетически модифицированные домашние животные</p> <p>Микробиологические средства по уходу за кожей</p>	<p>Микробиологические продукты для отбеливания зубов</p> <p>Биосенсоры для личного мониторинга здоровья, питания и физической подготовки на основе данных омиком</p>	<p>Генная терапия, улучшение атлетических способностей</p> <p>Генная терапия, средства против выпадения волос</p> <p>Генная терапия, средства против старения кожи</p>

* Точка, в которой ускоряется процесс внедрения. Степень внедрения и сроки для каждого варианта использования зависят от многих переменных, включая коммерческую доступность, нормативное регулирование и общественное признание. Эти оценки не отражают в достаточной мере показатели риска или вероятности

Таблица 4. Оценка сроков внедрения биотехнологий в сфере материалов, химической продукции и энергии

Примеры применения

Таблица не является исчерпывающей

Расчетные временные показатели точки ускорения использования биотехнологий в сфере материалов, химической продукции и энергии

Точка ускорения – момент времени, когда внедренная технология начинает активно использоваться*

Существующие До 2020 г.	Краткосрочный период 2020–2030 гг.	Среднесрочный период 2030–2040 гг.	Долгосрочный период После 2040 г.
Новые биопуты в производстве лекарств (например, пептидов)	Генетическая прослеживаемость происхождения и подлинности ткани Улучшение существующих процессов ферментации, пищевые и кормовые ингредиенты (например, аминокислоты, органические кислоты)	Новые материалы, биополимеры (например, полилактиды, полиэтилен-рефталат)	Биосолнечные клетки и биоаккумуляторы
Усовершенствование существующего процесса ферментации, биопестициды/биоудобрения	Улучшение существующих процессов ферментации, промышленные ферменты (например, ферменты моющих средств) Новые биопуты, пищевые и кормовые ингредиенты (например, стевия в качестве сахаров)	Существуют ограничения в применении**	
Усовершенствование существующих процессов ферментации, другие сферы (например, гидроколлоиды, ароматизаторы, косметика)	Новые биопуты, промышленные ферменты (например, биокатализаторы) Новые биопуты, ткани и красители (например, грибная кожа, паучий шелк) Новые биопуты, иные варианты применения (например, сквален) Новые материалы, биопестициды/биоудобрения (например, пестициды) Новые материалы, химикаты (например, технологические химикаты IC) Извлечение сырья с помощью генно-модифицированных микробов (например, микробная добыча нефти усовершенствованными методами)		
	Биотопливо

* Точка, в которой ускоряется процесс внедрения. Степень внедрения и сроки для каждого варианта использования зависят от многих переменных, включая коммерческую доступность, нормативное регулирование и общественное признание. Эти оценки не отражают в достаточной мере показатели риска или вероятности.

** Предсказать пути развития новых биотехнологий в сфере материалов и химических веществ довольно сложно, отчасти потому, что их разработка ведется частными компаниями, которые хотят сохранить конфиденциальность, либо потому, что исследования и разработки многих новых материалов все еще находятся на ранней стадии. Многие достижения в сфере материалов и химической продукции, обладающие неизвестными на сегодняшний день свойствами, ждут нас в будущем.

Таблица 5. Оценка сроков внедрения биотехнологий в сфере биомашинных интерфейсов

Примеры применения

Таблица не является исчерпывающей

Расчетные временные показатели точки ускорения использования биотехнологий в сфере биомашинных интерфейсов

Точка ускорения – момент времени, когда внедренная технология начинает активно использоваться*

Существующие До 2020 г.	Краткосрочный период 2020–2030 гг.	Среднесрочный период 2030–2040 гг.	Долгосрочный период После 2040 г.
Обеспечение базового управления игрой при помощи гарнитуры, следящей за мозговой активностью	Нейропротезирование для улучшения зрения (бионическое зрение)	Нейроэргономика для улучшения дизайна рабочего места (например, снижение уровня стресса в кокпите)	Интерпретация эмоций питомца с помощью измерения мозговых волн
Глубокая стимуляция мозга при болезни Паркинсона и эссенциальном треморе	Глубокая стимуляция мозга при болезни Альцгеймера, депрессии, тревожности	Прямая связь мозга с устройством для парализованных пациентов, неспособных общаться	Активизация чувственного восприятия для бытового использования
Нейропротезирование слуха (кохлеарные имплантаты)	Нейропротезирование для контроля над двигательным аппаратом (имплантат или внешняя гарнитура) человеческой или роботизированной конечности		Улучшение вычислительных способностей мозга (напрямую связано с компьютерным чипом)
Мониторинг мозговой активности для диагностики заболевания (например, ЭЭГ)	Мониторинг психического состояния с помощью измеренных мозговых волн		Управление бытовой электроникой с помощью гарнитур, считывающих сигналы мозга (например, смартфон)

* Точка, в которой ускоряется процесс внедрения. Степень внедрения и сроки для каждого варианта использования зависят от многих переменных, включая коммерческую доступность, нормативное регулирование и общественное признание. Эти оценки не отражают в достаточной мере показатели риска или вероятности.

Обзор выполнен на основе следующих публикаций:

1. McKinsey Global Institute (2020), *The Bio Revolution. Innovations transforming economies, societies, and our lives*, McKinsey Global Institute, May 2020. – www.mckinsey.com/mgi

Аэронавтика и космос

Биотехнологии и генетика. Сельское хозяйство, пищевая и химическая промышленность

Информационные
и телекоммуникационные технологии и
вычислительная техника

Исследования в области ядерной
и квантовой физики

Медицинские технологии
и оборудование

Нанотехнологии и новые материалы,
микроэлектроника

Социальные и экономические науки
и статистика

Энергетика и транспорт

Экология и рациональное
природопользование