

Научная статья

Original article

УДК 632.93;577.2

doi: 10.55186/2413046X\_2024\_9\_10\_421

**СОВРЕМЕННЫЕ ПЕРСПЕКТИВЫ, ОЦЕНКА ПОЛЬЗЫ И РИСКОВ  
ПРИМЕНЕНИЯ ГЕНЕТИЧЕСКИ МОДИФИЦИРОВАННЫХ  
РАСТЕНИЙ В США И В МИРЕ  
MODERN PROSPECTS, ASSESSMENT OF THE BENEFITS AND RISKS  
OF USING GENETICALLY MODIFIED PLANTS IN THE USA AND IN  
THE WORLD**



**Жиганова Лариса Петровна**, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник Института США и Канады Российской академии наук (ИСКРАН), Российская Федерация, 121069, Москва, Хлебный пер., д. 2/3 (Larissa-Zhiganova@yandex.ru)

**Zhiganova Larissa Petrovna**, PhD in Biology, senior researcher, Institute of USA and Canada Studies, Russian Academy of Sciences (ISKRAN), 2/3 Khlebny pereulok, Moscow, Russian Federation 121069

e-mail: [Larissa-Zhiganova@yandex.ru](mailto:Larissa-Zhiganova@yandex.ru)

**Аннотация.** Генетическая трансформация стала важным инструментом для модификации ценных растений путем включения новых генов с желаемыми признаками. Эти стратегии особенно полезны для сельскохозяйственных культур с целью повышения урожайности, устойчивости к болезням, толерантности к стрессу окружающей среды (холод, жара, засуха, засоление, гербициды и насекомые), а также для увеличения биомассы и лекарственной ценности растений. Производство генетически модифицированных (ГМ) устойчивых видов с требуемыми признаками и высокой урожайностью

способствует достижению целей устойчивого развития. Внедрение генетически модифицированных продуктов питания на рынок повысило потенциальные риски. Правильная оценка их воздействия на окружающую среду и контроль биобезопасности необходимы. В статье представлено обсуждение рисков и преимуществ генетически модифицированных растений и продуктов. Наиболее острыми вопросами являются оценка генетически модифицированных организмов (ГМО) с точки зрения их потенциальной опасности для здоровья человека, экологическое воздействие, перенос генетической информации и влияние на биоразнообразие, регуляторные нормы контроля биобезопасности ГМО и ГМ-продуктов питания. Готовность применять и использовать ГМ продукцию и принятие правил биобезопасности актуальны для всего мира, однако отличаются в разных странах. Применение методов генетической трансформации открывает большие возможности для новых видов растений, однако требуются дополнительные исследования с оценкой рисков.

**Abstract.** Genetic transformation has become an important tool for modifying valuable plants by incorporating new genes with desired traits. These strategies are particularly useful for agricultural crops to improve yield, disease resistance, tolerance to environmental stress (cold, heat, drought, salinity, herbicides and insects), and to increase plant biomass and medicinal value. The production of genetically modified (GM) resistant varieties with desired traits and high yields contributes to achieving sustainable development goals. The introduction of GM foods to the market has increased potential risks. Proper assessment of their environmental impact and biosafety control are necessary. The article presents a discussion of the risks and benefits of genetically modified plants and products. The most pressing issues are the assessment of genetically modified organisms (GMOs) in terms of their potential negative effects to human health, environmental impact, transfer of genetic information and impact on biodiversity, regulatory standards for biosafety control of GMOs and GM foods. The willingness to apply

and use genetically modified products and the adoption of biosafety regulations are very challenging issues worldwide, but differ from country to country. The use of genetic transformation opens up great opportunities for new plant species, but additional research with risk assessment is required.

**Ключевые слова:** трансгенные растения; генетическая трансформация; ГМО; перенос генов; ГМ-продукты; биобезопасность

**Keywords:** transgenic plants; genetic transformation; GMO; gene transfer; GM products; biosafety

### Введение

Существующие методы ведения сельского хозяйства не могут решить проблему продовольственной безопасности и искоренить дефицит питания и нехватку продовольствия в мире. Недавние исследования показали, что примерно 17,2% населения в мире не имеют доступа к необходимой калорийной пище в достаточном количестве [1]. Чтобы удовлетворить мировой спрос на зерно темпы роста урожайности должны составлять 2,4%, при том, что в реальности этот показатель не превышает 1,7%, а прогнозы по сокращению земель, пригодных для выращивания сельскохозяйственных культур неутешительные: к 2050 году нынешние 0,242 га уменьшатся до 0,18 га [2].

Генетически модифицированные растения и продукты (то есть, генетически модифицированные организмы, ГМО), которые появились вместе с передовой биотехнологией, могут помочь устранить глобальный дефицит продовольствия. Методы генетической трансформации позволяют создавать растения с желаемыми характеристиками в элитных сортах в значительно более короткие сроки по сравнению с традиционной селекцией. При этом, технология не только обеспечивает желаемые признаки, но и улучшает питательную ценность через производимые из этих культур обогащенные продукты. Перенос генов из любого организма в самые разные виды растений, от диких до культурных, преодолевает естественные барьеры

между видами и сокращает время получения новых сортов. Редактирование ДНК обеспечивает размножение видов через клеточную и тканевую культуру *in vitro*, что применяется также для получения трансгенных растений с целью разработки лекарственных препаратов и биосинтеза биологически активных соединений – ферментов, гормонов, вакцин и антител. Ряд ГМ культур, таких как соя, хлопок, томаты, картофель, рапс, кукуруза уже были одобрены для массовой продажи потребителю [3].

Очевидно, что ГМО обладают огромным потенциалом для решения проблем уровня жизни, улучшения питательной ценности культур, снижения загрязнения окружающей среды, повышения медицинской ценности и устойчивого развития сельского хозяйства. Однако, существуют распространенные опасения по поводу биобезопасности подобных продуктов и в частности, большую озабоченность относительно здоровья человека и окружающей среды. С трансгенами связывают риски возникновения пищевой аллергии, устойчивости к антибиотикам, токсичности продуктов питания, загрязненности пестицидами [4]. Учёными разных стран обсуждаются потенциальные преимущества и возможные опасности, связанные с выращиванием и потреблением ГМО с точки зрения этических, экологических, медицинских, политических и религиозных аспектов [5]. Поэтому крайне важно оценить риски использования ГМ растений и их продуктов, а также создать единые правила контроля и соблюдения биобезопасности.

Со стороны исследователей и разработчиков необходимо информирование общества о возможном вреде и преимуществах трансгенной продукции, чтобы люди знали, что они потребляют. Достоверная информация необходима также и о влиянии трансгенных растений на здоровье человека, окружающую среду и сельское хозяйство.

## **Преимущества генетически модифицированных растений и продуктов**

### *1. Биозащита организмов*

Дефицит микроэлементов представляет серьезную проблему для здоровья почти половины населения земного шара. Пищевые культуры с улучшенными питательными свойствами, полученные методами современных биотехнологий, как и в результате традиционной селекции и агрономических техник повышения пищевой ценности помогают экономически бедным странам. Использование биотехнологий имеет преимущества, однако несет и ряд угроз. Производство трансгенных растений эффективно для получения новых сортов не только с повышенной питательностью, но и с повышенной устойчивостью к биотическим и абиотическим факторам, что позволяет повышать качество и урожайность. Кроме того, растениеводство позволяет производить материалы, представляющие промышленный интерес. Уже налажено производство биоразлагаемых пластмасс, вакцин (например, трансгенные бананы, которые производят вакцины против гепатита В, трансгенный картофель, устойчивый к вирусам, рис с повышенным содержанием железа и витаминов, с повышенной устойчивостью к экстремальным погодным условиям и засухе) [6].

Ожидается, что к 2100 году численность населения Земли достигнет 10 миллиардов человек, и вероятность конфликтов, усугубляемых нехваткой ресурсов, в XXI веке растёт. Конфликты могут быть вызваны рядом факторов: изменением климата, урбанизацией, миграцией и отсутствием продовольственной безопасности. Согласно отчёту ФАО за 2018 г., число людей, страдающих от недоедания, выросло с 777 миллионов в 2015 г. до 815 миллионов в 2016 г. Данные показывают, что большинство этих людей живут в странах, затронутых политическими конфликтами (489 миллионов из 815 миллионов). Несмотря на то, что значительная продовольственная помощь поступает из США и ЕС, она обеспечивает продовольствием около 100 миллионов человек в 73 странах ежегодно, и их роль заключается в лечении, а не в профилактике. Для постоянного сокращения продовольственных

конфликтов в политически нестабильных странах требуются новые инвестиции и партнёрские отношения для разработки биотехнологических решений, в том числе генетически модифицированных культур [6]

Потребление ГМО поддерживает здоровое состояние в организме через более высокое содержание в продуктах питательных веществ, которые обычно в них не встречаются. Например, производство «золотого риса» с повышенным уровнем витамина А. Ранее были опубликованы данные исследований, установивших, что белки, производимые ГМО, нетоксичны, легко усваиваются и не вызывают аллергии (Университет Небраска, США). Также, были получены данные об изменении содержания питательных веществ за счет повышения уровней антиоксидантных соединений в ГМО, что может благотворно сказаться на здоровье человека [7].

Разработку модификации «золотого риса» начали в 1992 г. в Швейцарской высшей технической школе и во Фрайбургском университете. Первое научное описание её результата появилось в журнале Science в 2000. Первый вариант «золотого риса» вырабатывал в условиях теплицы до 1,6 мкг/г каротиноидов, а полевые испытания, проведённые в 2004 г. в США, показали от 4 до 8 мкг/г.

Для первоначальной разработки модификации использовался американский сорт *Kaubybonnet*, приспособленный для сравнительно умеренного климата. Достижение целей проекта, однако, требовало переноса её на те сорта, которые используются в странах Южной и Юго-Восточной Азии и соответствуют тропическому климату. На этом этапе основным разработчиком стал расположенный на Филиппинах Международный институт риса (IRRI). Из шести полученных в Syngenta (швейцарская компания) линий, отличающихся сайтом вставки целевых генов, для полевых испытаний сначала была взята GR2R, особенно хорошо показавшая себя в лабораторных условиях.

Права на модификацию после разработки SGR2 отошли к Syngenta, однако гуманитарный совет проекта Golden Rice – «Золотой рис» ( проект был инициирован Фондом Рокфеллера, США) сохранил право сублицензирования исследовательских организаций в развивающихся странах. Эта безвозмездная лицензия включает патенты, принадлежащие разным биотехнологическим компаниям, и освобождает от лицензионных отчислений фермеров с доходом менее 10 тыс. долл. США в год, а также разрешает использовать выращенный урожай для посева, но запрещает отправлять его на экспорт.

Противники внедрения «золотого риса» (в том числе организация Greenpeace) высказывали сомнения его безопасности, а также эффективности его использования. В частности, предполагалось, что каротин может разрушаться при термической обработке; кроме того, критики обращали внимание на необходимость потребления цинка и достаточного количества жиров для синтеза витамина А. Для ответа на подобные вопросы проводились соответствующие исследования. Так, в 2006 г. Университет Небраски (американский государственный исследовательский университет в Линкольне) показал отсутствие аллергических реакций на белки — продукты вставленных генов. В 2008 г. эксперименты показали, что каротин «золотого риса» эффективно перерабатывается в витамин А в организме человека и не разрушается при варке. Ещё одно исследование, опубликованное в 2012 г., подтвердило, что бета-каротин из «золотого риса» усваивается с той же эффективностью, что и чистый бета-каротин, растворённый в масле, и с большей эффективностью, чем каротин из шпината.

## *2. Трансгенные подходы к улучшению фитохимических веществ и биологической активности растений*

К настоящему времени также было усовершенствовано производство антиоксидантов, таких как фенольные соединения, из трансгенных растений, трансформированных бактериями *Agrobacterium tumefaciens* и *Rhizobium*

*rhizogenes*. Кроме того, были созданы трансгенные линии путем сверхэкспрессии генов в томате с повышенным содержанием фенольных соединений в растениях, которые участвуют в фиторемедиации.

Генная инженерия добилась успеха в производстве трансгенного риса, который содержит в 23 раза большую концентрацию каротиноидов, чем в предыдущем трансгенном «золотом рисе» [8]. Генетическая трансформация фитазы (фермент группы фосфатаз) в трансгенной сое привела к повышению активности фитазы в 2,5 раза по сравнению с нетрансгенным видом, а гены метилтрансферазы (VTE3 и VTE4) из Резуховидки Таля (*Arabidopsis thaliana*), перенесённые в геном сои, привели к повышению содержания  $\alpha$ -токоферола на 95% по сравнению с нетрансгенными растениями. Перенос гена лактоферрина в очищенный рис успешно увеличила содержание железа на 120%. Экспрессия соевого ферритина (белка, содержащего железо) в рисе привела к увеличению содержания железа в семенах, гены лактоферрина увеличили содержание железа в кукурузе, картофеле, салате и томате [3].

Другим подходом к рекомбинантному производству пищевых продуктов является генетическая трансформация полезных генов, которые усиливают выработку полезных соединений в растениях. В последних работах учёные ввели гены в томат для увеличения антиоксидантов, таких как фенольные соединения. Аналогично, повышенное количество фенольных соединений было отмечено в трансгенной Ремании клейкой (*Rehmannia glutinosa*), трансформированной микроорганизмом *Agrobacterium tumefaciens*, вызывающем волосатость корней [3].

### 3. Преимущества трансгенных растений в целях охраны окружающей среды

С точки зрения экологии трансгенные растения имеют ряд преимуществ (табл. 1). Штаммы бактерий *Bacillus subtilis* и *Bacillus thuringiensis* (Bt) могут продуцировать белки, такие как Cry или d-эндотоксины, которые являются токсичными для различных видов вредителей и насекомых. Токсины Bt также используют для получения трансгенных растений, уничтожающих



вредителей сельскохозяйственных культур. К ним относятся рапс CryIAc для борьбы с мохнатыми клопами, капустной молью и совкой хлопковой. Ген Cry2A в трансгенных бобах используют для борьбы со стручковыми сверлильщиками, ген Cry3A в трансгенной ели – для борьбы с жуками-короедами. Значительное снижение использования гербицидов и пестицидов наблюдалось в США с началом применения устойчивых к ним ГМ-растений, таких как трансгенная соя, яровая кукуруза и хлопок. Сокращение сельскохозяйственных химикатов уменьшает негативное воздействие на обрабатываемые земли, а также минимизирует использование техники для их распыления на поле, тем самым сокращая потребление топлива, что является экономически выгодным [9].

**Таблица 1. Генетическое редактирование для получения трансгенных видов, устойчивых к неблагоприятным условиям окружающей среды**

Наименование	Части растения	Штамм <i>Agrobacterium tumefaciens</i> (опухолеобразующая бактерия) / Вектор	Ген	Биотический и абиотический стресс	Страна-разработчик
Люцерна посевная	Листья и стебли	<i>A. tumefaciens</i> LBA4404/AGL01/sGV101	CRY3A (BT-токсин), подавляет развитие личинок колорадского жука	Устойчивость к насекомым	Иран
Рис посевной	Семена	Перенос генов методом бомбардировки частицами	ITR1, кодирует ингибитор трипсина	Устойчивость к насекомым	Испания
Соя	Зародыш	Баллистическая трансфекция (бомбардировка микрочастицами)	Белок оболочки вируса	Устойчивость к вирусу сои	Япония
Кокосовый орех	Семена	<i>A. tumefaciens</i> (LBA4404)/pBI121	CRY1AB, кодирует инсектицидный токсин	Устойчивость к насекомым	Иран
Баклажан	Листья	<i>A. tumefaciens</i> LBA4404/pBI121	CYSTATIN, ингибитор цистеиновых проэтиназ	Подавление нематоды, вредителя корневой системы	Индия

Арабидопсис	Проростки	<i>A. tumefaciens</i> GV3101/pB121 вектор экспрессии	Фактор транскрипции JCCBF2	Устойчивость к низким температурам	Китай
Рыжик волосистый	Цветки	<i>A. rhizogenes</i> (pB172) плазмид pKYLX71/1	Ацетилкоэнзим А: ацетилкоэнзимде аминидаза	Устойчивость к засолению почвы	Канада
Киви	Листья	<i>A. tumefaciens</i> LBA4404/pBin513	sbtCryIAc, кодирует токсин против личинок насекомых	Устойчивость к насекомым	Китай
Соя	Листья	<i>A. tumefaciens</i>	CryIA (TIC107)	Устойчивость к насекомым- вредителям	США

Источник: [3]

#### 4. Трансгенные подходы к элиминации аллергенов

Генетическая инженерия позволила внести в растения гены, ответственные за кодирование неаллергенных белков, и получать урожай гипоаллергенных культур. Значительное снижение аллергии на арахис было отмечено после выключения гена, кодирующего *Arah2*, с использованием технологии РНК-интерференции. Подобная технология была использована для выключения аллергенов у томата (*Lyc e* 101 и *Lyc e* 102), у яблока (*Mal d*) и сои (*GlymBd* 30K). В ряде исследований гипоаллергенный эффект был получен при снижении аллергенного белка в пыльце ржи. Приведенные данные доказывают, что ГМ-растения способны улучшить качество продуктов питания за счет снижения аллергенов [3].

#### 5. Трансгенные подходы к фиторекультивации

Фиторекультивация является эффективным решением проблемы загрязнения окружающей среды тяжелыми металлами, неорганическими и органическими загрязнителями и предполагает использование трансгенных растений для удаления вредных примесей (табл. 2). Гены, ответственные за гиперэкспрессию признаков переносят в целевые растения, имеющие потенциал для фиторекультивации. Введение таких генов описано для нескольких растений, в том числе для Резуховидки Таля (*A. Thaliana*). Металлотioneины (МТ) (семейство низкомолекулярных белков, богатых

тиолами, что позволяет эффективно связывать ряд микроэлементов) обеспечивают устойчивость к тяжелым металлам. Сверхэкспрессия генов МТ увеличила толерантность к кадмию у табака и рапса. Сверхэкспрессия фитахелатинсинтазы (TaPCSi) у табачного дерева (*Nicotiana glauca*) значительно увеличила устойчивость к присутствию кадмия и свинца. В другом исследовании сверхэкспрессия гена AtPCS увеличила фитохелатины (небольшие белки, связывающие ионы металлов в растительной клетке), что обусловило высокую устойчивость к мышьяку. Для удаления из почвы арсената, ртути и селена также используют ГМ-растения. Экспрессия гена *mer B* в трансгенной Резуховидке Таля привела к большей устойчивости к метилртути. Такие ферменты, как пероксидазы, лакказы, пероксигеназы, нитроредуктазы и фосфатазы играют важную роль в фитодеградациии органических загрязнителей. Эти вещества разлагают органические загрязнители, в том числе атразин, хлорацетанилид (применяемые гербициды) и 2,4,6-тринитротолуол (ТНТ) (применяется в промышленности) [10]. По табличным данным можно судить о преимущественном доминировании Китая в области трансгенной фиторекультивации.

**Таблица 2. Генетическое редактирование для получения трансгенных видов, повышающих эффективность фиторекультивации**

Растение	Ген	Штамм <i>A. tumefaciens</i> (опухолеобразующая бактерия) / Вектор	Продукт гена	Признак	Страна-разработчик
Арабидопсис*	PtABCC1	<i>A. tumefaciens</i> GV3101/pCX-SN	Переносчик ABC (мембранный транспортный белок)	Устойчивость к ртути	Китай
	TrNRAMP5	pMD19-T, HBT95-GFP, pCAMBIA1305.1	Белки макрофагов, отвечающие за врожденную устойчивость	Повышенное накопление кадмия, кобальта, марганца	
	ZAT6	<i>A. tumefaciens</i> GV3101/pXB93	Цинк-пальцевый фактор транскрипции	Повышенная устойчивость к кадмию	

	BnPCS	<i>A. tumefaciens</i> CV50/pBI121	Фитожелатин	Устойчивость к кадмию	
Ива	ThMT3	<i>A. tumefaciens</i> LBA4404/PROKII- ThMT3	Металлотионе ин	Повышенная устойчивость к меди и рост корневой системы	
Свекла обыкновенная	St GCS-GS	<i>A. tumefaciens</i> EHA105/pGWB2	Глутатион- синтаза	Повышенная устойчивость к кадмию, цинку, меди	
Рис	TaPCS1	<i>A. tumefaciens</i> EHA105/pBI121	Синтетаза фитожелатина, небелковые тиолы	Гиперчувстви тельность к кадмию	
Рапс	BnNRAMP1 b	ycf1 (Y04069), zrc1 (Y00829), smf1 (Y06272), BY4741/pYES2	Транспортная функция	Повышенный захват кадмия, цинка, марганца	Китай
	CKX2	<i>A. tumefaciens</i> GV3101	Содержание цитокинина	Устойчивость к кадмию, цинку	Герман ия
Горчица индийская	gshI, gshII и APS1	pFF19	γ-глу-цис- синтетаза, глутатион- синтетаза, АТФ- сульфурилаза	Захват селена	США
Петуния	RsMYB1	<i>A. tumefaciens</i> C58C1/pB7WG2D	Транскрипцио нный белок	Усиление устойчивости к кадмию, меди, цинку	Южная Корея
Табак	OsMTP1	<i>E. coli</i> , DH10B (GIBCO BRLp/UC18)	Транспортный белок железа	Гипернакопле ние кадмия	Индия
	AtPCS1	<i>A. tumefaciens</i> LBA4404/pBI121 и pCAMBIA	Синтаза фитожелатина	Накопление кадмия и мышьяка	Италия

\*Арабидопсис – растение семейства крестоцветных, имеет малый геном, используется в качестве модельной системы для изучения биологических процессов.

Источник: [3]

### 6. Трансгенные методы в производстве вакцин

Возможности регулировать экспрессию антигенов в растениях открыли новые горизонты для производства вакцин на растительной основе с использованием растений в качестве биореакторов. Уже получен ряд компонентов для вакцин из клеточной культуры растений через управление экспрессией определенных генов (табл. 3). Вакцины на растительной основе

экономически эффективны, просты в транспортировке, менее загрязненные и более стабильные, их производство менее затратно. В качестве пробной реализации идеи «съедобной» вакцины в трансгенных томатах были успешно синтезированы белки вирусных капсидов (вирус гепатита В – HBsAg и ВИЧ) [11]. В культуре трансгенной моркови были получены впечатляющие результаты по синтезу белков и впоследствии налажено производство фармацевтических препаратов (вакцины, антитела) на основе хлоропластов. В трансгенном виде *N. benthamiana* были получены антигены для вакцины против полиомиелита [12]. При этом следует отметить, что практически новые типы трансгенных вакцин на растительной основе были созданы в США.

**Таблица 3. Вакцины, полученные при помощи трансгенных растений**

Растение	Антиген/вирус	Заболевание	Путь введения	Страна-разработчик
Трансгенные виды картофеля	Поверхностный антиген вируса гепатита В (HBsAg)	Гепатит В	Пероральный	США
Табак культурный	Вирусный гликопротеин и нуклеопротеин с поверхностным белком А1Мv	Бешенство	Парентеральный	США
Картофель, кукуруза	Термолабильный энтеротоксин кишечной палочки ( <i>E. coli</i> LT-B)	Диарея	Пероральный	США
Картофель	Вирусные частицы норовируса (rNV)	Диарея, рвота	Пероральный	США
<i>N. benthamiana</i> *	D-антиген (PV3)/Полиовирус	Полиомиелит	Интраперитонеальный	Великобритания
	VP2, VP3, VP5, VP7/Вирус африканской чумы лошадей (AHSV)	Африканская чума лошадей	Внутримышечный	ЮАР
	НАС1	Свиной грипп H1N1	Внутримышечный	США
	Защитный антиген (РА)	Сибирская язва	Подкожный	США
Кукуруза	Спайковый белок	Вирусный трансмиссивный гастроэнтерит свиней	Пероральный	США
Картофель	СТВ-gp120 (HIV-1 gp 120V3) холерный токсин В, субъединица гибридного гена	Холера	Пероральный	США

	HEV CP (капсидные белки вируса гепатита E)	Гепатит E	Пероральный	США
--	--	-----------	-------------	-----

\**N. benthamiana*, травянистое растение, близкий родственник табака, используется в качестве биофабрики для производства сложных биологических препаратов

Источник: [3]

### 7. Трансгенные технологии для увеличения биотопливной емкости растений

Лигноцеллюлозная биомасса из непродовольственных культур считается потенциальным источником биотоплива. Однако основным препятствием для производства целлюлозного биотоплива является наличие вещества лигнина в составе клеточной стенки растений.

Удалось получить трансгенные культуры с экспрессией генов, отвечающих за деградацию клеточной стенки, путем выключения определенных генов, в результате чего вырос объем получаемого биотоплива из трансгенных данных линий. Стимуляция экспрессии генов, отвечающих за выработку экспансина, ослабляет клеточную стенку, в результате было получено трансгенное растение со сниженным ветвлением. Был изменен биосинтез лигнина без влияния на сосудистую структуру растений (через снижение синтеза 4-гидроксициннамойл-КоА-лигазы (4cl), ответственной за снижение синтеза лигнина и увеличение биомассы растения) [13]. Аналогичные результаты были получены в трансгенной культуре люцерны (угнетение синтеза 4-кумарата 3-гидроксилазы (C3H) и трансгенном табаке (выключение экспрессии циннамойл-КоА-редуктазы (ccR); фермента O-метилтрансферазы (OMT)). Во всех полученных линиях наблюдали увеличение биомассы и снижение содержания лигнина.

Изменение состава жирных кислот также способствует результативности производства биотоплива (трансгенный кокос со сверхэкспрессией лаурат-специфического гена LPAAT [43]), а также рост биомассы растений (увеличение фотосинтеза и биомассы за счет сверхэкспрессии двух ферментов из цианобактерий в растении табака) [14].

### 8. Повышение устойчивости растений к абиотическому стрессу

Широкое применение гербицидов и пестицидов наносит ущерб качеству сельскохозяйственных земель и приводит к их непригодности впоследствии. Выращивание растений со встроенными генами устойчивости к болезням позволяет обойтись без химикатов. Одновременно получены ГМ-культуры, хорошо переносящие присутствие в почве пестицидов, являясь устойчивыми сразу к нескольким веществам этого класса. Так, например, ГМ - соя (*Roundup Ready*) не только устойчива к глифосфату, но и так же безопасна и питательна, как и традиционно выведенный сорт. Это позволяет контролировать применение химических пестицидов, минимизировать загрязнение окружающей среды и снижать расходы при выращивании сельскохозяйственных культур в полевых условиях. ВТ-рис (ген *KND1*, экспрессирующий белок *Cry1Ab*) обладает высокой устойчивостью к насекомым и не оказывает токсического воздействия на здоровье человека. Получены также устойчивые к насекомым трансгенные сорта пшеницы, картофеля, риса и сахарного тростника. В целом, современные виды трансгенных растений демонстрируют высокую устойчивость к засолению почв и длительной засухе, что крайне актуально для агротехники в холодных и засушливых регионах [15].

### **Риски использования генетически модифицированных растений и продуктов питания**

С выходом на рынок ГМ-продуктов питания в обществе возник ряд вопросов и опасений, касающихся здоровья человека, управления окружающей средой и правового регулирования в этой области. Так, например, были опубликованы данные о том, что серьезную опасность представляет перенос генов, в результате которого могут появляться токсичные свойства пищевой продукции, при том, что контроль за ГМ культурами и продуктами затруднен. Токсичные агенты, производимые этими культурами, будут оставаться метаболически активными в течение всего периода размножения и воспроизводства в окружающей среде [16].

*Отрицательное влияние на здоровье человека и экологию окружающей среды*

Трансгены могут отрицательно влиять на рост и развитие млекопитающих, включая и человека. Не исключено, что трансформированный ген будет синтезировать токсичный для организма человека белок или аллергены. Также возможно неполное расщепление ГМ-продуктов в желудочно-кишечном тракте с последующим горизонтальным переносом генетического материала в клетки микроорганизмов, обитающих в просвете кишечника, и соматические клетки организма-хозяина. Есть данные о нарушении репродуктивных функций (бесплодие у животных) в результате трансфера генов [17].

Помимо прямого воздействия на здоровье человека и млекопитающих, ГМ-растения оказывают экологическое воздействие на нецелевые организмы (рыбы, черви, пчелы и насекомые), а также вносят свой вклад в снижение биоразнообразия и усиливающуюся нестабильность генов. Так, например, ВТ-токсин, вырабатываемый трансгенным хлопком, привел к гибели личинок многих видов насекомых, вызвав дисбаланс в экосистеме и пищевой цепи. Другим отрицательным примером является цепочка воздействия ВТ-токсина трансгенной кукурузы: личинки бабочки Монарха гибнут, поскольку питаются листьями молочая, на которые попадает пыльца кукурузы, а у личинок бабочек *Ostrinia nubilalis* и *Spodoptera littorals*, питающихся кукурузными листьями, была отмечена задержка развития [3].

Одна из серьезных проблем, связанных с переносом генов, — это потеря биоразнообразия, которая обусловлена случайным перекрестным опылением между ГМ-культурами и их дикими родственниками, в результате чего появляются сорняки с повышенной устойчивостью к различным гербицидам. Этот процесс крайне сложно контролировать, и уже есть примеры подобной генетической миграции от ГМ-культур (свекла, овес, рапс) к их диким предшественникам.



ГМ-продукты попадают в организм человека не только через пищу, но также вместе с вакцинами, бактериями и вирусами. Есть серьезные опасения того, что гены устойчивости к бактериям в геноме модифицированных растений одновременно обеспечивают устойчивость бактерий к лекарственным препаратам. Таким образом, практически все ГМ-продукты питания уже содержат подобные гены-маркеры, определяющие устойчивость к определенным антибиотикам, и постоянное потребление этих продуктов может привести к устойчивости к антибиотикам в организме человека [18].

Если новые внедренные в растения гены (помимо ожидаемых) производят новые белки и метаболиты, высок риск развития аллергических реакций у конечного потребителя. В эксперименте было установлено, что иммунная система крыс реагирует медленнее на ГМ-картофель, чем на культуру традиционной селекции. ВТ-токсин эффективно уничтожает насекомых-вредителей, однако при потреблении млекопитающими таких растений в пищу риск аллергической реакции на него крайне высок. В результате, насекомые, птицы и другие животные, которые питаются определенными культурами, эмпирически могут отказываться от потребления ГМ-культур, которые стали для них токсичными, что приведет к голоду, повлияет на многие пищевые цепочки и создаст серьезные угрозы для экосистем [19].

### **Современные достижения в области контроля и обеспечения биологической безопасности трансгенных продуктов и ГМО**

Учитывая развитие разработок по созданию ГМО, в ряде стран разработаны системы мер контроля и обеспечения биобезопасности при использовании трансгенной продукции и ГМО. Юридическое регулирование в этой области является непростым, при этом определяющим фактором является настороженное отношение потребителей, что приводит к отказу от ГМО. Государственные структуры, некоммерческие общественные организации и экологи также участвуют в дискуссиях и разрабатывают

ограничения к применению. В каждой стране собственные регламенты использования ГМО, и они сильно различаются. В странах **Европейского союза** (ЕС) Директива 2001/18/EL посвящена биобезопасности использования ГМО: в ней определены факторы, влияющие на окружающую среду, и прописан контроль их распространения с оценкой экологического риска ГМО. Отдельные директивы регламентируют количество ГМ-микроорганизмов (98/81/CE), порядок трансграничного перемещения ГМО (1946/2003), разрешенные ГМ-продукты питания и корма (1829/2003). С 1997 года продукты ГМО, поставляемые в коммерческую продажу в европейских странах, соответствующим образом маркированы и идентифицируются как **NOVEL FOOD** – Новая Пища. В настоящее время законодательство ЕС разрешает к потреблению продукты, полученные в результате естественного переноса генов (конъюгация, автоклонирование, трансдукция), и не считает эти методики технологиями для получения ГМО. Вместе с тем, редактирование ДНК методом **CRISPR-Cas9** запрещено, хотя в **США** эта новая технология разрешена и за нее была вручена Нобелевская премия по химии в 2020 году [20]. В **Канаде** регулированием занимается отдельное Агентство по инспекции пищевых продуктов (CFIA), без его одобрения невозможна коммерческая продажа продукта. Также отслеживается воздействие на биоразнообразие и окружающую среду, возможный поток генов и воздействие на нецелевые организмы. В **Индии** согласно недавно принятым законам единственным разрешенным трансгенным растением является **Bt-хлопок** (трансгенный хлопок, устойчивый к насекомым), но уже более 20 различных ГМ-растений с устойчивостью к насекомым, абиотическому стрессу, гербицидам, а также с улучшенными питательными признаками прошли полевые испытания [3].

Строгость регулирования биобезопасности зависит от экономической и политической ситуации в странах. Среди первых, кто разрешил применение ГМО были США, Бразилия, Аргентина, Чили, Мексика, Гондурас, Коста-

Рика и Уругвай. Бразилия и Аргентина, являются основными экспортерами ГМ-культур (хлопок, соя, кукуруза), что играет большую роль в экономике и ускоряет адаптацию законов и правил биобезопасности. Другие страны Латинской Америки, такие как Перу, Венесуэла и Эквадор, ввели полный запрет на использование, разработку и импорт ГМО.

Африканским странам ГМО могут помочь решить проблемы нехватки продовольствия и повысить уровень жизни. Большинство из них (47 стран) довольно быстро приняли ГМ-культуры с целью повышения эффективности сельскохозяйственного производства и увеличения пищевой ценности растений. Первой оказалась **ЮАР**, где на сегодняшний день разработана нормативная база по ГМО. Вместе с тем, есть и серьезные опасения, связанные с безопасностью ГМО и их воздействием на здоровье человека и окружающую среду, что и является основными препятствиями для принятия правил биобезопасности среди африканских стран [21].

В **Китае** к настоящему моменту принят комплекс законов, положений и систем управления биобезопасностью, учитывающих как собственные национальные нормы, так и международные положения. В **Корее** также законодательно регулируются развитие отрасли ГМО и ГМ-продуктов, поддерживаются исследования и коммерческое производство ГМ-культур.

Однако, для эффективного и успешного функционирования регуляторных норм необходим единый подход к проблеме и более тесное взаимодействие между различными странами на уровне государственных, некоммерческих организаций и бизнес-сообщества, которые могут совместными усилиями управлять и упорядочивать вопросы биобезопасности применения ГМО. Необходимо также информировать общество и потребителей о правилах и мерах биобезопасности и актуальных проблемах в этой области.

### **Споры о генетически модифицированных продуктах питания и сельскохозяйственных растениях**

После появления первых ГМО сразу же начались споры об их безопасности. Сторонники ГМО (разработчики, дистрибьюторы, ученые, представители контролирующих органов) настаивают на том, что ГМ-продукты нетоксичны и питательны и помогают решать продовольственный кризис в мире без отрицательного воздействия на здоровье человека и окружающую среду. Опубликованы результаты независимых исследований, в ходе которых не было обнаружено достоверных биологических различий при кормлении животных ГМ-культурами и продуктами [22]. По другим данным были выявлены участки фрагментированной ГМ-ДНК в желудочно-кишечном тракте животных, но при этом эти фрагменты не были обнаружены в крови и тканях. Более того, эксперимент *in vitro* пока не показал горизонтального переноса ГМ-ДНК/генов микробам [3].

С другой стороны, экологи выступают против и не доверяют подобным результатам, ссылаясь на их недостоверность методик исследований. Противники ГМО считают, что существуют различия между генетически модифицированными культурами и традиционными селекционными растениями. Ряд исследователей прямо говорит о том, что существует широкий спектр потенциальных рисков, связанных с ГМО, включая вертикальный перенос генов, горизонтальный перенос генов, гибридизацию и устойчивость [23].

Риски утечки трансгенов оцениваются как высокие из-за загрязнения генофонда локальных сортов сельскохозяйственных культур или диких сородичей из-за перекрестного опыления с находящимся рядом полей с высаженными ГМ-культурами. Нежелательный и неконтролируемый поток генов от трансгенных линий к диким сородичам может привести к возникновению ГМО с нежелательными признаками, которые будут конкурировать и вытеснять местные виды. Критики утверждают, что применение ГМО может спровоцировать появление супер-сорняков и супер-вредителей, которые потребуют более интенсивного применения гербицидов

и пестицидов [24]. Уже были зарегистрированы эпизоды утечки генов в культуре масляного рапса к его диким родственникам, у которых имелась устойчивость к глифосату. Трансгенные утечки были зафиксированы в Мексике в местных сортах кукурузы и хлопке, что может навсегда изменить генофонд локальных сортов. Аналогичные факты были выявлены в культуре баклажана и его диких видах [25].

Другая огромная проблема ГМО – это контроль над коммерческими компаниями, которые занимаются сельским хозяйством. Изначально, ГМО являются частной собственностью, а не государственной. Биотехнологические компании полностью контролируют разработки, генетические технологии, химические производства, и другие этапы получения ГМО, и затем защищают полученные ГМ-продукты с помощью патентов и лицензирования. Так, например, американская компания Delta and Land Pine Company (штат Миссисипи, США) приобрела патент на ГМ-терминатор семян, который блокирует использование семян второго поколения (семена не дают всходов). Как утверждалось, метод терминатора семян решит проблему загрязнения генофонда родственных диких видов растений, поскольку стерильные семена, произведенные ГМ-культурами, не дадут потомства. Однако, в реальности это приводит к недоступности семян сельскохозяйственных культур для фермеров, которые не смогут получать семена для повторной высадки. В результате фермеры должны будут подписывать контракты на пересадку, поставку и консервацию семян каждый год. Вместе с тем, желая поучать обильный урожай каждый год, фермеры быстро перейдут с традиционных местных сортов на ГМ-виды, что приведет к огромным потерям в биоразнообразии. В этой связи необходим постоянный мониторинг потенциальных вредных воздействий на диких сородичей от трансгенных культур для адекватной оценки рисков утечки модифицированных генов [3].

Отсутствие доступа общественности к нормативной информации о расположении полей и фермерских участков, где выращивают ГМ-культуры, дало старт началу кампании против ГМО в Чили в 2011 году [26]. Протест был поддержан различными организациями, фермерами, «зелеными» законодателями и анти-ГМ группами. В Мексике под давлением общественности был инициирован запрет на ГМ-кукурузу и ограничено применение новых семян ГМ-хлопка. Отказ от получения разрешения на высадку ГМ-хлопка привел к значительному сокращению хлопковых плантаций (на 30-35% в 2020 г.) и урожайности, поскольку теперь производители могут получить доступ только к сортам хлопка с низкой урожайностью и неэффективной защитой от вредителей. Это негативно сказалось на текстильной промышленности в Мексике. В некоторых странах ЕС, таких как Польша, противодействие распространению и выращиванию ГМ-культур достигает 60% среди населения [27].

В Китае незаконные обширные посадки и производство ГМ-риса без разрешенного сертификата привели к тому, что ЕС заблокировал импорт ГМ-риса (Bt Shanyo 63) на свой рынок и ужесточил правила, регулирующие импорт ГМ-риса из КНР [72]. Другие страны, такие как Россия, Израиль, Норвегия и Нидерланды, ограничили выращивание и коммерческое использование ГМ-культур [3].

### **Заключение**

Биотехнологии развиваются и открывают новые возможности для производства продуктов питания и получения новых источников энергии. Особенно это актуально для стран, где все еще имеет место нехватка продовольствия для населения. Обеспечение продовольственной безопасности в области сельского хозяйства – также одно из неоспоримых преимуществ. При помощи трансгенных технологий создают растения, богатые целлюлозой для производства биотоплива. Трансформация генов позволяет повысить медицинскую ценность определенных видов, получить

растения, устойчивые к агрессивной окружающей среде и стрессам, повысить содержание питательных веществ и биомолекул, необходимых для продовольственной продукции лекарственных препаратов. Методы биотехнологий, которые позволяют встраивать новые гены, позволяют селекционерам производить сорта с улучшенными генетическими признаками, что было невозможно раньше. Растущий во всем мире спрос на подобные результаты в данных сферах требует разработки стратегий генетической трансформации для большего количества видов растений. Ряд стран ведут интенсивные работы в сфере агrobiотехнологий, но лидирующие позиции по разработкам и применению трансгенной продукции остаются за США и Китаем.

Вместе с тем, несмотря на преимущества генетических технологий, растет озабоченность в отношении регулирования и контроля за применением и распространением ГМО и ГМ-продукции. Законодательство по эффективному и безопасному использованию продуктов ГМ-растений должно учитывать как преимущества, так и риски с точки зрения здоровья человека и влияния на окружающую среду.

#### **Список источников**

1. UN News. Over 820 Million People Suffering from Hunger; New UN Report Reveals Stubborn Realities of ‘Immense’ Global Challenge. UN News. 2019. <https://news.un.org/en/story/2019/07/1042411>
2. Alexandratos, N.B.J. World Agriculture Towards 2030/2050. The 2012 revision. Food and agriculture organization of the United Nations. ESA working paper no. 12-03. 2012. Available online: <https://www.fao.org/3/ap106ee.pdf> (accessed on 11 January 2023).
3. Ghimire, B.K.; Yu, C.Y.; Kim, W.-R.; Moon, H.-S.; Lee, J.; Kim, S.H.; Chung, I.M. Assessment of Benefits and Risk of Genetically Modified Plants and Products: Current Controversies and Perspective. Sustainability 2023, 15, 1722. <https://doi.org/10.3390/su15021722>

4. Ventura, M.V.A.; Batista, H.R.F.; Bessa, M.M.; Pereira, L.S.; Costa, E.M.; Oliveira, M.H.R. de. Comparison of conventional and transgenic soybean production costs in different regions in Brazil. *Res. Soc. Dev.* 2020, 9, e154973977–e154973977.
5. Gatew, H.; Mengistu, K. Genetically modified foods (GMOs); a review of genetic engineering. *J. Life Sci. Biomed.* 2019, 9, 157-163.
6. Szenkovics, D.; Tonk, M.; Balog, A. Can genetically modified (GM) crops act as possible alternatives to mitigate world political conflicts for food? *Food Energy Secur.* 2021, 10, e268.
7. Houdebine, L.M. Impacts of genetically modified animals on the ecosystem and human activities. *Glob. Bioeth.* 2014, 25, 3–18.
8. Paine, J.A.; Shipton, C.A.; Chaggar, S.; Howells, R.M.; Kennedy, M.J.; Vernon, G.; Wright, S.Y.; Hinchliffe, E.; Adams, J.L.; Silverstone, A.L.; et al. Improving the nutritional value of Golden Rice through increased pro-vitamin A content. *Nat. Biotechnol.* 2005, 23, 482–487.
9. Ayaz, M.; Ali, Q.; Farzand, A.; Khan, A.R.; Ling, H.; Gao, X. Nematicidal volatiles from bacillus atrophaeus gbsc56 promote growth and stimulate induced systemic resistance in tomato against meloidogyne incognita. *Int. J. Mol. Sci.* 2021, 22, 5049.
10. Collins, C.; Laturus, F.; Nepovim, A. Remediation of BTEX and trichloroethene. Current knowledge with special emphasis on phytoremediation. *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.* 2002, 9, 86–94.
11. Sala, F.; Rigano, M.M.; Barbante, A.; Basso, B.; Walmsley, A.M.; Castiglione, S. Vaccine antigen production in transgenic plants: Strategies, gene constructs and perspectives. *Vaccine* 2003, 21, 803–808.
12. Marsian, J.; Fox, H.; Bahar, M.W.; Kotecha, A.; Fry, E.E.; Stuart, D.I.; Macadam, A.J.; Rowlands, D.J.; Lomonossoff, G.P. Plantmade polio type 3 stabilized VLPs—A candidate synthetic polio vaccine. *Nat. Commun.* 2017, 8, 1–9.



13. Yoo, J.H.; Seong, E.S.; Ghimire, B.K.; Heo, K.; Jin, X.; Yamada, T.; Clark, L.V.; Sacks, E.J.; Yu, C.Y. Establishment of *Miscanthus sinensis* with decreased lignin biosynthesis by *Agrobacterium*–mediated transformation using antisense COMT gene. *Plant Cell Tissue Organ Cult.* 2018, 133, 359–369.
14. Van Camp, W. Yield enhancement genes: Seeds for growth. *Curr. Opin. Biotechnol.* 2005, 16, 147–153.
15. Hu, L.; Zhou, K.; Liu, Y.; Yang, S.; Zhang, J.; Gong, X.; Ma, F. Overexpression of MdmIPS1 enhances salt tolerance by improving osmosis, ion balance, and antioxidant activity in transgenic apple. *Plant Sci.* 2020, 301, 110654.
16. Prakash, D.; Verma, S.; Bhatia, R.; Tiwary, B.N. Risks and Precautions of Genetically Modified Organisms. *ISRN Ecol.* 2011, 369573.
17. Deepa, A. *Genetically Modified Foods: Benefits and Risks*; Massachusetts Medical Society: Boston, MA, USA, 2015.
18. Chekol, C. The Health Effects of Genetically Modified Foods: A Brief Review. *Int. J. Nutr. Sci.* 2021, 6, 1047.
19. Tudisco, R.; Lombardi, P.; Bovera, F.; Cutrignelli, M.I.; Mastellone, V.; Terzi, V.; Avallone, L.; Infascelli, F. Genetically Modified Soya Bean in Rabbit Feeding: Detection of DNA fragments and evaluation of metabolic effects by enzymatic analysis. *J. Anim. Sci.* 2006, 82, 193–99.
20. Cribbs, A.P.; Perera, S.M. Focus: Genome editing: Science and bioethics of CRISPR-Cas9 gene editing: An analysis towards separating facts and fiction. *Yale J. Biol. Med.* 2017, 90, 625.
21. Akinbo, O.; Obukosia, S.; Ouedraogo, J.; Sinebo, W.; Savadogo, M.; Timpo, S.; Mbabazi, R.; Maredia, K.; Diran Makinde, D.; Ambali, A. Commercial release of genetically modified crops in Africa: Interface between biosafety regulatory systems and varietal release systems. *Front. Plant Sci.* 2021, 12, 605937.
22. de Vos, C.J.; Swanenburg, M. Health effects of feeding genetically modified (GM) crops to livestock animals: A review. *Food Chem. Toxicol.* 2018, 117, 3–12.

23. Breckling, B.; Reuter, H.; Middelhoff, U.; Glemnitz, M.; Wurbs, A.; Schmidt, G.; Windhorst, W. Risk indication of genetically modified organisms (GMO): Modelling environmental exposure and dispersal across different scales: Oilseed rape in Northern Germany as an integrated case study. *Ecol. Indic.* 2011, 11, 936–941.
24. Lundquist, K.A. Unapproved genetically modified corn: it's what's for dinner. *Iowa Law Rev.* 2015, 100, 825–851.
25. Acevedo, F.; Huerta, E.; Burgeff, C.; Koleff, P.; Sarukhan, J. Is transgenic maize what Mexico really needs? *Nat. Biotechnol.* 2011, 29, 23–4.
26. Kang 254. Rzymiski, P.; Królczyk, A. Attitudes toward genetically modified organisms in Poland: To GMO or not to GMO? *Food Sec.* 2016, 8, 689–97.
27. Rzymiski, P.; Królczyk, A. Attitudes toward genetically modified organisms in Poland: To GMO or not to GMO? *Food Sec.* 2016, 8, 689–97.

© Жиганова Л.П., 2024. *Московский экономический журнал, 2024, № 10.*