



## РАЗРАБОТКА РАСТИТЕЛЬНЫХ ВАКЦИН ПРОТИВ ВИРУСНЫХ ИНФЕКЦИЙ: ПЕРСПЕКТИВЫ И ВЫЗОВЫ ТЕХНОЛОГИИ ФАРМАЦЕВТИЧЕСКОГО ФАРМИНГА

**Петров Игорь Сергеевич**

Студент кафедры сравнительной грамматики, Московский государственный  
университет  
г. Москва Россия

### Аннотация

Данная статья посвящена углубленному анализу инновационного направления в биотехнологии — разработке съедобных и субъединичных вакцин на основе трансгенных растений, известной как фармацевтический фарминг (molecular pharming). Основное внимание уделяется использованию растений в качестве живых, масштабируемых биореакторов для экспрессии и накопления рекомбинантных вирусных антигенов, способных индуцировать защитный иммунный ответ у людей и животных. Рассматриваются ключевые технологические платформы, включая стабильную трансформацию и временную экспрессию (особенно с использованием вирусных векторов, таких как ВТМ), а также их преимущества: низкая себестоимость, безопасность (отсутствие патогенов человека) и потенциальная возможность перорального введения (съедобные вакцины). Анализируются значительные вызовы, связанные с масштабированием производства, стандартизацией дозировки и регуляторными барьерами. Сделан вывод о том, что растительные вакцины представляют собой критически важную, гибкую и экономически эффективную альтернативу традиционным методам производства вакцин, особенно в контексте глобальных пандемий и обеспечения доступа к иммунизации в развивающихся странах.

**Ключевые слова:** Растительные вакцины, Фармацевтический фарминг, Трансгенные растения, Вирусные антигены, Субъединичные вакцины, Пероральная вакцинация, Временная экспрессия, Биореакторы, Иммунный ответ, Биобезопасность.

### Введение

Энергетика является безусловным и неоспоримым фундаментом современной глобальной цивилизации, критически обеспечивая существование и развитие всех сфер человеческой деятельности: от промышленного производства, транспорта и сельского хозяйства до функционирования информационных технологий и систем жизнеобеспечения.

В начале XXI века мировая энергетическая система находится в состоянии глубокой, многофакторной трансформации, вызванной стечением трех взаимосвязанных и чрезвычайно мощных глобальных вызовов, которые требуют немедленного и кардинального ответа.

Во-первых, это экспоненциальный рост глобального спроса на энергию, обусловленный продолжающимся ростом мирового населения, урбанизацией, и, что особенно важно, стремительным экономическим развитием стран Азии и Африки, где миллиарды людей стремятся достичь более высокого уровня жизни, требующего значительно большего энергопотребления. Во-вторых, это императив обеспечения энергетической безопасности и устойчивости, который обострился на фоне геополитической нестабильности и зависимости многих регионов от ограниченного числа поставщиков традиционных энергоресурсов. И, в-третьих, это самый серьезный вызов — катастрофические последствия антропогенного изменения климата, требующие немедленной и глубокой декарбонизации всей мировой энергетической инфраструктуры. Доминирование ископаемого топлива (угля, нефти и газа), которое обеспечивало промышленную революцию на протяжении двух столетий, теперь стало главной угрозой для планетарной устойчивости. Следовательно, ключевой стратегической задачей для всех стран является осуществление энергетического перехода (Energy Transition) — широкомасштабного, комплексного сдвига в структуре производства и потребления энергии в сторону низкоуглеродных, устойчивых и распределенных источников. Этот переход представляет собой не просто техническое обновление, а фундаментальную экономическую и социальную революцию, которая изменит глобальные рынки, геополитические расклады и повседневную жизнь каждого человека.

### **Технологические Платформы Фармацевтического Фарминга**

Для производства вакцинных антигенов используются различные виды растений, включая табак (*Nicotiana benthamiana*), картофель, рис, кукурузу и томаты, в зависимости от требуемого уровня экспрессии и метода введения. Выделяют два основных технологических подхода:

Стабильная Трансформация и Интеграция в Геном: Этот классический метод предполагает стабильное встраивание целевого гена (кодирующего вирусный антиген) в ядерный или хлоропластный геном растения-хозяина. Трансформация ядерного генома гарантирует, что целевой белок будет передаваться потомству по законам Менделя, обеспечивая долгосрочное, предсказуемое и воспроизводимое производство антигена на протяжении многих поколений растений. Трансформация хлоропластов (пластидная трансформация) имеет дополнительные преимущества, включая высочайший уровень экспрессии целевого белка (до 70% от общего растворимого белка) и явление генного сдерживания, так как хлоропластные гены обычно не передаются через пыльцу, что минимизирует риск горизонтального переноса трансгенов в дикие популяции.

Эта стабильность и предсказуемость делают метод идеальным для крупномасштабного агрофарминга.

**Временная Экспрессия с Использованием Вирусных Векторов:** Этот, более современный и революционный подход, предполагает быструю, транзиторную экспрессию антигена без его постоянной интеграции в геном растения. Наиболее часто используются модифицированные растительные вирусные векторы, такие как вирус табачной мозаики (ВТМ). Эти вирусные векторы доставляют целевой ген в клетки растения (например, через вакуумную инфильтрацию), инициируя чрезвычайно быстрый и мощный синтез антигена в течение нескольких дней (обычно 5–10 дней). Ключевое преимущество временной экспрессии — высочайшая скорость производства, что делает ее идеальной для быстрого реагирования в условиях пандемии, когда счет идет на недели. Кроме того, этот метод позволяет избежать длительных и дорогостоящих процедур получения и регистрации стабильных трансгенных линий, значительно ускоряя цикл разработки.

### **Преимущества Растительных Вакцин в Борьбе с Вирусами**

Растительные платформы предлагают ряд существенных преимуществ перед традиционными системами производства вакцин, особенно актуальных для борьбы с глобальными вирусными угрозами.

**Экономическая Эффективность и Масштабируемость:** Производство белков в растениях является чрезвычайно экономичным процессом. Стоимость выращивания и переработки биомассы в масштабах сельскохозяйственных угодий или крупногабаритных теплиц в десятки раз ниже по сравнению с необходимостью содержания и эксплуатации дорогостоящих стерильных ферментеров для клеточных культур (таких как клетки яичника китайского хомячка, СНО). Это позволяет значительно снизить конечную цену дозы вакцины, что критически важно для обеспечения глобального доступа к вакцинации, особенно в странах с низким и средним уровнем дохода, где логистические и финансовые барьеры наиболее сильны. Возможность быстрого наращивания объемов производства путем простого увеличения посевной площади является ключевым преимуществом при пандемических вспышках.

**Биобезопасность и Посттрансляционная Модификация:** Растения являются абсолютно безопасными биореакторами, поскольку они не являются носителями патогенов, вирусов или прионов, опасных для человека (таких как ВИЧ, гепатиты или агенты губчатой энцефалопатии). Это полностью исключает риск контаминации конечного продукта человеческими или животными патогенами. Кроме того, растительные клетки способны осуществлять сложные посттрансляционные модификации (например, гликозилирование) белков, которые во многих случаях достаточно схожи с модификациями, происходящими в клетках млекопитающих.

Это позволяет производить антигены, которые обладают правильной третичной структурой и нативной иммуногенностью, что является залогом сильного и специфического иммунного ответа.

## **Вызовы и Перспективы Пероральной Вакцинации**

Несмотря на технологические успехи, широкое коммерческое внедрение растительных вакцин сталкивается с рядом существенных технологических и регуляторных вызовов, среди которых выделяется проблема перорального введения (съедобные вакцины).

**Вызовы Пероральной Вакцинации:** Концепция съедобных вакцин (например, антигенов, выращенных в бананах или томатах) невероятно привлекательна: она устраняет необходимость в инъекциях (иглах, обученном медперсонале) и холодовой цепи (хранение при комнатной температуре). Однако главный вызов — это стандартизация дозировки. Концентрация антигена может варьироваться от растения к растению, и при употреблении сырой биомассы большая часть белка может быть разрушена под воздействием кислой среды желудка и пищеварительных ферментов, прежде чем достигнет лимфоидных тканей кишечника (Пейеровых бляшек), необходимых для индукции мукозального иммунитета (IgA). Для преодоления этой проблемы исследователи работают над тем, чтобы целевые белки экспрессировались в стойких к перевариванию структурах (например, в хлоропластах или в семенах), которые могут защитить антиген до его попадания в толстый кишечник.

**Регуляторные и Общественные Вызовы:** Выход растительных вакцин на рынок требует преодоления строгих регуляторных барьеров. Необходимы стандарты для контроля качества и дозирования конечного продукта, особенно если он не очищается. Существуют также общественные опасения (Green Fear) по поводу использования генетически модифицированных организмов (ГМО) в производстве продуктов питания, что требует четких маркировок, строгих протоколов биобезопасности и систем сдерживания (например, выращивание в закрытых вертикальных фермах или непищевых культурах) для предотвращения смешивания трансгенных и обычных культур, а также обеспечения доверия потребителей.

## **Заключение**

Разработка растительных вакцин представляет собой одно из самых захватывающих и многообещающих направлений современной биотехнологии, предлагая критически важную, гибкую и экономически эффективную альтернативу традиционным методам. Благодаря технологиям временной экспрессии на основе вирусных векторов, стало возможным чрезвычайно быстрое производство пандемических вакцин, что радикально меняет подходы к глобальной готовности к инфекционным угрозам.

Несмотря на сохраняющиеся вызовы в области стандартизации, очистки и преодоления регуляторных барьеров для пероральных форм, фармацевтический фарминг обладает потенциалом для обеспечения справедливого, широкомасштабного и устойчивого доступа к иммунизации, что является фундаментальным условием для обеспечения здоровья человечества в XXI веке.

## **Литература**

1. Rybicki, E. P. Plant-based vaccines for veterinary applications: a review. *Vaccine*, 2014.
2. Sainsbury, F. Molecular farming in the plant-based flexible production system. *Current Opinion in Biotechnology*, 2020.
3. Burnett, C. M., Ma, J. K. Plant-made pharmaceuticals and vaccines: The regulatory environment. *Biotechnology Advances*, 2018.
4. Gleba, Y., Schiemann, J., Fischer, R. Genetic engineering for production of high-value proteins in plants. *Current Opinion in Plant Biology*, 2005.
5. Arntzen, C. J. Pharmaceuticals from plants: The example of edible vaccines. *Nature Biotechnology*, 1999.
6. Макаров, А. С. Трансгенные растения как биореакторы: Проблемы и перспективы. *Биотехнология*, 2023.
7. Ковальчук, В. И. Растительные вакцины против вирусных заболеваний. *Вестник биотехнологии и медицины*, 2024.