

МРНТИ 34.15.01

<https://doi.org/10.32523/2616-7034-2026-154-1-77-92>

Обзорная статья

## Модификация генома растений с применением ДНК-технологий: прогресс в области доставки экзогенных ДНК

Е.В. Дейнеко\*<sup>1</sup>, А.Н. Кеңес<sup>2</sup>, Б.Б. Тойлыбай<sup>3</sup>,  
Г.С. Ташкентбаева<sup>4</sup>, Р.М. Турпанова\*<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт цитологии и генетики Сибирского отделения Российской академии наук», Новосибирск, Россия.  
<sup>1,2,3,4,5</sup>Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан

E-mail: \*<sup>1</sup>deineko@bionet.nsc.ru, <sup>2</sup>akerke\_kenes@mail.ru, <sup>3</sup>bigaishatoilybai@gmail.com,  
<sup>4</sup>gulzamalsanzar@gmail.com, \*<sup>5</sup>rauza\_enu@mail.ru

**Аннотация.** Рассматриваются данные о доставке фрагментов экзогенных ДНК, используемых в ДНК-технологиях в качестве кассет экспрессии гетерологичных генов при создании трансгенных растений, либо в качестве инструментов для модификации геномов растений с применением методов геномного редактирования. Основной акцент сделан на рассмотрении методов доставки *in planta*, позволяющих исследователям миновать стадию культивирования растительных, включающую этап дезинтеграции растительных тканей до каллусных культур с последующим восстановлением в условиях *in vitro* растений-регенерантов. Именно этот этап модификации растительных геномов с применением современных ДНК-технологий в настоящее время привлекает внимание многих исследовательских групп. Приведены данные о перспективности использования вирусных векторов для транзientной доставки инструментов геномного редактирования в растительные клетки. Обсуждаются возможности и некоторые недостатки этой технологии, а также перспективы ее применения для сельскохозяйственных видов растений.

**Ключевые слова:** генетическая инженерия, геномное редактирование, трансген, методы доставки *in planta*, *floral dip*, вирусный вектор, индуцированное вирусом редактирование генома

### Введение

Прошло немногим более тридцати лет с момента получения первого генетически модифицированного растения, предназначенного для коммерческих целей – трансгенного томата, получившего название Flavr Savr (Хранитель вкуса) [1]. В геном этого растения был перенесен фрагмент ДНК, включающий часть гена, кодирующего

Поступила: 22.12.2025. Одобрена: 24.02.2026. Доступна онлайн: 31.03.2026.

\*Автор-корреспондент

биосинтез фермента полигалактуроназы, расположенный в составе генетической конструкции в обратной ориентации к собственному (аутентичному) растительному гену. Такое расположение гомологичных генов по отношению друг к другу стимулировало запуск механизма интерференции и приводило к разрушению продуктов его экспрессии на уровне мРНК. Так как фермент полигалактуроназы принимает участие в процессах распада пектина при созревании плодов, то его уменьшение в тканях плодов томатов обеспечивало более длительный срок их хранения.

В последующие несколько лет после регистрации первого сорта генетически модифицированного растения томата, успешно прошли испытания и другие виды растений, рекомендованные для коммерциализации. Так, например, уже к 1996 г. площади посевов, занимаемых устойчивыми к гербицидам сортами сои и канолы, а также сортами кукурузы, хлопчатника и картофеля, устойчивыми к насекомым-вредителям, составили почти 1,7 млн га в США и Канаде [2]. В последующие годы отмечен неуклонный рост площадей, занимаемых генетически модифицированными культурами. К настоящему времени площади, занимаемые под генетически модифицированными культурами, продолжают расти и достигли уже более 200 млн га [3]. Всего на этих площадях в 27 странах возделывается 10 сортов генетически модифицированных видов растений, доминирующими среди которых являются соя, занимающая 98.9 млн га и кукуруза – 66,2 млн га.

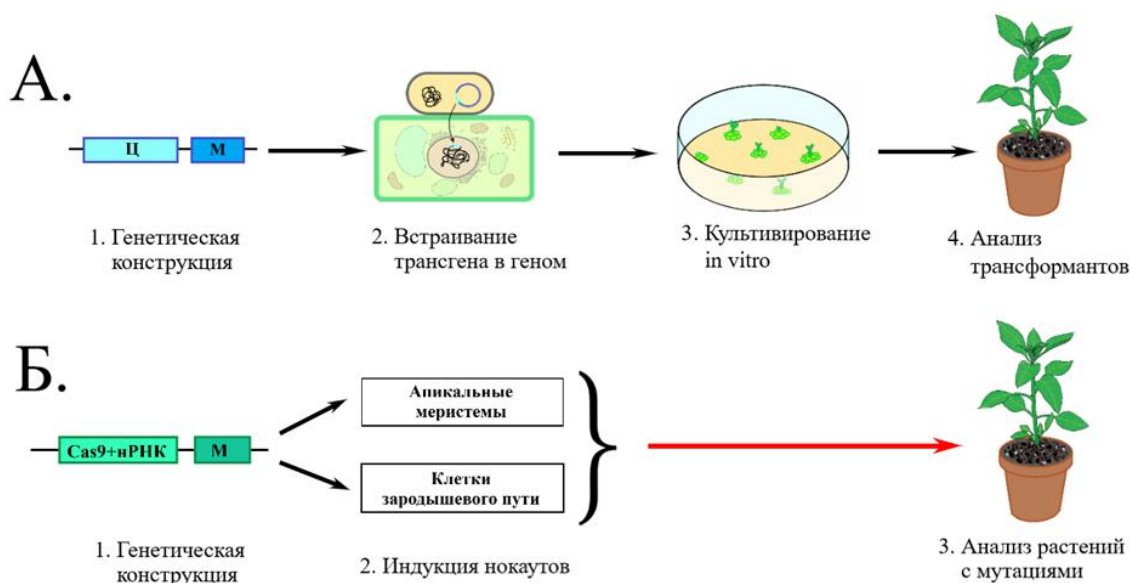
Наряду с улучшением хозяйственно-ценных характеристик важных продовольственных культур, модификация генома растений методами генетической инженерии получила широкое применение в биотехнологии, в частности в биофармацевтике, для биосинтеза рекомбинантных белков. На сегодняшний день это один из быстро развивающихся сегментов экономики, называемый иногда молекулярным фермерством. Мощное развитие за последнее десятилетие получило второе направление молекулярного фермерства, связанное с наработкой в растениях рекомбинантных белков на основе транзientной экспрессии. Благодаря максимально сжатым срокам от момента выделения антигенной последовательности до наработки больших количеств антигенов [4] это направление открыло широкие возможности для крупномасштабного производства растительных вакцин, особенно при необходимости экстренного реагирования [5].

В основе методов, позволяющих модифицировать геномы растений, были положены технологии рекомбинантных ДНК, включающие клонирование представляющих интерес для исследователя генов из различных гетерологичных систем (вирусы, бактерии, растения, животные и человек) и перенос их в составе искусственно созданных генетических конструкций в геномы растений. ДНК-технологии были достаточно быстро подхвачены практикой и за последующие 30 лет после создания первого коммерческого сорта мировым сообществом исследователей были получены сорта с улучшенными характеристиками хозяйственно-ценных признаков, а также разработаны технологии наработки рекомбинантных белков, в том числе и медицинского назначения.

Следующим этапом в развитии методов модификации растительных геномов, открывшем новые перспективы для исследователей, послужило открытие механизма, позволяющего бактериям целенаправленно разрушать ДНК бактериофагов, используя при этом ранее сохраненные копии фаговой ДНК в специфическом районе своего

генома, получившего название (CRISPR - Clustered Regularly Interspaced Palindromic Repeats) [6]. Именно эта особенность послужила основой для создания инструмента для целенаправленного внесения двуцепочечных разрывов в выбранном районе-мишени молекулы ДНК и развития технологии направленной модификации геномов, получившей название геномного редактирования. Суть этого подхода состоит в создании генетической конструкции, включающей участок ДНК, комплементарный району гена-мишени в геноме модифицируемого растения, в котором предполагается произвести двуцепочечный разрез. В качестве «молекулярных ножниц» для осуществления таких разрезов выступают нуклеазы, в частности, нуклеаза Cas9 из *Streptococcus pyogenes*. Таким образом, в результате экспрессии, доставленной и интегрированной в геном растения генетической конструкции, нуклеаза Cas9 направляется к сайту-мишени посредством направляющей мРНК (нРНК) и осуществляет в нем двуцепочечный разрез. После восстановления этого разреза репарационными системами клетки, в этом районе могут быть выявлены нарушения в составе последовательности нуклеотидов (делеции, вставки и нуклеотидные замены), приводящие к мутациям соответствующих генов. Следует обратить особое внимание на тот факт, что при нокаутировании целевых генов все фрагменты чужеродной ДНК, объединенные в составе генетической конструкции и обозначаемые иногда как инструменты геномного редактирования, и мутации, индуцированные этими инструментами, могут быть распределены в разные гаметы в результате комбинаторных событий в мейозе. Таким образом, растения с нокаутами, приводящими к улучшению хозяйственно ценных признаков, не несут в геноме дополнительных фрагментов чужеродных ДНК. В настоящее время ДНК-технология с применением CRISPR/Cas привлекает все более пристальное внимание исследователей как революционная технология, позволяющая модифицировать геномы растений в соответствии с необходимостью улучшения их характеристик в связи с изменяющимися условиями окружающей среды [7]. На рисунке 1 схематично представлены основные этапы ДНК-технологий, применяемых исследователями для улучшения тех или иных характеристик у растений, в том числе и у их хозяйственно ценных видов.

В целом, технология создания трансгенных растений с применением генно-инженерных методов включает 4 основных этапа, направленных на поиск целевого гена, его клонирование и создание генетической конструкции (1 этап) с последующим ее переносом на втором этапе в геном растения с применением различных методов доставки – векторная и биобаллистическая трансформация (Рисунок 1, А). Третий этап связан с отбором трансформированных клеток на селективных средах с добавлением селективных агентов (антибиотики, гербициды и др.) и восстановлением из них в условиях *in vitro* полноценных растений-трансформантов. Следует отметить, что этот этап представляется не только как наиболее продолжительный или время затратный по сравнению с двумя предшествующими этапами, но и приложимый не ко всем видам растений, в частности к тем, для которых процедура восстановления полноценных растений из клеточной культуры недостаточно разработана или совсем отсутствует. Четвертый этап получения трансгенных растений применением ДНК-технологий связан с анализом полученных *in vitro* растений-трансформантов и подтверждением их трансгенного статуса с применением методов молекулярно-биологического анализа, а также дальнейшей адаптацией к условиям выращивания в грунте и тестированием улучшенных характеристик с применением соответствующих методов и подходов.



**Рисунок 1.** Основные этапы модификации генома растений с применением ДНК-технологий. **А)** модификация генома с применением генетической инженерии; **Б)** модификация геномов с применением геномного редактирования; Ц – целевой ген; М – маркерный ген; Cas9-нРНК – инструмент для геномного редактирования

Технология модификации генов растений с применением геномного редактирования (Рисунок 1, Б) включает работы по созданию инструментария для проведения нокаутов целевых генов (этап 1), которые могут быть далее доставлены в геном растения двумя путями – с использованием векторной или биобаллистической доставки. Тот факт, что доставленные инструменты для геномного редактирования представляются необходимыми только на стадии нокаутирования целевого гена, стимулировало исследователей на поиск новых способов доставки инструментов непосредственно к целевым тканям растения, позволяющих исключить стадию их дезинтеграции для последующего отбора клеток с мутациями и восстановлением из них полноценных растений с мутантным фенотипом. Именно этот этап модификации геномов с применением современных ДНК-технологий привлекает внимание многих исследовательских групп, поскольку возможность исключения стадии культивирования *in vitro* существенно упрощает сам процесс модификации растительных геномов, что представляется чрезвычайно важным для модификации геномов хозяйственно-ценных видов растений, а также тех видов растений, для которых протоколы регенерации полноценных растений затруднены или слабо разработаны. Таким образом, на втором этапе создания растений с мутациями по целевым генам-мишеням исследователями могут быть использованы не только уже хорошо зарекомендовавшие себя способы агробактериальной и биобаллистической трансформации, но и методы доставки *in planta*, ориентированные в дальнейшем на исключение стадии 3, связанной с культивированием растительных тканей *in vitro*, и переходом к стадии 4, нацеленной на тестирование индуцированных мутаций у полученных отредактированных растений.

В предлагаемом обзоре основное внимание будет сосредоточено на развитии методов доставки экзогенных ДНК при модификации растений с применением ДНК-технологий, связанных с доставкой *in planta*, т.е. при исключении стадии культивирования *in*

*in vitro*. Так как доставка инструментов для геномного редактирования и генетических конструкций при создании трансгенных растений с применением метода «*floral dip*» рассмотрены нами ранее [8], в данном обзоре акцент будет сделан на другие методы и подходы, обеспечивающие доставку экзогенных ДНК в геномы растительных клеток, исключая стадии культивирования модифицированных клеток *in vitro*.

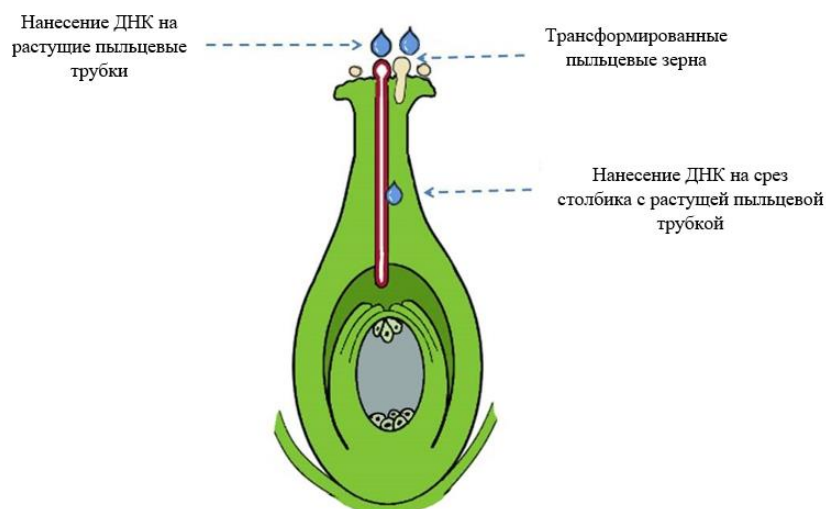
## Методы трансформации растений *in planta*

### Концепция трансформации *in planta*

Генетическая трансформация многих видов растений, основанная на подходах культивирования трансформируемых растительных клеток и тканей, культивируемых *in vitro*, может быть трудоемким процессом, требующим асептических условий и регенерации растений-трансформантов. Необходимо отметить, что в отличие от традиционных методов, стратегии *in planta* практически не требуют длительного нахождения эксплантов *in vitro*, однако очень сильно различаются между собой по своим механизмам действия, а также по типам целевых органов [9-11]. В связи с этим, концепция трансформации *in planta* была пересмотрена группой исследователей под руководством доктора Луизы Донахью, которые переопределили этот процесс как способ генетической трансформации растений с отсутствием или минимальными этапами культивирования тканей *in vitro* [12]. Рассмотрим некоторые примеры трансформации растительных тканей согласно этой концепции. Общей чертой, объединяющей все нижеприведенные примеры, является тот факт, что ткани-мишени, в которые доставляются генетические конструкции или инструменты геномного редактирования, обладают высоким морфогенетическим потенциалом (меристемы), либо относятся к тканям генеративных путей растений (семяпочки, пыльники, пыльца, яйцеклетка).

### Трансформация *in planta* без культивирования *in vitro*

На рисунке 2 представлены примеры использования для трансформации различных тканей-мишеней, позволяющих миновать этап культивирования растительных тканей *in vitro*. К таким типам тканей относятся ткани генеративного пути растений.

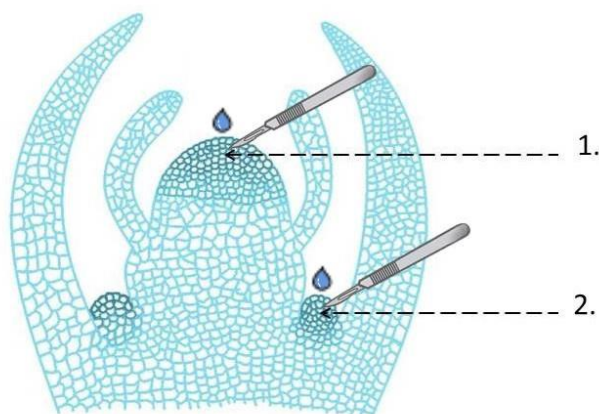


**Рисунок 2.** Примеры трансформации *in planta*, нацеленной на ткани-мишени генеративного пути растений

Следует отметить, что среди методов, позволяющих доставлять фрагменты экзогенных ДНК непосредственно к тканям генеративного пути, относится хорошо зарекомендовавший себя метод *floral dip* (рис. 2а), с применением которого удалось успешно осуществить перенос генетических конструкций более чем у 10 видов растений [8]. Известны успешные примеры трансформации пыльцы (рис. 2б) с последующим ее нанесением на рыльца пестиков цветков [13-15]. Однако этот метод эффективен не для широкого круга растительных видов, например, для однодольных отмечена его низкая эффективность [16]. Исследователями рассмотрены пути доставки экзогенной ДНК в геном растений через растущие пыльцевые трубки [17]. ДНК, нанесенная на отрезанный (укороченный) столбик растения-реципиента, транспортируется по пыльцевой трубке и вместе со спермиями и вегетативным ядром попадает через микропиле в восьмиядерный зародышевый мешок и далее в зиготу (рис. 2в). Протоколы для этой стратегии опубликованы к настоящему времени для более чем двух десятков видов растений [18-20]. Модификация этого метода, связанная с полным удалением столбика пестика после опыления и последующим нанесением экзогенной ДНК, позволила повысить эффективность трансформации сои до 11 % [21]. Итак, на основании вышеприведенных примеров очевидно, что разработанные к настоящему времени методы и подходы введения экзогенной ДНК непосредственно к тканям генеративного пути растений, позволяют успешно применять их для генетической модификации растительных геномов, в том числе у хозяйственно-ценных видов.

#### *Трансформация in planta с минимальным культивированием in vitro*

Способность непрерывно поддерживать активно растущие верхушечные побеги, из которых формируются органы растения, является уникальной особенностью цветковых растений. Ткани таких побегов получили специальное название – апикальные меристемы. Клетки апикальных меристем функционально аналогичны стволовым клеткам животных и служат постоянным источником плюрипотентных стволовых клеток, потомки которых включаются в зачатки органов [22]. Трансформация апикальных меристем универсальна и может быть осуществлена практически на любой жизненной стадии растения, т.е. от сеянца до взрослой стадии [23].



**Рисунок 3.** Примеры трансформации *in planta*, нацеленной на меристематические ткани побега в качестве мишеней: 1) нанесение ДНК на места поранений апикальной меристемы побега; 2) нанесение ДНК на места поранений меристем боковых побегов

На рисунке 3 представлены различные пути и приемы трансформации *in planta* с использованием в качестве тканей-мишеней апикальных и адвентивных меристем. Трансформацию *in planta* с применением апикальных меристем условно можно разделить на следующие этапы, первый из которых включает механическое поранение апикальной меристемы с помощью иглы или скальпеля (Рисунок 3). Второй этап включает нанесение агробактериальной суспензии на поврежденную область с последующим сбором семян. То на третьем этапе и их тестированием по устойчивости к селективному агенту на четвертом этапе [24]. В литературе описано достаточно много различных модификаций трансформации *in planta* для различных видов растений, как двудольных, так и однодольных. В таблице 1 приведены данные по использованию описываемого метода для получения как трансгенных растений, так и для целей геномного редактирования.

**Таблица 1**

**Системы трансформации/регенерации, основанные на использовании апикальных меристем**

Название растения	Ссылка на источник
Огурец посевной ( <i>Cucumis sativus</i> )	Baskaran et al., 2016; [25]
Петуния ( <i>Petunia hybrida</i> )	Ulian et al., 1990; [26]
Рыжик посевной ( <i>Camelina sativa</i> )	Sitther et al., 2019; [27]
Хризантема далматинская ( <i>Tanacetum cinerariifolium</i> )	Li et al., 2022; [28]
Хлопчатник ( <i>Gossypium hirsutum</i> )	Ganesan et al., 2019; [29]
Пшеница ( <i>Triticum aestivum</i> )	Hamada et al., 2018; [30]
Просо пальчатое ( <i>Eleusine coracana</i> )	Satish et al., 2017; [31]
Щетинник итальянский ( <i>Setaria italica</i> )	Cesar et al., 2017; [32]
Просо африканское ( <i>Pennisetum glaucum</i> )	Jha et al., 2011; [33]
Рис посевной ( <i>Oryza sativa</i> )	Arockiasamy et al., 2007; [34]

### Вирусные векторы

Использование вирусов растений в качестве инструментов для ДНК-технологий давно привлекало внимание многих групп исследователей [35]. Первые примеры использования вирусов для этих целей были связаны с попытками инактивирования генов стрессоустойчивости у важных сельскохозяйственных видов растений [36], а также с их использованием в качестве инструментов доставки для редактирования генов-мишеней в CRISPR/Cas подходах для индукции нокаутов генов-мишеней [37]. С применением обширных данных по аннотированию функций многих вирусов, в том числе и вирусов растений, накоплением новых данных об их особенностях взаимодействия с организмом хозяина, существенно расширилось использование вирусов в биотехнологии [38]. Развитие и совершенствование ДНК-технологий с использованием вирусных векторов для доставки инструментов редактирования стимулировало и интерес к методам трансформации *in planta* [39, 40]. Именно технологии редактирования растительных геномов послужили хорошим толчком к пересмотру и оптимизации способов доставки фрагментов экзогенных ДНК в геномы растений и, в частности, стратегий временной (транзиентной) трансформации. Поскольку редактирования (нокауты генов-мишеней) не требуют наличия самих инструментов (Cas9 и направляющей РНК) в геноме потомков от самоопыления исходного (То) отредактированного растения, векторы на основе

вирусов представляются весьма привлекательными для совершенствования самой технологии в направлении способов доставки.

Несмотря на то, что верхушечные меристемы, как правило, свободны от вирусов, все же некоторые вирусы способны заселять и эти области растительной ткани [37, 41]. Именно эта особенность вируса погремковости табака была использована для создания довольно оригинального инструмента для редактирования растительного генома [42]. Суть этой работы состояла в том, что последовательность гена FT (FLOWERING LOCUS T) была слита с последовательностью РНК, направляющей нуклеазу Cas9 к району-мишени. Так как ген FT кодирует белок, являющийся ключевым системным сигналом, запускающим процесс цветения у растений, то клонировав его в вирусный вектор, исследователи смогли получить мобильный инструмент для редактирования сверхэкспрессирующих белок Cas9 растений, доставляемый в ткани апикальных меристем в варианте доставки *in planta*. Данный пример представляет собой удачное сочетание применения двух ДНК-технологий – генной инженерии и геномного редактирования как инструмента для индукции нокаутов в целевых районах генов-мишеней. Данная технология осуществляется в два этапа – на первом из них ген, кодирующий нуклеазу Cas9, переносится в геном растения, среди потомков от самоопыления которого отбираются линии со сверхэкспрессией этого гена. На втором этапе эти линии используются для доставки мобильного инструмента в апикальные меристемы методом *in planta*. Таким образом, белок, являющийся системным сигналом цветения, доставляется в составе вектора на основе вируса погремковости табака, именно в эти ткани-мишени, так как этот вирус способен колонизировать и апикальные меристемы растений. Впоследствии эта мобильная система редактирования была отнесена к универсальным, так как была подтверждена ее совместимость с другими вирусами [43, 44]. В настоящее время наблюдается повышенный интерес исследователей к разработке методов и подходов доставки экзогенных ДНК в геномы растительных клеток в варианте *in planta* [45–47].

## Заключение

Совершенствование современной биологии растений на стадии ее постгеномного развития напрямую связано с технологиями модификации геномов, включающих генетическую инженерию и геномное редактирование. Дальнейший прогресс в этом направлении просматривается в развитии таких этапов ДНК-технологий, которые бы позволили сократить сроки получения предполагаемых целевых модификаций растительных геномов, а также упростить саму процедуру их модификации. В предлагаемом обзоре приведены результаты работ различных коллективов исследователей, связанные с упрощением доставки фрагментов экзогенных ДНК, в том числе прямой доставки, минуя стадию культивирования растительных клеток *in vitro* с последующими процедурами восстановления растений-регенерантов. Обсуждаемые подходы являются основой для дальнейшего прогресса в направлении развития работ по модификации генома растений. Рассмотрены перспективы доставки инструментов геномного редактирования в растительные клетки для улучшения различных хозяйственно-ценных характеристик, в том числе для важных сельскохозяйственных видов растений.

## Вклад авторов

Д.Е. – разработка концепции, написание текста; Т.Р. – научное руководство работой; К.А., Т.Б. и Т.Г. – редактирование статьи.

## Финансирование

Работа выполнена в рамках программы «Зарубежный ученый» 2024-2025.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## Соблюдение этических норм

Настоящая статья не содержит описания выполненных авторами исследований с участием людей или использованием животных в качестве объектов.

## Список литературы

1. Herrera-Estrella L, Depicker A, Van Montagu M, Schell J. Expression of chimaeric genes transferred into plant cells using a Ti-plasmid-derived vector. *Nature*. 1983;303:209-210. <https://doi.org/10.1038/303209a0>
2. James C. Global Status of Commercialized Biotech. *GM Crops*. 2010;42:362.
3. Zagorskaya A, Deineko E. Plant-expression systems: a new stage in production of biopharmaceutical preparations. *Russian Journal of Plant Physiology*. 2021;68(1):17-31. <https://doi.org/10.1134/S1021443721010210>
4. D'Aoust M, Couture M, Charland N, et al. The production of hemagglutinin-based virus-like particles in plants: A rapid, efficient and safe response to pandemic influenza. *Plant Biotechnology Journal*. 2010;8(5):607-619. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7652.2009.00496>
5. Ward B, Séguin A, Couillard J, Trépanier S, Landry N. Phase III: randomized observer-blind trial to evaluate lot-to-lot consistency of a new plant-derived quadrivalent virus-like particle influenza vaccine in adults 18-49 years of age. *Lancet*. 2021;396:1491-1503. <https://doi.org/10.1016/j.vaccine.2021.01.004>
6. Jinek M, Chylinski K, Fonfara I, et al. A programmable dual RNA-guided DNA endonuclease in adaptive bacterial immunity. *Science*. 2012;337:816-821. <https://doi.org/10.1126/science.1225829>
7. Gan W, Ling A. CRISPR/Cas9 in plant biotechnology: applications and challenges. *BioTechnologia*. 2022;103(1):81-93. <https://doi.org/10.5114/bta.2022.113919>
8. Дейнеко Е, Калкабаев А, Жанабаева А, и др. Модификация геномов растений методами генетической инженерии и геномного редактирования: доставка экзогенных ДНК. *Вестник Евразийского национального университета имени Л.Н. Гумилева*. 2025;1:101-116. <https://doi.org/10.32523/2616-7034-2025-150-1-101-11>
9. Karthik S, Pavan G, Prasanth A, et al. Improved in planta genetic transformation efficiency in bitter melon (*Momordica charantia* L). *Vitr Cell Dev Biol(Plant)*. 2021;57(2):190-201. <https://doi.org/10.1007/s11627-021-10160-w>
10. Rizwan H, Yang Q, Yousef A, et al. Establishment of a novel and efficient agrobacterium-mediated in planta transformation system for passion fruit (*Passiflora edulis*). *Plants*. 2021;10(11):2459. <https://doi.org/10.3390/plants10112459>
11. Khadgi A, Sagawa C, Vernon C, Mermaz B, Irish V. Optimization of in planta methodology for genome editing and transformation in Citrus. *Frontiers in Plant Science*. 2024;15:1438031. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1438031>
12. Belanger J, Copley T, Hoyos-Villegas V, Charron J, O'Donoghue L. A comprehensive review of in planta stable transformation strategies. *Plant Methods*. 2024;20:79. <https://doi.org/10.1186/s13007-024-01200-8>
13. Eapen S. Pollen grains as a target for introduction of foreign genes into plants: an assessment. *Physiol Mol Biol Plants*. 2011;17(1):1-8. <https://doi.org/10.1007/s12298-010-0042-6>
14. Wang J, Li Y, Liang C. Recovery of transgenic plants by pollen-mediated transformation in Brassica juncea. *Transgenic Research*. 2008;17(3):417-424. <https://doi.org/10.1007/s11248-007-9115-x>

15. Zhao X, Meng Z, Wang Y, et al. Pollen magnetofection for genetic modification with magnetic nanoparticles as gene carriers. *Nat Plants* [Электронный ресурс]. 2017;3:956-964. <https://doi.org/10.1038/s41477-017-0063-z>
16. Vejlupekova Z, Warman C, Sharma R, et al. No evidence for transient transformation via pollen magnetofection in several monocot species [Internet]. *Nature Plants*. 2020;6:1323-1324 [cited 2025 Feb 10]. Available from: <https://doi.org/10.1038/s41477-020-00798-6>
17. Wang M, Sun R, Zhang B, Wang Q. Pollen tube pathway-mediated cotton transformation [Internet]. In: Zhang B, editor. *Methods in Molecular Biology*. New York (NY): Springer; 2019. p.67-73 [cited 2025 Feb 10]. Available from: [https://doi.org/10.1007/978-1-4939-8952-2\\_6](https://doi.org/10.1007/978-1-4939-8952-2_6)
18. Zhang T, Chen T. Cotton pistil drip transformation method [Internet]. In: Dunwell JM, Wetten AC, editors. *Transgenic Plants: Methods and Protocols*. Totowa (NJ): Springer; 2012. p.237-243 [cited 2025 Feb 10]. Available from: [https://doi.org/10.1007/978-1-61779-558-9\\_20](https://doi.org/10.1007/978-1-61779-558-9_20)
19. Zhang Y, Yin X, Yang A, Li G, Zhang J. Stability of inheritance of transgenes in maize (*Zea mays* L.) lines produced using different transformation methods. *Euphytica*. 2005;144(1-2):11-22. <https://doi.org/10.1007/s10681-005-4560-1>
20. Xi Y, Lin Y, Zhang Q, Hou W, Lu M. Studies on introduction of leaf senescence-inhibition gene PSAG12-IPT into common wheat through pollen-tube pathway. *Acta Agron Sin*. 2004;30(6):608-612.
21. Liu M, Yang J, Cheng Y, An L. Optimization of soybean (*Glycine max* (L.) Merrill) in planta ovary transformation using a linear minimal gus gene cassette. *J Zhejiang Univ Sci B*. 2009;10(12):870-876. <https://doi.org/10.1631/jzus.B0920204>
22. Fletcher J. Coordination of cell proliferation and cell fate decisions in the angiosperm shoot apical meristem. *BioEssays*. 2002;24(1):27-37. <https://doi.org/10.1002/bies.10020>
23. Zlobin N, Lebedeva M, Taranov V. CRISPR/Cas9 genome editing through in planta transformation. *Crit Rev Biotechnol*. 2020;40(2):153-168. <https://doi.org/10.1080/07388551.2019.1709795>
24. Kesiraju K, Sreevathsa R. Apical meristem-targeted in planta transformation strategy: an overview on its utility in crop improvement. *Agri Res Technol Open Access J*. 2017;8:555734. <https://doi.org/10.19080/ARTOAJ.2017.08.555734>
25. Baskaran P, Soós V, Balázs E, Van Staden J. Shoot apical meristem injection: a novel and efficient method to obtain transformed cucumber plants. *South African Journal of Botany*. 2016;103:210-215. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2015.09.006>
26. Ulian E, Smith R, Gould J, McKnight T. Transformation of plants via the shoot apex. *Vitr Cell Dev Biol*. 1988;24:951-954. <https://doi.org/10.1385/0-89603-161-6:335>
27. Sittther V, Tabatabai B, Enitan O, Fathabad S, Dhekney S. Production of transgenic *Camelina sativa* plants via *Agrobacterium*-mediated transformation of shoot apical meristems. *Am J Plant Sci*. 2019;10(1):1-11. <https://doi.org/10.14440/jbm.2018.208>
28. Li J, Xu Z, Zeng T, et al. Overexpression of TcCHS increases pyrethrin content when using a genotype-independent transformation system in *Pyrethrum* (*Tanacetum cinerariifolium*). *Plants*. 2022;11(12):1575. <https://doi.org/10.3390/plants11121575>
29. Ganesan M, Bhanumathi P, Kumari K, et al. Transgenic Indian cotton (*Gossypium hirsutum*) harboring rice chitinase gene (Chi II) confers resistance to two fungal pathogens. *Am J Biochem Biotechnol*. 2009;5(2):63-74. <https://doi.org/10.3844/ajbbsp.2009.63.74>
30. Hamada H, Liu Y, Nagira Y, et al. Biolistic-delivery-based transient CRISPR/Cas9 expression enables in planta genome editing in wheat. *Sci Rep*. 2018;8(1):6-12. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-32714-6>
31. Satish L, Ceasar S, Ramesh M. Improved *Agrobacterium*-mediated transformation and direct plant regeneration in four cultivars of finger millet (*Eleusine coracana* (L.) Gaertn). *Plant Cell Tissue Organ Cult*. 2017;131(3):547-565. <https://doi.org/10.1007/s11240-017-1305-5>
32. Ceasar S, Baker A, Ignacimuthu S. Functional characterization of the PHT1 family transporters of foxtail millet with development of a novel *Agrobacterium*-mediated transformation procedure [Internet]. *Sci Rep*. 2017;7(1):1-17 [cited 2025 Feb 10]. Available from: <https://doi.org/10.1038/s41598-017-14447-0>

33. Jha P, Rustagi A, Agnihotri P, et al. Efficient Agrobacterium-mediated transformation of Pennisetum glaucum (L.) R. Br. using shoot apices as explant source. Plant Cell Tissue Organ Cult. 2011;107(3):501-512. <https://doi.org/10.1007/s11240-011-0001-0>
34. Arockiasamy S, Ignacimuthu S. Regeneration of transgenic plants from two indica rice (Oryza sativa L.) cultivars using shoot apex explants. Plant Cell Reports. 2007;26(10):1745-1753. <https://doi.org/10.1007/s00299-007-0377-9>
35. Burch-Smith T, Schiff M, Liu Y, Dinesh-Kumar S. Efficient virus-induced gene silencing in Arabidopsis. Plant Physiology. 2006;142(1):21-27. <https://doi.org/10.1104/pp.106.084624>
36. Ramegowda V, Mysore K, Senthil-Kumar M. Virus-induced gene silencing is a versatile tool for unraveling the functional relevance of multiple abiotic-stress-responsive genes in crop plants. Front Plant Sci. 2014;5:1-12. <https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00323>
37. Ali Z, Abul-Faraj A, Li L, et al. Efficient virus-mediated genome editing in plants using the CRISPR/Cas9 system. Molecular Plant. 2015;8(8):1288-1291. <https://doi.org/10.1016/j.molp.2015.02.011>
38. Wang M, Gao S, Zeng W, et al. Plant virology provides diverse tools for biotechnology. Viruses. 2020;12(11):1338. <https://doi.org/10.3390/v12111338>
39. Oh Y, Kim H, Kim S. Virus-induced plant genome editing. Current Opinion in Plant Biology. 2021;60:101992. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2020.101992>
40. Abrahamian P, Hammond R, Hammond J. Plant virus-derived vectors: applications in agricultural and medical biotechnology. Annual Review of Virology. 2020;7:513-535. <https://doi.org/10.1146/annurev-virology-010720-054958>
41. Tamilselvan-Nattar-Amutha S, Hiekel S, Hartmann F, et al. Barley stripe mosaic virus-mediated somatic and heritable gene editing in barley (Hordeum vulgare L.) [Internet]. Front Plant Sci. 2023;14 [cited 2025 Feb 10]. Available from: <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1201446>
42. Jackson S, Hong Y. Systemic movement of FT mRNA and a possible role in floral induction. Front Plant Sci. 2012;3:127. <https://doi.org/10.3389/fpls.2012.00127>
43. Chen H, Su Z, Tian B, et al. Development and optimization of a barley stripe mosaic virus-mediated gene editing system to improve Fusarium head blight resistance in wheat. Plant Biotechnol J. 2022;20(6):1018-1020. <https://doi.org/10.1111/pbi.13819>
44. Lei J, Li Y, Dai P, et al. Efficient virus-mediated genome editing in cotton using the CRISPR/Cas9 system [Internet]. Front Plant Sci. 2022;13:1-11 [cited 2025 Feb 10]. Available from: <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1032799>
45. Correia P, Dong X, Chen M, et al. In planta transformation methods to accelerate the domestication of perennial grain crops [Internet]. Front Plant Sci. 2025;16 [cited 2025 Feb 10]. Available from: <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1638144>
46. Han X, Deng Z, Liu H, Ji X. Current advancement and future prospects in simplified transformation-based plant genome editing. Plants. 2025;14:889. <https://doi.org/10.3390/plants14060889>
47. Wang P, Si H, Li C, et al. Plant genetic transformation: achievements, current status and future prospects. Plant Biotechnol J. 2025;23(6):2034-2058. <https://doi.org/10.1111/pbi.70028>

**ДНК технологиясын қолдану арқылы өсімдік геномын модификациялау:  
экзогендік ДНК жеткізу саласындағы прогресс**

**Е.В. Дейнеко\*<sup>1</sup>, А.Н. Кеңес<sup>2</sup>, Б.Б. Тойлыбай<sup>3</sup>,  
Г.С. Ташкентбаева<sup>4</sup>, Р.М. Турпанова\*<sup>5</sup>**

<sup>1</sup>Ресей Ғылым академиясының Сібір бөлімінің цитология және генетика институты Федералды зерттеу орталығы, Новосибирск, Ресей Федерациясы

<sup>1,2,3,4,5</sup>Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан

**Андатпа.** Мақалада ДНК технологияларында трансгенді өсімдіктерді жасау кезінде гетерологиялық гендердің экспрессиясының кассеталары ретінде немесе геномдық өңдеу әдістерін қолдана отырып, өсімдік геномдарын өзгерту құралдары ретінде пайдаланылатын

экзогендік ДНҚ фрагменттерін жеткізу деректері қарастырылады. Негізгі назар өсімдік тіндерін каллустық культураларға дейін дезинтеграциялауды және кейін *in vitro* жағдайында регенерант-өсімдіктерді қалпына келтіруді қамтитын өсімдік жасушаларын культивирлеу сатысын айналып өтуге мүмкіндік беретін *in planta* жеткізу әдістерін қарастыруға бағытталған. Қазіргі заманғы ДНҚ технологияларын қолдана отырып, өсімдік геномдарын өзгертудің дәл осы кезеңі қазіргі уақытта көптеген зерттеу топтарының назарын аударуда. Өсімдік жасушаларына геномдық өңдеу құралдарын транзитпен жеткізу үшін вирустық векторларды пайдалану перспективалары жөнінде деректер берілген. Бұл технологияның мүмкіндіктері мен кейбір кемшіліктері, сондай-ақ оны ауылшаруашылық өсімдік түрлеріне қолдану перспективалары талқыланады.

**Түйін сөздер:** генетикалық инженерия, геномдық өңдеу, трансген, *in planta* жеткізу әдістері, floral dip, вирустық вектор, вируспен индукцияланған геномды өңдеу

### Modification of plant genomes using DNA technologies: progress in the delivery of exogenous DNA

E.V. Deineko\*<sup>1</sup>, A.N. Kenges<sup>2</sup>, B.B. Toilybai<sup>3</sup>,  
G.S. Tashkentbaeva<sup>4</sup>, R.M. Turpanova\*<sup>5</sup>

<sup>1</sup>*Federal State Budgetary Scientific Institution "Federal Research Center Institute of Cytology and Genetics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences," Novosibirsk, Russia*

<sup>1,2,3,4,5</sup>*L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan*

**Abstract.** The article reviews data on the delivery of exogenous DNA fragments used in DNA technologies as expression cassettes for heterologous genes in the creation of transgenic plants, or as tools for modifying plant genomes using genome editing methods. The main focus is on *in planta* delivery methods that allow researchers to bypass the plant cultivation stage, which includes the disintegration of plant tissues into callus cultures followed by the *in vitro* regeneration of plant regenerants. It is this stage of plant genome modification using modern DNA technologies that is currently attracting the attention of many research groups. Data are presented on the prospects of using viral vectors for the transient delivery of genome editing tools into plant cells. The possibilities and some disadvantages of this technology are discussed, as well as the prospects for its application to agricultural plant species.

**Keywords:** genetic engineering, genome editing, transgene, *in planta* delivery methods, floral dip, viral vector, virus-induced genome editing

### References

1. Herrera-Estrella L, Depicker A, Van Montagu M, Schell J. Expression of chimaeric genes transferred into plant cells using a Ti-plasmid-derived vector. *Nature*. 1983;303:209-210. <https://doi.org/10.1038/303209a0>
2. James C. Global Status of Commercialized Biotech. *GM Crops*. 2010;42:362.
3. Zagorskaya A, Deineko E. Plant-expression systems: a new stage in production of biopharmaceutical preparations. *Russian Journal of Plant Physiology*. 2021;68(1):17-31. <https://doi.org/10.1134/S1021443721010210>
4. D'Aoust M, Couture M, Charland N, et al. The production of hemagglutinin-based virus-like particles in plants: A rapid, efficient and safe response to pandemic influenza. *Plant Biotechnology Journal*. 2010;8(5):607-619. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7652.2009.00496>
5. Ward B, Séguin A, Couillard J, Trépanier S, Landry N. Phase III: randomized observer-blind trial to evaluate lot-to-lot consistency of a new plant-derived quadrivalent virus-like particle influenza vaccine in adults 18-49 years of age. *Lancet*. 2021;396:1491-1503. <https://doi.org/10.1016/j.vaccine.2021.01.004>
6. Jinek M, Chylinski K, Fonfara I, et al. A programmable dual RNA-guided DNA endonuclease in adaptive bacterial immunity. *Science*. 2012;337:816-821. <https://doi.org/10.1126/science.1225829>

7. Gan W, Ling A. CRISPR/Cas9 in plant biotechnology: applications and challenges. *BioTechnologia*. 2022;103(1):81-93. <https://doi.org/10.5114/bta.2022.113919>
8. Dejneko E, Kalkabaev A, Zhanabaeva A, et al. Modifikaciya genomov rastenij metodami geneticheskoy inzhenerii i genomnogo redaktirovaniya: dostavka ekzogennyh DNK [Modification of plant genomes using genetic engineering and genome editing techniques: delivery of exogenous DNA] // BULLETIN of L.N. Gumilyov Eurasian National University. Bioscience series. 2025;1:101-116. <https://doi.org/10.32523/2616-7034-2025-150-1-101-11> [in Russian]
9. Karthik S, Pavan G, Prasanth A, et al. Improved in planta genetic transformation efficiency in bitter melon (*Momordica charantia* L.). *Vitr Cell Dev Biol(Plant)*. 2021;57(2):190-201. <https://doi.org/10.1007/s11627-021-10160-w>
10. Rizwan H, Yang Q, Yousef A, et al. Establishment of a novel and efficient agrobacterium-mediated in planta transformation system for passion fruit (*Passiflora edulis*). *Plants*. 2021;10(11):2459. <https://doi.org/10.3390/plants10112459>
11. Khadgi A, Sagawa C, Vernon C, Mermaz B, Irish V. Optimization of in planta methodology for genome editing and transformation in Citrus. *Frontiers in Plant Science*. 2024;15:1438031. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1438031>
12. Belanger J, Copley T, Hoyos-Villegas V, Charron J, O'Donoghue L. A comprehensive review of in planta stable transformation strategies. *Plant Methods*. 2024;20:79. <https://doi.org/10.1186/s13007-024-01200-8>
13. Eapen S. Pollen grains as a target for introduction of foreign genes into plants: an assessment. *Physiol Mol Biol Plants*. 2011;17(1):1-8. <https://doi.org/10.1007/s12298-010-0042-6>
14. Wang J, Li Y, Liang C. Recovery of transgenic plants by pollen-mediated transformation in *Brassica juncea*. *Transgenic Research*. 2008;17(3):417-424. <https://doi.org/10.1007/s11248-007-9115-x>
15. Zhao X, Meng Z, Wang Y, et al. Pollen magnetofection for genetic modification with magnetic nanoparticles as gene carriers. *Nat Plants* [Internet]. 2017;3:956-964. <https://doi.org/10.1038/s41477-017-0063-z>
16. Vejrupkova Z, Warman C, Sharma R, et al. No evidence for transient transformation via pollen magnetofection in several monocot species [Internet]. *Nature Plants*. 2020;6:1323-1324 [cited 2025 Feb 10]. Available from: <https://doi.org/10.1038/s41477-020-00798-6>
17. Wang M, Sun R, Zhang B, Wang Q. Pollen tube pathway-mediated cotton transformation [Internet]. In: Zhang B, editor. *Methods in Molecular Biology*. New York (NY): Springer; 2019. p.67-73 [cited 2025 Feb 10]. Available from: [https://doi.org/10.1007/978-1-4939-8952-2\\_6](https://doi.org/10.1007/978-1-4939-8952-2_6)
18. Zhang T, Chen T. Cotton pistil drip transformation method [Internet]. In: Dunwell JM, Wetten AC, editors. *Transgenic Plants: Methods and Protocols*. Totowa (NJ): Springer; 2012. p.237-243 [cited 2025 Feb 10]. Available from: [https://doi.org/10.1007/978-1-61779-558-9\\_20](https://doi.org/10.1007/978-1-61779-558-9_20)
19. Zhang Y, Yin X, Yang A, Li G, Zhang J. Stability of inheritance of transgenes in maize (*Zea mays* L.) lines produced using different transformation methods. *Euphytica*. 2005;144(1-2):11-22. <https://doi.org/10.1007/s10681-005-4560-1>
20. Xi Y, Lin Y, Zhang Q, Hou W, Lu M. Studies on introduction of leaf senescence-inhibition gene PSAG12-IPT into common wheat through pollen-tube pathway. *Acta Agron Sin*. 2004;30(6):608-612.
21. Liu M, Yang J, Cheng Y, An L. Optimization of soybean (*Glycine max* (L.) Merrill) in planta ovary transformation using a linear minimal gus gene cassette. *J Zhejiang Univ Sci B*. 2009;10(12):870-876. <https://doi.org/10.1631/jzus.B0920204>
22. Fletcher J. Coordination of cell proliferation and cell fate decisions in the angiosperm shoot apical meristem. *BioEssays*. 2002;24(1):27-37. <https://doi.org/10.1002/bies.10020>
23. Zlobin N, Lebedeva M, Taranov V. CRISPR/Cas9 genome editing through in planta transformation. *Crit Rev Biotechnol*. 2020;40(2):153-168. <https://doi.org/10.1080/07388551.2019.1709795>
24. Kesiraju K, Sreevathsa R. Apical meristem-targeted in planta transformation strategy: an overview on its utility in crop improvement. *Agri Res Technol Open Access J*. 2017;8:555734. <https://doi.org/10.19080/ARTOAJ.2017.08.555734>

25. Baskaran P, Soós V, Balázs E, Van Staden J. Shoot apical meristem injection: a novel and efficient method to obtain transformed cucumber plants. *South African Journal of Botany*. 2016;103:210-215. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2015.09.006>
26. Ulian E, Smith R, Gould J, McKnight T. Transformation of plants via the shoot apex. *Vitr Cell Dev Biol*. 1988;24:951-954. <https://doi.org/10.1385/0-89603-161-6:335>
27. Sittther V, Tabatabai B, Enitan O, Fathabad S, Dhekney S. Production of transgenic *Camelina sativa* plants via *Agrobacterium*-mediated transformation of shoot apical meristems. *Am J Plant Sci*. 2019;10(1):1-11. <https://doi.org/10.14440/jbm.2018.208>
28. Li J, Xu Z, Zeng T, et al. Overexpression of TcCHS increases pyrethrin content when using a genotype-independent transformation system in *Pyrethrum* (*Tanacetum cinerariifolium*). *Plants*. 2022;11(12):1575. <https://doi.org/10.3390/plants11121575>
29. Ganesan M, Bhanumathi P, Kumari K, et al. Transgenic Indian cotton (*Gossypium hirsutum*) harboring rice chitinase gene (Chi II) confers resistance to two fungal pathogens. *Am J Biochem Biotechnol*. 2009;5(2):63-74. <https://doi.org/10.3844/ajbbsp.2009.63.74>
30. Hamada H, Liu Y, Nagira Y, et al. Biolistic-delivery-based transient CRISPR/Cas9 expression enables in planta genome editing in wheat. *Sci Rep*. 2018;8(1):6-12. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-32714-6>
31. Satish L, Ceasar S, Ramesh M. Improved *Agrobacterium*-mediated transformation and direct plant regeneration in four cultivars of finger millet (*Eleusine coracana* (L.) Gaertn). *Plant Cell Tissue Organ Cult*. 2017;131(3):547-565. <https://doi.org/10.1007/s11240-017-1305-5>
32. Ceasar S, Baker A, Ignacimuthu S. Functional characterization of the PHT1 family transporters of foxtail millet with development of a novel *Agrobacterium*-mediated transformation procedure [Internet]. *Sci Rep*. 2017;7(1):1-17 [cited 2025 Feb 10]. Available from: <https://doi.org/10.1038/s41598-017-14447-0>
33. Jha P, Rustagi A, Agnihotri P, et al. Efficient *Agrobacterium*-mediated transformation of *Pennisetum glaucum* (L.) R. Br. using shoot apices as explant source. *Plant Cell Tissue Organ Cult*. 2011;107(3):501-512. <https://doi.org/10.1007/s11240-011-0001-0>
34. Arockiasamy S, Ignacimuthu S. Regeneration of transgenic plants from two indica rice (*Oryza sativa* L.) cultivars using shoot apex explants. *Plant Cell Reports*. 2007;26(10):1745-1753. <https://doi.org/10.1007/s00299-007-0377-9>
35. Burch-Smith T, Schiff M, Liu Y, Dinesh-Kumar S. Efficient virus-induced gene silencing in *Arabidopsis*. *Plant Physiology*. 2006;142(1):21-27. <https://doi.org/10.1104/pp.106.084624>
36. Ramegowda V, Mysore K, Senthil-Kumar M. Virus-induced gene silencing is a versatile tool for unraveling the functional relevance of multiple abiotic-stress-responsive genes in crop plants. *Front Plant Sci*. 2014;5:1-12. <https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00323>
37. Ali Z, Abul-Faraj A, Li L, et al. Efficient virus-mediated genome editing in plants using the CRISPR/Cas9 system. *Molecular Plant*. 2015;8(8):1288-1291. <https://doi.org/10.1016/j.molp.2015.02.011>
38. Wang M, Gao S, Zeng W, et al. Plant virology provides diverse tools for biotechnology. *Viruses*. 2020;12(11):1338. <https://doi.org/10.3390/v12111338>
39. Oh Y, Kim H, Kim S. Virus-induced plant genome editing. *Current Opinion in Plant Biology*. 2021;60:101992. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2020.101992>
40. Abrahamian P, Hammond R, Hammond J. Plant virus-derived vectors: applications in agricultural and medical biotechnology. *Annual Review of Virology*. 2020;7:513-535. <https://doi.org/10.1146/annurev-virology-010720-054958>
41. Tamilselvan-Nattar-Amutha S, Hiekel S, Hartmann F, et al. Barley stripe mosaic virus-mediated somatic and heritable gene editing in barley (*Hordeum vulgare* L.) [Internet]. *Front Plant Sci*. 2023;14 [cited 2025 Feb 10]. Available from: <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1201446>
42. Jackson S, Hong Y. Systemic movement of FT mRNA and a possible role in floral induction. *Front Plant Sci*. 2012;3:127. <https://doi.org/10.3389/fpls.2012.00127>

43. Chen H, Su Z, Tian B, et al. Development and optimization of a barley stripe mosaic virus-mediated gene editing system to improve Fusarium head blight resistance in wheat. *Plant Biotechnol J*. 2022;20(6):1018-1020. <https://doi.org/10.1111/pbi.13819>
44. Lei J, Li Y, Dai P, et al. Efficient virus-mediated genome editing in cotton using the CRISPR/Cas9 system [Internet]. *Front Plant Sci*. 2022;13:1-11 [cited 2025 Feb 10]. Available from: <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1032799>
45. Correia P, Dong X, Chen M, et al. In planta transformation methods to accelerate the domestication of perennial grain crops [Internet]. *Front Plant Sci*. 2025;16 [cited 2025 Feb 10]. Available from: <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1638144>
46. Han X, Deng Z, Liu H, Ji X. Current advancement and future prospects in simplified transformation-based plant genome editing. *Plants*. 2025;14:889. <https://doi.org/10.3390/plants14060889>
47. Wang P, Si H, Li C, et al. Plant genetic transformation: achievements, current status and future prospects. *Plant Biotechnol J*. 2025;23(6):2034-2058. <https://doi.org/10.1111/pbi.70028>

#### Сведения об авторах:

**Дейнеко Елена Викторовна** – автор для корреспонденции, профессор, доктор биологических наук, заведующий лабораторией в Федеральном исследовательском центре «Институт цитологии и генетики» Сибирского отделения Российской академии наук, пр. Академика Лаврентьева, 10, 630090, Новосибирск, Российская Федерация.

**Кенес Акерке Ноянқызы** – магистрант, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, ул. Мунайтпасова, 13, 010000, Астана, Казахстан.

**Тойлыбай Бибиғайша Болатбекқызы** – магистрант, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, ул. Мунайтпасова, 13, 010000, Астана, Казахстан.

**Ташкентбаева Гулжамал Санжаровна** – магистрант, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, ул. Мунайтпасова, 13, 010000, Астана, Казахстан.

**Турпанова Рауза Масгутовна** – автор для корреспонденции, доцент, кандидат сельскохозяйственных наук, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, ул. Мунайтпасова, 13, 010000, Астана, Казахстан.

#### Авторлар туралы мәлімет:

**Дейнеко Елена Викторовна** – хат-хабар авторы, профессор, биология ғылымдарының докторы, Ресей Ғылым академиясы Сібір филиалының цитология және генетика Федералдық ғылыми-зерттеу орталығы институты зертханасының меңгерушісі, Академик Лаврентьев даңғылы, 10, 63009, Новосибирск, Ресей Федерациясы.

**Кеңес Ақерке Ноянқызы** – магистрант, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Мұңайтпасов көш., 13, 010000, Астана, Қазақстан.

**Тойлыбай Бибиғайша Болатбекқызы** – магистрант, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Мұңайтпасов көш., 13, 010000, Астана, Қазақстан.

**Ташкентбаева Гулжамал Санжаровна** – магистрант, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Мұңайтпасов көш., 13, 010000, Астана, Қазақстан.

**Турпанова Рауза Масгутовна** – хат-хабар авторы, доцент, ауыл шаруашылығы ғылымдарының кандидаты, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Мұңайтпасов көш., 13, 010000, Астана, Қазақстан.

#### Authors' information:

**Deineko Elena Viktorovna** – Corresponding author, Doctor of Biological Sciences, Head of Laboratory, Federal Research Center Institute of Cytology and Genetics, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Academician Lavrentyev Ave., 10, 630090, Novosibirsk, Russian Federation.

**Kenges Akerke Noyankyzy** – master's student, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Munaitpasov Str., 13, 010000, Astana, Kazakhstan.

**Toilybay Bibigaisha Bolatbekkyzy** – master’s student, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Munitpasov Str., 13, 010000, Astana, Kazakhstan.

**Tashkentbaeva Guljamal Sanjarovna** – master’s student, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Munitpasov Str., 13, 010000, Astana, Kazakhstan.

**Turpanova Rauza Masgutovna** – Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Munitpasov Str., 13, 010000, Astana, Kazakhstan.