

СЕЛЬСКОЕ И ЛЕСНОЕ ХОЗЯЙСТВО

МРНТИ 68.35.03

**К. Ж. Жамбакин, Н. К. Касенова, М. Х. Шамекова,
Д. В. Волков**

Институт биологии и биотехнологии растений,
г. Алматы, Казахстан

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ТРАНСГЕНОВ ОТ ГЕНЕТИЧЕСКИ МОДИФИЦИРОВАННЫХ СОРТОВ

Аннотация. В обзорной статье обсуждаются преимущества выращивания генетически модифицированных сортов (ГМО), а также возможные экологические и агротехнические последствия от их выращивания. При возделывании генетически модифицированных культур должны оцениваться возможные экологические и агротехнические риски. Предполагается, что выращивание генетически модифицированных растений может привести к снижению и изменению биоразнообразия дикой флоры и фауны, а также снижению биоразнообразия среди культурных сортов, изменению нецелевых признаков и свойств модифицированных сортов, появлению суперсорняков. В статье анализируются исследования, в которых проводилась оценка возможных рисков на примере полевых экспериментов с генетически модифицированными сортами в различных странах. Эти аспекты рассматриваются в отношении наиболее распространенных сортов ГМО – рапса, сои, кукурузы, хлопка и картофеля. Анализ литературы подтверждает необходимость проведения научных исследований возможного переноса трансгенов, с учетом местных почвенно-климатических и агротехнических условий при возделывании генетически модифицированных сортов в Казахстане.

Ключевые слова: трансгенное растение, перенос генов, экологические риски, генетически модифицированный.



Түйіндеме. Қолжазбада генетикалық модификацияланған сорттардың егіс алқабына егу кезіндегі экологиялық және агрономиялық қиындықтары талқыланады. Генетикалық модификацияланған дақылдардың өсіру жағдайында экологиялық және агрономиялық қателіктері ескерілуі керек.

Генетикалық модификацияланған еамдшт егу арқылы биоалуан түрлі флоралар мен фауналардың өзгеруінің төмендеуі, сонымен қатар биоалуан түрлі дақылдардың сорттарының түсімінің төмендеуі сорттардың сипаттамалары мен қасиеттерінің өзгерісі, суперарамшөптер пайда болуы мүмкін. Қолжазбада генетикалық модификацияланған сорттарды әртүрлі елдерде егіс алқабындағы зерттеулер кезіндегі қатерлер болуы жайлы айтылған. Бұл аспектілер картоптың, рапстың, сояның және жүгерінің көп таралған сорттарында қаралады. Зерттеулер нәтижесі көрсеткендей генетикалық модификацияланған гентасмалдаушы өсімдіктерді Қазақстанның жергілікті-агротехникалық жағдайларда өсіруге болады.

Түйінді сөздер: трансгендік өсімдік, ген тасмалдаушы, экологиялық қатер, генетикалық модификацияланған.



Abstract. The review article discusses the advantages of growing of genetically modified grades, as well as the possible ecological and agrotechnical consequences of their cultivation. The ecological and agrotechnical risks must be assessed at the cultivation of genetically modified cultures. The cultivation of genetically modified plants is proposed can lead to reduction and change of biodiversity of wild flora and fauna, as well as to reduction of biodiversity among the culture grades, change untargeted characteristics and properties of modified varieties the appearance of superweeds. The article analyzes the studies, including the assessment of risks on the example of field experiments with genetically modified grades in different countries. These aspects are discussed in relation to the most common genetically modified grades - canola, soybean, corn, cotton and potato. The analysis of literature proves the need of research about possible transfer of transgenes, taking in account the local soil and climatic and agrotechnical conditions in the cultivation of genetically modified grades in Kazakhstan.

Key words: transgenic plant, transfer of genes, ecological risks, genetically modified.

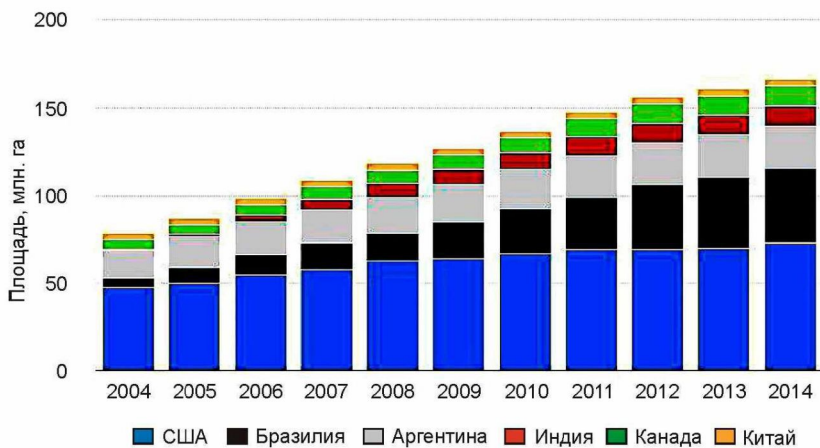
Введение. Дискуссия о том, стоит ли допускать к выращиванию в Казахстане генетически модифицированные растения, так называемые ГМО, не прекращается, а в последнее время усиливается. Особенно после того, как Президент Республики Казахстан, озвучивая Стратегию "Казахстан – 2050" новый политический курс состоявшегося государства" (Астана, 2012 г.), указал, что "качественный рывок в сельскохозяйственном производстве возможен только при условии разработки современных, высокоэффективных агротехнологий". В связи с этим в последующем Послании главы государства Н.Назарбаева народу Казах-

стана "Казахстанский путь – 2050: Единая цель, единые интересы, единое будущее" (Астана, 2014 г.) подчеркнуто, что "важно не отставать от времени, и наряду с производством естественного продовольствия вести разработку засухоустойчивых генномодифицированных культур".

Генная инженерия растений – это наиболее эффективный подход к получению растений с заданными свойствами, который дает возможность не только переносить целевые гены из одних организмов в другие, но и направленно регулировать работу собственных генов растений, комбинируя различные молекулярно-биохимические системы клетки. Кроме того, генетическая инженерия обеспечивает доступ к неограниченному генному пулу, позволяя вводить в клетки растений желаемые гены из других видов, независимо от их эволюционного и таксономического положения. При этом в последнее время для генетической трансформации растений используются гены, выделенные у растений. Поэтому термин "чужеродный ген", часто используемый противниками генетической инженерии, в данном случае не совсем подходит, так как растению внедряется растительный ген для придания искомого признака. В то же время основным требованием, предъявляемым к генноинженерным технологиям, является соблюдение принципа предосторожности. В полной мере это относится к выявлению и оценке рисков генетически модифицированных растений.

Интенсивное использование генетически модифицированных сельскохозяйственных культур началась в 1996 г. С тех пор в 60 странах мира были предоставлены 1045 разрешительных документов на 25 культур со 196 различными генетически модифицированными изменениями для импорта с целью употребления в пищу и в качестве корма, а также для возделывания. Высока возможность непреднамеренного перемещения генетически модифицированных культур из страны, в которой она разрешена, в другую страну через импорт пищевых или кормовых продуктов. Количество случаев таких перемещений ГМ культур будет возрастать с каждым годом. В настоящее время основными разработчиками ГМ культур являются биотехнологические компании США и Европы (рисунок), которые заинтересованы в

авторизации их продуктов на мировых рынках, так как эти продукты в основном предназначены для экспорта. В дальнейшем более половины ГМ культур будут разрабатываться в исследовательских институтах этих стран.



Мировая площадь, занимаемая генетически модифицированными растениями в период с 2004 по 2014 г. в лидирующих странах, млн. га [10]

1. Риски, ассоциированные с выращиванием ГМ растений

– Каковы возможные риски при выращивании ГМ растений в Казахстане?

– Прежде всего экологические и агротехнические, тесно взаимосвязанные друг с другом. Так, если экологическими рисками являются снижение и изменение биоразнообразия дикой флоры и фауны, то к агротехническим рискам относят снижение биоразнообразия среди культурных сортов, изменения нецелевых признаков и свойств модифицированных сортов, появление суперсорняков. Как правило, вышеуказанные риски возникают в результате потока генов от ГМ сортов к другим сортам и диким сороридчам культурных растений, а также в результате горизонтального потока генов от ГМ культур к насекомым и микроорганизмам.

Предполагается снижение биоразнообразия за счет возде­лывания ГМ растений. В частности, после появления ГМ сортов ожидалось сокращение разнообразия возделываемых сортов. В некоторых случаях это действительно произошло главным об­разом вследствие экономической выгоды отдельных генетичес­ки модифицированных сортов. В других случаях не произошло, поскольку ГМ растения стали использоваться для создания раз­личных сортов [1]. Исследователи, изучающие влияние ГМ рас­тений, считают, что, к сожалению, невозможно предсказывать экологические последствия интродуцированных видов. В каждом конкретном случае влияние ГМ сортов может различаться в про­странстве и во времени, однако мы не способны точно предска­зать экологические последствия, особенно долгосрочные, от внедрения ГМ растений [2]. При этом изучение влияния ГМ сор­тов на биоразнообразии должно проводиться комплексно с уче­том множества местных агротехнических и почвенно-климати­ческих факторов [3,4]. Поток генов от сорта к сорту происходит постоянно, поэтому трудно сохранить сорта в изоляции, в осо­бенности для таких культур, как рапс, кукуруза и сахарная свек­ла. Поток генов может происходить и от падалицы (самосев), и от диких популяций, которые действуют как генофонды переноса загрязнения в последующие культуры. Управление ситуаци­ей должно заключаться в минимизации появления ГМ семян на территории хозяйств. Поток генов между культурными растени­ями и их дикими сородичами может иметь 2 потенциально вред­ных последствия: эволюционное увеличение инвазивности и повышенная вероятность вымирания диких сородичей. При этом трудно прогнозировать точные пределы сексуальных барьеров между отдельными видами сельскохозяйственных культур и их родственными видами, вероятность формирования гибридов и сохранение их в сельскохозяйственной и/или природной сфере обитания [4]. Исходя из вышесказанного, следует отметить не­обходимость проведения специальных научных изысканий воз­можного переноса трансгенов при возделывании ГМ растений в Казахстане с учетом местных почвенно-климатических и агро­технических условий.

2. Устойчивость к гербицидам сплошного действия

Исследования, проведенные в США, показали, что трансгенные сорта рапса на устойчивость к гербицидам более конкурентоспособны по сравнению с обычными сортами [5], поэтому возделывание таких сортов резко увеличилось. Противники выращивания генетически модифицированных растений утверждают, что выращивание на полях генетически модифицированных сортов, устойчивых к гербицидам сплошного действия, привело к появлению так называемых суперсорняков вследствие передачи генов устойчивости от ГМ растений к другим сортам и диким сородичам. В то же время появление сорняков, устойчивых к гербицидам, происходило и до использования генетически модифицированных сортов. Некоторые исследователи утверждают, что данная проблема касается не ГМ растений, а правильной агротехники и соблюдения севооборотов [6]. В литературе есть сведения о том, что количество устойчивых к глифосату сорняков увеличилось до 14 видов. Тем не менее производителями кукурузы, сои и хлопка в 6 штатах установлено, что давление сорняков снизилось после внедрения в севообороты устойчивых к глифосату сортов. Исследования, проведенные в Великобритании, показали, что на посевах сахарной свеклы и рапса, созданных генноинженерными методами на устойчивость к гербицидам, меньше сорняков и семян сорняков, а на соответствующих посевах кукурузы наблюдалось увеличение двудольных сорняков и их семян. Интенсивное использование гербицидов ведет к изменению видового состава сорной растительности. Еще до использования генетически модифицированных культур в США появлялись сведения о 130 видах сорняков, устойчивых к гербицидам. В частности, в 1964 г. отмечали вьюнок полевой, который обладал устойчивостью к гербициду 2,4-Д. Более того исследователи утверждают, что использование гербицидоустойчивых сортов существенно влияет на количество механических обработок почв, уменьшая эрозионные риски, сохраняя влагу в почве [1]. Изученные потомства от скрещивания генномодифицированного рапса с признаком гербицидоустойчивости и его диких сородичей не показывают повышенные приспособитель-

ные преимущества и ведут себя, как обычные неустойчивые сорта. Нет никаких свидетельств тому, что в природе признак устойчивости к гербицидам изменился, или поменялись масштаб и характер его взаимодействия с соответствующими представителями флоры и фауны. Авторы на основании собственных исследований и анализа литературных источников делают вывод, что меры по управлению распространением генов устойчивости к гербицидам от генетически модифицированных сортов в Европе имеют скорее профилактический характер, и не служат научным доказательством необходимости такого контроля [7]. Выращивание гербицидоустойчивых растений также положительно сказывается на здоровье фермеров, которые меньше подвергаются негативному влиянию гербицидов во время обработки [8].

3. Устойчивость к вредителям

Для борьбы с вредителями успешно используется бактериальный Vt-токсин. В сельском хозяйстве широко применяется бактериальная суспензия *Bacillus thuringiensis* в качестве инсектицида. С использованием генетической инженерии в геном растения был внедрен бактериальный ген Cry Vt-токсина, который придает растению устойчивость против некоторых насекомых-вредителей. Выращивание Vt-культур оказывает значительное влияние на снижение численности целевых насекомых. Особое внимание исследователей уделяется влиянию Vt-культур на нецелевых насекомых. Общий вывод подобных исследований таков, что значительного побочного эффекта воздействия Vt-культур на нецелевых травоядных и полезных насекомых в полевых условиях обнаружено не было. Хорошо изучено влияние Vt-растений на почвенную экосистему. Показано, что Cry белки Vt-растений оказывают различное токсическое (от нулевого до незначительного) влияние на микрофлору почвы в зависимости от типа почв, ее влажности и температуры [1]. Главным преимуществом растений с Vt-токсином является то, что он позволяет значительно снизить количество используемых инсектицидов, тем самым положительно влияя на экологию. Так, в период с 1996 до 2006 г. выращивание Vt-хлопка сэкономило 128 млн. кг пести-

цидов, сократив общий урон экологии, нанесенный пестицидами, на 25 % [8].

В то же время другими исследователями отмечается, что обнаружение Bt-токсинов в корневых выделениях кукурузы, риса и хлопчатника, а также долговечность этих токсинов в почве свидетельствуют о необходимости исключительных мер предосторожности. Генетически модифицированные культуры, отобранные на признак устойчивости к травоядным насекомым из отряда чешуекрылых, могут стать более привлекательными для травоядных из другого порядка (*Homoptera*). В результате тля стала основным вредителем для Bt-хлопка в Китае [9].

В Китае и Южной Африке выявлено, что процент отравления вредными веществами, находящимися в составе пестицидов, значительно меньше у фермеров, которые выращивают Bt-хлопок, в сравнении с фермерами, предпочитающими не ГМ сорта [8].

4. Генетически модифицированные растения, возделываемые в мире

Согласно данным, представленным ФАО, самыми возделываемыми ГМ растениями являются соя, кукуруза, рапс и хлопок [10]. ГМ соя – самое популярное ГМ растение – около 53 % мировой площади, занятой ГМ растениями, составляет гербицидоустойчивая соя. ГМ кукуруза занимает около 30 % возделываемой территории, занимаемой ГМ растениями [8].

4.1. Распространение трансгенов от генетически модифицированной сои

Глифосфат-устойчивая соя является одним из самых возделываемых трансгенных растений в мире. В США более 91 % сои является трансгенной. Возделывание глифосфат-устойчивой сои обладает некоторыми преимуществами. Агроэкономическая выгода заключается в снижении расходов на гербициды, упрощенном избавлении от сорняков за счет использования только одного вида гербицидов. Также в Америке введение в использование генетически модифицированной сои привело к увеличению прибыли для фермеров на 32,2 млрд. дол. в период с 1996 по 2011 г. [11]. Глифосфат обладает низкой токсичностью, что

ведет к снижению экологических рисков, связанных с обработкой гербицидами. Это также способствует уменьшению пищевых рисков, связанных с использованием гербицидов.

Поскольку соя на 99 % является самоопыляемым растением, перенос трансгенов перекрестным опылением к негенетически трансформированным растениям и диким сорочикам практически невозможен. Несмотря на то, что можно дискредитировать экологические риски, связанные с переносом трансгенов, существует значительный экологический риск, связанный с возделыванием глифосфат-устойчивой трансгенной сои, т. е. появление глифосфат-устойчивых сорняков вследствие большого давления отбора из-за использования глифосфатов [12].

4.2. Распространение трансгенов от генетически модифицированной кукурузы

Следует отметить, что 65 % кукурузы, возделываемой в мире, является инсектицидоустойчивой (содержит ген Bt). Подавляющее большинство (35 %) является либо гербицидоустойчивым, либо содержит обе ГМ-модификации. Кукуруза преимущественно опыляется ветром и пыльца живет короткий период, 98 % пыльцы кукурузы не переносится дальше чем на 25-50 м от поля [13]. Из-за того, что кукуруза опыляется ветром и имеет способность к межвидовому скрещиванию, есть вероятность переноса трансгенов от генетически модифицированных коммерческих гибридов к нетрансгенным растениям и диким сорочикам. Теосинте – это травянистое растение, которое является диким предком кукурузы и растет в Мексике и Центральной Америке. Исследования переноса трансгенов пыльцой показали, что есть большая вероятность переноса генов в различных условиях: если растения произрастают на одном поле, если теосинте растет по периметру поля, или группами растений за периметром [13]. Также есть вероятность переноса трансгенов к сорочикам, не содержащим трансген. Так, было проведено исследование переноса генов от 36x12 м поля с глюфосинит-устойчивой кукурузой к прилегающему полю с негенетически модифицированными сортами. С этого поля были взяты образцы растений на расстояниях 1-51 м от донора. Как и ожидалось, уровень пе-

рекрестного опыления резко уменьшался с увеличением дистанции от поля и составил менее 1 % на расстоянии 18 м от поля с генетически модифицированной кукурузой [14].

4.3. Распространение трансгенов от генетически модифицированного хлопка

Хлопок является преимущественно самоопыляемым растением с тяжелой, клейкой пылью и цветками, которые открыты всего один день. В связи с этим считается, что перенос трансгенов пылью не очень вероятен, и это подтверждается исследованиями, которые были выполнены в этой области. Исследования в Восточной Австралии показали, что перенос трансгенов составил 10 % и менее в прилегающих рядах с расстоянием между рядами в 1 м и меньше [15]. Перенос пыльцы насекомыми также играет свою роль, но это является значительным фактором только, если количество насекомых очень высокое. В Северной Австралии перенос пыльцы насекомыми был более высоким, чем в Восточной Австралии, по причине большого количества пчел, обитающих в этом регионе. Есть небольшой шанс переноса трансгенов через пыльцу к диким сородичам [16]. Значительную роль в маловероятности переноса трансгенов к диким сородичам играет тот факт, что большинство видов дикого хлопка являются диплоидами, в то время как культурный хлопок – тетраплоид. Даже при возможном переносе генов существует вероятность того, что межродовые гибриды выживут [17].

4.4. Распространение трансгенов от генетически модифицированного картофеля

Для растений, которые размножаются бесполом путем, распространение семенного материала в полевых условиях не является критически важным фактором. В связи с этим существует мало данных о расстоянии, на котором происходит опыление картофеля. Различные полевые эксперименты были проведены с использованием трансгенного картофеля с генами *nptII*; *ntpl.1u gus*, либо с генами *nptII*, *gusu als*. Во всех 3-х исследованиях выявлено, что процент переноса трансгенов уменьшался с увеличением дистанции от трансгенного расте-

ния. Установлено, что расстояния в 20 м достаточно, чтобы изолировать негенетически модифицированный картофель от трансгенов [14].

4.5. Распространение трансгенов от генетически модифицированного рапса

В мировой практике достаточно хорошо изучено влияние ГМ рапса на сорта и дикорастущую флору. Известно, что рапс не является строгим самоопылителем, перекрестное опыление может достигать до 30 %. Точные данные о степени опыления насекомых или ветра отсутствуют, однако очевидно, что оба фактора опыления важны и, возможно, что насекомые могут иметь ключевую роль для опыления. Возникновение и частота потока генов внутривидового скрещивания могут меняться в зависимости от сорта, дизайна посевов, рельефа местности и условий окружающей среды. Анализ различных исследований о возможном перекрестном опылении генетически модифицированного рапса с негенетически модифицированными сортами показывает, что основная часть скрещиваний происходит на очень коротких (менее 10 м) расстояниях. Однако случаи оплодотворения генетически модифицированной пылью были обнаружены на расстоянии 3 км от поля доноров. Таким образом, очень трудно предполагать, на каком расстоянии от полей с генетически модифицированным рапсом уровень скрещивания будет равен нулю [18].

Поток генов от рапса может произойти на возделываемом поле или через поле на большие расстояния за счет распространения пыльцы или семян. Непреднамеренное распространение семян иногда происходит через много лет после проведения уборки за счет прорастания покоящихся семян в почве. Также оно может происходить и на значительном расстоянии от выращиваемых ГМ за счет потерь во время транспортировки [19].

В исследованиях трансфера трансгенов от генетически модифицированного рапса к не ГМ растениям рапса изучен перенос трансгена *pat*, который отвечает за гербицидоустойчивость в трансгенном рапсе. При этом центральный участок содержал

трансгенный рапс FalconGS40/90 с геном *pat* и был окружен несколькими группами негенетически модифицированных растений рапса на расстоянии 3-11 м. ПЦР-анализ показал, что в среднем перенос трансгена составил 0,28 %, что является допустимым безопасным уровнем. Содержание трансгена в 0,9 % установлено как уровень, ниже которого растения считаются экологически чистыми [20].

Также были проведены исследования на поле, разделенном на 2 блока, которые непосредственно граничили друг с другом: один блок состоял из растений генетически модифицированного рапса сорта Seedlink OSRRF3 x MS8. Второй блок содержал негенетически модифицированный рапс. Семена растений неГМ рапса, расположенные на расстоянии 2-150 м от границы со вторым блоком, были взяты для ПЦР-анализа, который показал, что уровень гибридизации составил 0,76 % на расстоянии 2 м от донора и 0,02 % – на расстоянии 150 м от донора [21].

Большинство исследований трансфера трансгенов проводились с использованием экспериментального дизайна, в котором центральный ГМ участок окружается участком или участками с неГМ рапсом. Но в одном из экспериментов был использован "обратный" экспериментальный дизайн, в котором был изучен трансфер от 4-х участков с донорами-растениями рапса с высоким содержанием эруковой кислоты (генотип HEAR) к 1 участку с акцепторами – растениями рапса с низким содержанием эруковой кислоты (генотип LEAR). Разница в генотипах находится в мутациях в генах, отвечающих за удлинение жирных кислот *Vn-FAE1.1* и *Vn-FAE1.2*. Данные мутации ведут к тому, что при генотипе LEAR состав эруковой кислоты составляет 0,1 %, в то время как при генотипе HEAR он доходит до 45-60 % (0.45 SD). При сборе семян во время урожая они были разделены на группы по 200 семян, которые были собраны с растений, находящихся на равных расстояниях от участка-донора. В итоге были проанализированы 6 групп семян, и в 3-х из них состав эруковой кислоты в среднем составил 0,36 SD, что не характерно для LEAR генотипа [22].

4.6. Пере­нос транс­ге­нов от ге­нетичес­ки мо­ди­фи­ци­ро­ван­но­го ра­пса к ди­ким со­ро­ди­чам

Про­ве­де­но ис­сле­до­ва­ние пе­ре­опы­ле­ния транс­ген­ных ли­ний ра­пса *Brassicana­pus L.* и их ди­ких со­ро­ди­чей су­ре­пи­цы *B. rapa L.* и ре­дь­ки ди­кой *Raphanus raphanistrum L.* При вы­со­ком от­но­си­тель­ном со­от­но­ше­нии рас­те­ний транс­ген­но­го ра­пса к ди­ка­рям (600:1), час­то­та на всех транс­фор­ми­ро­ван­ных ли­ниях *B. rapa L.* бы­ла близ­ка к 10 %. При этом ги­бри­ди­за­ции с *R. raphanistrum* об­на­ру­же­но не бы­ло. При бо­лее низ­ком от­но­си­тель­ном со­от­но­ше­нии (180:1) час­то­та ги­бри­ди­за­ции транс­фор­ми­ро­ван­ных рас­те­ний с су­ре­пи­цей со­став­и­ла 2 %. Меж­ви­до­вая ги­бри­ди­за­ция бы­ла вы­ше в слу­чае, ко­гда су­ре­пи­ца про­из­ра­ста­ла в се­ре­дине экс­пе­ри­мен­таль­но­го по­ля (о­ко­ло 37,2 %) по срав­не­нию с рас­по­ло­же­нием су­ре­пи­цы на кра­ю по­ля (при­мер­но 5,2 %). Как и ожи­да­лось, о­ко­ло 50 % се­мян завя­зы­ва­ет­ся в слу­чае бек­крос­сов, ко­гда транс­ген­ные ги­бри­дные рас­те­ния слу­жи­ли ма­терин­ской ли­нией. В слу­чае, ко­гда рас­те­ния су­ре­пи­цы слу­жи­ли ма­терин­ской ли­нией, час­то­та бек­крос­са со­став­ля­ла 0,088 и 0,060 %. Как ус­та­но­в­ле­но, транс­ген­ный по­ток от мно­гих не­зави­си­мых транс­фор­ми­ро­ван­ных ли­ний ра­пса мо­жет про­изой­ти при раз­лич­ных по­левых ус­ло­ви­ях, и что транс­ген­ные ги­бри­ды име­ют вы­со­кий по­тен­ци­ал для про­из­вод­ства транс­ген­ных се­мян при бек­крос­си­ро­ва­нии [23].

На ос­но­ва­нии ре­зуль­та­тов ис­сле­до­ва­ний, про­ве­ден­ных в Ве­ли­ко­бри­та­нии, про­гно­зи­ру­ет­ся, что ги­бри­ды F1 ГМ ра­пса с ди­ки­ми со­ро­ди­ча­ми *Brassica rapa* да­ют зна­чи­тель­но мень­ше транс­ген­ных по­том­ков, тем са­мым уве­личивая воз­мож­ность био­за­щи­ты по стра­не. Кро­ме то­го, от­ме­ча­ет­ся, что есть воз­мож­но­сти для оп­ре­делен­ных транс­ге­нов уве­личить их при­сут­ствие в при­род­ной по­пу­ля­ции, что со­от­вет­ствен­но тре­бу­ет осо­бо­го вни­ма­ния [24]. Пред­по­ла­га­ет­ся, что по­ток ге­нов от куль­тур­ных сор­тов к ди­ким сор­там не­воз­мож­но ос­та­но­вить, но сле­ду­ет изу­чать сте­пень ин­ва­зив­но­сти транс­ге­нов на при­род­ную по­пу­ля­цию [25].

Изу­че­на воз­мож­ность скре­щи­ва­ния ге­нетичес­ки мо­ди­фи­ци­ро­ван­но­го ра­пса с ге­ном ус­той­чи­во­сти к гер­би­ци­дам сплош­но­го дей­ствия с ди­ки­ми со­ро­ди­ча­ми, в час­тно­сти с гор­чи­цей. Опе­ре-

делено, что скрещивание в производственных условиях происходит реципротно, кроме того, возможно насыщающее скрещивание. При этом гибридные популяции могут сохраняться на границах полей, а также вдоль дорог. Авторы считают, что трансгены устойчивости к гербициду могут не только сохраняться в дикой популяции, но и иметь адаптивное преимущество за счет применения гербицидов сплошного действия [26].

Как уже сообщалось, рапс может свободно скрещиваться со многими дикими сородичами, такими, как *Brassica rapa* L., *Sinapis arvensis* L., *Erucastrum gallicum*, *Raphanu sraphanistrum* L. Многие из этих видов встречаются по всему миру, в том числе и в Казахстане. *B. rapa*, *Sinapis arvensis* L., *Raphanus raphanistrum* L. являются нестрогими самоопылителями, в то время как *Erucastrum gallicum* преимущественно самоопылитель. Изучался поток генов от рапса к этим сородичам в теплице и / или полевых экспериментах. В целом вероятность переноса генов от рапса к *R. raphanistrum*, *S. arvensis*, *E. gallicum* была очень низкой ($<2-5 \times 10^{-5}$). При этом гибрид с *R. raphanistrum* был почти с мужской стерильностью (жизнеспособность пыльцы – 0,12 %), и не образовывал семян. Соответствующие исследования в Австралии и Франции показали еще меньшую вероятность скрещивания. Скрещивание между рапсом и *Brassica rapa* L. довольно высокое – в среднем 7 % (диапазон 0-36 %) в полевых экспериментах. С экологической точки зрения признак устойчивости к гербициду выгоден только дикой популяции, однако другие гены, которые передаются вместе с гербицидоустойчивостью, не всегда хороши для дикой популяции. К примеру, такие признаки, как отсутствие покоя, снижение растрескивания стручков, дружное созревание и высокое содержание масла (потенциально связаны с увеличением семян и, соответственно увеличивается восприимчивость к патогенам почвы и хищников семян) [27].

В Казахстане одним из широко распространенных диких сородичей рапса является *Capsellabursa-pastoris*, или пастушья сумка. В литературе нет данных о полевых исследованиях переноса трансгенов от рапса к пастушьей сумке. Но исследования,

проведенные в Китае, показали, что близкое генетическое родство этих двух растений делает возможным перенос генов от одного к другому. Используя пастушью сумку как донора пыльцы, а рапс – как акцептора, исследователи пытались перенести ген, отвечающий за устойчивость к *Sclerotinia sclerotium*-болезни, поражающей рапс. После проведения гибридизации было установлено, что в поколении F1 уже проявляются несколько признаков, не характерных для рапса, а именно пониженный состав эруковой кислоты и глюкоинолатов, которые воздействуют на устойчивость пастушьей сумки к *Sclerotinia sclerotium* [28].

5. Перспективы возделывания ГМ растений

Генетически модифицированные растения обладают огромным потенциалом в улучшении показателей по многим факторам. Во-первых, повышение продуктивности сельского хозяйства является актуальной темой для увеличивающейся численности населения Земли. ГМ растения также могут улучшить экологическую ситуацию, которая меняется в связи с развитием сельского хозяйства. Улучшение показателей питательности, обусловленное изменениями генотипа растений, может улучшить здоровье потребителей [8].

В случае неиспользования новых биотехнологий, повышающих урожайность, а также доходы фермеров. Это привело бы к значительному увеличению пашни и нанесло непоправимый ущерб естественному ландшафту и, как следствие, биологическому разнообразию [1]. В частности, для Казахстана следует учесть возможные последствия перекрестного скрещивания ГМ растений с соответствующими дикими сородичами.

Для жителей развивающихся и бедных стран использование ГМ растений может значить лучший доступ к питательным веществам. На примере Филиппин было показано, что использование ГМ технологии, а именно выращивание золотого риса позволило обеспечить лучший доступ населения к источнику витамина А и сократить случаи его нехватки на 60 %. Следует отметить, что подобный эффект может стать возможным при выращивании в бедных странах культур с высоким содержанием железа и цинка, а также аминокислот [8].

Как было уже показано на примере Bt-хлопка, выращивание устойчивых к вредителям и гербицидам сплошного действия генетически модифицированных культур вызывает значительное сокращение использования пестицидов, что, в свою очередь, улучшает экологическое состояние и биоразнообразие окружающей среды [1]. Использование ГМ сортов в данном случае имеет значительную перспективу, чтобы значительно уменьшить общее использование пестицидов.

Кроме того, очевидно общее снижение затрачиваемой энергии при производстве единицы продукции в результате внедрения данной технологии. Это не только различные энергетические затраты на производство пестицидов, но и снижение объемов дизельного топлива в производственном процессе, топлива для транспортировки и хранения, воды и топлива, используемого в распыления, и, конечно, меньшее использование упаковки для их локализации и распространения в сельскохозяйственном секторе. Тем не менее стоит провести дальнейшие исследования, чтобы оценить последствия использования ГМ, обусловленные частотой и тяжестью ингредиентов, вызывающих загрязнение, связанные с пестицидами.

Все больше голосов в поддержку ГМ растений раздается в странах Европейского союза. В частности, высказывается мнение, что, несмотря на важность строгих исследований влияния введения ГМ культур в ЕС, некоторые из положительных аспектов их внедрения, по всей видимости, игнорируются, в частности – это значительное общее сокращение использования пестицидов в сельском хозяйстве. Некоторые авторы задаются вопросом: если опубликовать весь список используемых пестицидов, а также их объем, при выращивании сельскохозяйственных культур и альтернативный список пестицидов, используемых при выращивании ГМ культур, какова будет реакция общественности в Европе? [29]

Продолжающиеся фундаментальные исследования свидетельствуют, что количество коммерчески выгодных полезных генов для селекционного использования увеличивается из года в год. Таким образом, разнообразие ГМО будет также значитель-

но увеличиваться. И, следовательно, может представлять определенные риски для окружающей среды, с учетом ограничения в прогнозировании негативных последствий [30].

Предполагается, что внедренные гены могут воздействовать на работу других генов реципиента. Многие исследователи полагают, что действие встроенного чужеродного гена скорее всего разбалансирует, а не "гармонизирует" геном и генотипическую структуру популяции, которая до того длительное время эволюционировала в определенных условиях внешней среды. Это должно привести к изменению средних значений и/или увеличению фенотипической изменчивости в этой популяции по комплексам адаптивных признаков. При наличии стабилизирующего отбора по таким признакам ожидается уменьшение приспособленности ГМО-популяции по сравнению с популяцией "дикого" фенотипа, поскольку ее фенотипическое разнообразие выходит за пределы нормы отбора [31]. В то же время работы на модельных объектах показали обратное: трансгенные линии следует рассматривать такими же безопасными, как обычные *Arabidopsis* линии. Результаты показывают, что плейотропное действие в ГМ растениях не является существенным по сравнению с природными [32].

Ни риски, ни польза от ГМ растений не могут считаться абсолютными: и те, и другие зависят от множества факторов. Долгосрочные риски, связанные с введением в оборот ГМ растений, к сожалению, не могут быть предсказаны. В каждом конкретном случае влияние ГМ растений может быть разным, поэтому необходимо вести постоянный мониторинг распространения трансгенов различных ГМ растений в отдельных регионах.

Список литературы

1 *Carpenter J.E.* Impact of GM crops on biodiversity // *GM Crops*. – 2011. – № 2 (1). – P. 7-23.

2 *Wolfenbarger and L.L., Phifer P.R.* The Ecological Risks and Benefits of Genetically Engineered Plants // *Science*. – 2000. – № 290. – P. 2088-2093.

3 Collier M.J., Mullins E. The CIN MalIndex: Assessing the potential impact of GM cropmanagement-acrossaheterogeneouslandscape // *Environ. Biosafety Res.* – 2010. – № 9. – P. 135-145.

4 European Environmental Agency. Genetically modified organisms (GMOs): The significance of gene flow through pollen transfer // *Environmental issue reportvol. 28*, Copenhagen, 2002.

5 Kareiva P. et al. Studying and managing the risk of cross-fertilization between transgenic crops and wild relatives // *Molecular Ecology.* – 1994. – № 3. – P. 15-21.

6 Pitelli R.A. Genetically modified plants and environmental safety: A critical analysis // *Planta Daninha.* – 2014. – № 32 (1). – P. 235-241.

7 Devos Y. et al. Feral genetically modified herbicide tolerant oilseed rape from seed import spills: are concerns scientifically justified? // *Transgenic Res.* – 2012. – № 21. – P. 1-21.

8 Qaim M. The economics of genetically modified crops // *Annu Rev Resour Econ.* – 2009. – № 1. – P. 665-93.

9 Viktorov G. Influence of Bt-plants on soil biota and pleiotropic effect of 5- endotoxin-encoding genes // *Russian Journal of Plant Physiology.* – 2008. – 55 (6). – P. 738-747.

10 FAO, Genetically modified crops // *FAO annual report*, 2011. – P. 312-351.

11 Brookes G., Bartfoot P. Global Impact of Biotech Crops: Environmental Effects, 1996-2009. *GM Crops.* – 2011. – № 2. – P. 1-16.

12 Bonny S. Genetically modified glyphosphate -tolerant soybean in the USA: adoption factors, impacts and prospects. A review // *Agron Sustain Dev.* – 2008, 28. – P. 21-32.

13 Pleasants J.M. et al. Corn pollen deposition on milkweeds in and near cornfields // *Proc Natl Acad Sci USA.* 2001. 98. – P. 11919-11924.

14 Messeguer J. Gene flow assessment in transgenic plants // *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 2011. – 73. – P. 201-202.

15 Llewellyn D., Fitt G. Pollen dispersal from two field trials of transgenic cotton in the Namoi Valley, Australia // *Molecular Breeding*, 1996. – 2. – P. 157-166.

16 *Brubaker C. and Brown A.* An Evaluation of the Potential for Gene Flow Between Commercial Cotton Cultivars and Wild Australian Cotton Species. *CSIRO Plant Industry Report*, Canberra, 2002.

17 *Naranjo S.E. et al.* The present and the future of insect-resistant genetically modified cotton in IPM, Integration of Insect-Resistant Genetically Modified Crops within IPM Programs // *Progress in Biological Control*, 2008. – 5. – P. 159-194.

18 *Husken A. and Dietz-Pfeilstetter A.* Pollen-mediated intraspecific gene flow from herbicide resistant oilseed rape (*Brassica napus L.*) // *Transgenic Res*, 2007. – 16. – P. 557-569.

19 *Liu Y., et al.* Consequences of gene flow between oilseed rape (*Brassica napus*) and its relatives // *Plant Science*, 2013. – 211. – P. 42-51.

20 *Funk et al.* Outcrossing frequencies and distribution of transgenic oilseed rape (*Brassica napus L.*) in the nearest neighbourhood // *European Journal of Agronomy*, 2006. – 24 (1). – 2634 p.

21 *Weekes et al.* Crop-to-crop Gene Flow using Farm Scale Sites of Oilseed Rape (*Brassica napus*) in the UK // *Transgenic Research*, 2005. – 14 (5). – P. 749-759.

22 *Dietz-Pfeilstetter A. et al.* Outcrossing frequencies from multiple high erucic acid oilseed rape fields to a central receptor field // *Euphytica*, 2013. – 191. 191: 1-7.

23 *Halfhill M.D.* Hybridization and backcrossing between transgenic oilseed rape and two related weed species under field conditions // *Environ Biosafety Res*, 2004. – 3. – P. 73-81.

24 *Allainguillaume J.* Fitness of hybrids between rapeseed (*Brassica napus*) and wild *Brassica rapa* in natural habitats // *Molecular Ecology*, 2006. – 15. – P. 1175-1184.

25 *Kareiva P.* Studying and managing the risk of cross-fertilization between transgenic crops and wild relatives // *Molecular Ecology*, 1994. – 3. – P. 15-21.

26 *Liu Y.B.* Backcrosses to *Brassica napus* of hybrids between *B. juncea* and *B. napus* as a source of herbicide-resistant volunteer-like feral populations // *Plant Science*, 2010. – 179. – P. 459-465.

27 *Legere A.* Risks and consequences of gene flow from herbicide-resistant crops: canola (*Brassica napus L.*) as a case study // *Pest Management Science*, 2005. – 61. – P. 292-300.

28 *Chen H.-F.*, et al. Production and genetic analysis of partial hybrids in intertribal crosses between Brassica species (*B. napra*, *B. rapus*) and *Capsella bursa -pastoris*. *Plant Cell Rep*, 2007. – 26. – P. 1791-1800.

29 *Phipps R.H.* and *Park J.R.* Environmental Benefits of Genetically Modified Crops: Global and European Perspectives on Their Ability to Reduce Pesticide Use // *Journal of Animal and Feed Sciences*, 2002. – 11. – P. 1-18.

30 *Wolfenbarger L.L.*, *Phifer P.R.* The Ecological Risks and Benefits of Genetically Engineered Plants // *Science*. – 2000. – № 290. – P. 2088-2093.

31 *Чесноков Ю.В.* ГМО и генетические ресурсы растений: экологическая и агротехническая безопасность // Вавиловский журнал генетики и селекции. – 2011. – № 15 (4).

32 *Houshyani B.* Assessment of pleiotropic transcriptome perturbations in Arabidopsis engineered for indirect insect defence // *Plant Biology*. – 2014. – № 14. – 170 p.

Жамбакин Кабыл Жапарович

e-mail: zhambaki@mail.ru

Касенова Назира Калмухамбеқызы

e-mail: nazira.kassenova@gmail.com

Шамекова Малика Хабидулаевна

e-mail: shamekov@gmail.com

Волков Дмитрий Владимирович

e-mail: spiritdem@gmail.com