

---

# 5

## ПРОДОВОЛЬСТВЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ И ТРАНСГЕННЫЕ ПРОДУКТЫ

*В. Г. Лебедев*

---

### ПРОДОВОЛЬСТВЕННАЯ ПРОБЛЕМА И ПУТИ ЕЕ РЕШЕНИЯ

Ко второй половине XX в. обозначилось несколько глобальных проблем человечества — социально-экономическая, продовольственная, экологическая, энерго-сырьевая, демографическая, военная и др., требующих безотлагательного решения. К одной из наиболее острых относится группа проблем, касающаяся отношений человека с окружающей средой (экологическая, продовольственная, проблема исчерпаемости энергетических и сырьевых ресурсов). В целом же на вопрос физического выживания человечества больше всего влияет продовольственная проблема, с которой тесно связана экологическая.

Численность человечества особенно быстро стала расти в XX в. (*рис. 5—1*). По прогнозам ООН, к 2020 г. население Земли возрастет с нынешних 6 млрд человек до 7,5 млрд, а к 2050 г. — превысит 9 млрд человек [17]. Уже сейчас продовольствия не хватает (около 800 млн человек в мире голодают), а в дальнейшем эта проблема только обострится, так как увеличение производства продуктов питания стало отставать от прироста населения. Поэтому обеспечение населения продуктами питания становится наиболее важной социальной проблемой в ближайшие десятилетия, а производство продовольствия должно быть как минимум удвоено, чтобы соответствовать росту народонаселения мира. Путей решения проблемы два: экстенсивный и интенсивный. Экстенсивный путь предполагает распашку новых земель, но он является тупиковым, так как свободных земель во многих странах уже нет, а в других этого можно достичь только сведением лесов.

Леса — один из основных источников кислорода на планете, они также очищают воздух от загрязнений. Леса служат регуляторами гидрологического баланса, защищают почву от водной и ветровой эрозии, обеспечивают баланс углерода. Уничтожение лесов началось уже давно, и с начала появления сельского хозяйства на земле их площадь сократилась более чем на треть. Несмотря на все значение лесов, их сведение продолжается и в наши дни. Наиболее интенсивно (около 11 млн га в год) вырубаются тропические леса — в Африке,

---

Россия в окружающем мире: 2004 (Аналитический ежегодник). Отв. ред. *Н. Н. Марфенин*/Под общ. ред.: *Н. Н. Марфенина, С. А. Степанова*. — М.: Модус-К — Этерна, 2005. — 320 с.

Азии, Латинской и Южной Америке. Тому есть несколько причин. Именно в этих странах наблюдается наиболее быстрый рост населения. Сельское хозяйство в этих странах отстало, основной тип земледелия — подсечно-огневой (т. е. вырубил — посеял — забросил), так как почвы в тропиках малоплодородны. К тому же на открытых участках быстро развивается водная эрозия почвы — она попросту смывается в дождливые периоды. Это способ был допустим раньше, когда людей было мало, а лесов много. Сейчас же ситуация сменилась на противоположную. Поэтому единственным способом предотвращения глобальной экологической катастрофы является интенсификация сельского хозяйства, то есть повышение продуктивности имеющихся сельскохозяйственных угодий, и в этом направлении сделано уже немало.

За последние 40 лет урожайность трех основных зерновых культур (пшеницы, риса и кукурузы) возросла в два с лишним раза, причем в последнее десятилетие темпы прироста заметно упали. Это увеличение было достигнуто за счет орошения, минеральных удобрений, новых сортов с увеличенной долей полезной части по отношению к общей, улучшения структуры почвы, борьбы с вредителями, болезнями и сорняками (табл. 5—1). Результатом явилось то, что в 50—80-е гг. прошлого века, несмотря на демографический взрыв, производство зерна на душу населения даже возрастало (табл. 5—2). В наибольшей степени плодами «зеленой революции» воспользовались развитые страны. По данным ФАО, с 1961 по 2000 г. в Европе площадь пахотных земель даже сократилась с 137 до 119 млн га и почти на столько же (17 млн га) возросла площадь лесов. Картина в развивающихся странах была не столь радужной: несмотря на повышение урожайности, наблюдалось возрастание площади пахотных земель (с 631 до 778 млн га) и сокращение площади лесов. Частично это объясняется значительно более быстрым ростом населения в этих странах.

В результате производство риса и пшеницы увеличилось со 127 до 762 млн т.

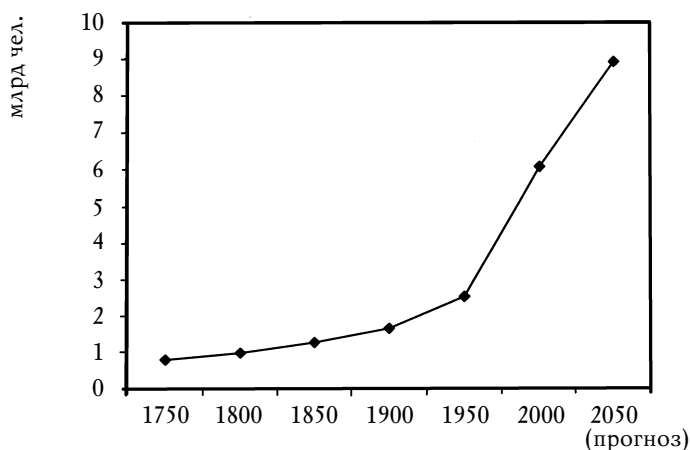


Рис. 5—1. Рост численности населения Земли за последние 250 лет и прогноз на последующие 50 лет

**Изменения в факторах производства растениеводческой продукции  
в развивающихся странах Азии**

	1961	1970	1980	1990	1998
Посевы современных сортов, <i>млн га</i>					
Пшеница	0 (0) <sup>1</sup>	14 (20) <sup>1</sup>	39 (49) <sup>1</sup>	60 (70) <sup>1</sup>	70 (84) <sup>1</sup>
Рис	0 (0) <sup>1</sup>	15 (20) <sup>1</sup>	55 (43) <sup>1</sup>	85 (65) <sup>1</sup>	100 (74) <sup>1</sup>
Площадь орошения, <i>млн га</i>	87	106	129	158	176
Внесение удобрений, <i>млн т</i>	2	10	29	54	70
Количество тракторов, <i>млн шт.</i>	0,2	0,5	2,0	3,4	4,6

<sup>1</sup> В скобках указан процент посевов современных сортов от общей площади.

*Источник: Borlaug N. E. and Christopher Dowswell. The Unfinished Green Revolution — The Future Role of Science and Technology in Feeding the Developing World//Present at conference «Seeds of Opportunity». London, 2001.*

**Численность населения и производство зерна в мире**

Год	Население			Зерно			Производство на 1 чел., кг
	Численность, <i>млн чел.</i>	Прирост за 10 лет		Производство, <i>млн т</i>	Прирост за 10 лет		
		<i>млн чел.</i>	%		<i>млн т</i>	%	
1950	2518	...	...	631	...	...	251
1960	3021	503	20	847	216	34	280
1970	3692	671	22	1103	256	30	299
1980	4434	742	20	1441	338	31	325
1990	5263	829	19	1684	243	17	320
2000	6070	807	15	1842	158	9	303

*Источник: United Nations, World Population Prospects: The 2000 Revision. Highlights. United Nations, New York, 2001. P. 1.*

В 2001—2003 гг. производство зерна в мире по сравнению с 2000 г. практически не изменилось, в то время как население продолжало возрастать.

Начиная с 90-х годов прирост производства зерна замедлился, и показатель производства на душу населения снизился до уровня 70-х годов. Урожайность ряда культур в развитых странах уже вышла на плато, и дальнейшее увеличение производства продовольствия должно быть достигнуто в развивающихся странах, где урожайность все еще достаточно низка и выращивание растений ведется экстенсивными технологиями на небольших фермерских участках. Резерв здесь достаточно большой, но вряд ли удастся использовать его в полной мере. Современные сорта и технологии их выращивания требуют интенсивного ухода: техники, орошения, удобрения, средств защиты растений. Однако уже сейчас в ряде стран наблюдается недостаток пресной воды, а на средства механизации, удобрения, средства защиты растений требуются немалые деньги. Поэтому столь важно обратиться к другому способу интенсификации сельского хозяйства — использованию сортов, полученных с помощью методов генной инженерии.

## ТРАДИЦИОННАЯ СЕЛЕКЦИЯ И ГЕННАЯ ИНЖЕНЕРИЯ РАСТЕНИЙ

Чем же отличается генная инженерия растений (ГИР) от традиционной селекции? В принципе, суть у обоих способов одинакова — создание новых генотипов и отбор из них наиболее ценных, только достигается она разными средствами, и ГИР эффективнее, быстрее, не имеет ограничений по приданию новых признаков.

Селекция зародилась практически одновременно с возникновением земледелия (около 10 тыс. лет назад), так как с первых же дней выращивания растений человек стал отбирать для последующего посева лучшие из них. Основными методами классической селекции являются отбор и гибридизация. Отбор, основанный на явлении естественной генетической изменчивости, использовался в течение всей истории селекции. Именно путем отбора и последующего размножения особей с наиболее ценными признаками в течение сотен и тысяч лет возникли почти все сельскохозяйственные культуры. Некоторые из них совсем не похожи на своих предков. Например, такие разные виды капусты, как белокочанная, цветная и брюссельская, произошли от дикой листовой капусты. Некоторые из сортов, полученных путем отбора, возделываются и поныне. Они известны как сорта народной селекции. Однако таким способом можно лишь выделить уже существующие в популяции признаки (причем за очень длительный срок), но нельзя получить новые.

Другой метод, искусственная гибридизация (скрещивание), возник в XVIII в., и сейчас он является основным методом современной селекции. Он основан на явлении искусственной комбинативной изменчивости, и его возможности ограничены переносом признаков из особей различных видов или родов, способных скрещи-

ваться между собой. Длительность переноса желаемого признака зависит от источника и степени родства с сельскохозяйственной культурой. Для переноса признака из близкородственных видов требуется 5—10 лет (выведение сорта занимает еще больше времени). Более отдаленные виды богаче ценными признаками (например, устойчивостью к болезням и вредителям), но для такого переноса требуется 10—15 лет и больше, если это вообще возможно [14].

В середине XX в. появился ряд новых методов: искусственный мутагенез (повышение частоты мутаций с помощью мутагенов — химических веществ или ионизирующего излучения) и его разновидность полиплоидия; клеточная селекция (отбор на уровне клеток); вегетативная (соматическая) гибридизация (слияние протопластов). Однако, несмотря на возлагавшиеся надежды, все эти методы не произвели ожидавшейся «революции» в селекции сельскохозяйственных культур, хотя с их помощью было получено большое количество ценных сортов. Мутагенез характеризуется случайностью мутаций, кроме того, появляющиеся формы в основном обладают пониженной жизнеспособностью. Клеточная селекция направлена на реализацию признаков, уже заложенных в геноме исходных форм. Соматическая гибридизация позволяет преодолеть нескрещиваемость неродственных видов, но сочетание родительских признаков у получаемых форм также случайно.

Исходный материал, полученный в результате как скрещивания, так и других методов селекции, все равно подвергается отбору, и в результате из тысяч форм только единицы становятся сортами.

Генная инженерия позволяет преодолеть ряд недостатков традиционной селекции: ограниченный набор признаков, случайность их комбинирования, длительность выведения новых сортов. С помощью ее методов возможно перенести в растения генетическую информацию из любого, сколь угодно отдаленного организма — растения, животного, гриба, бактерии. Таким образом, набор переносимых признаков не ограничивается теми, которые имеются в видах, способных скрещиваться с сельскохозяйственными культурами. ГИР позволяет перенести при желании всего один ген, отвечающий за один конкретный признак, т. е. исходный генотип практически не меняется. В результате новый сорт можно вывести

## **Дополнительная информация автора**

---

---

### **Основные понятия**

**Генная инженерия растений (ГИР)** — совокупность методов молекулярной биологии, направленная на конструирование и перенос в растительный геном последовательностей ДНК.

**Трансген** — ген, перенесенный в новое генетическое окружение с помощью методов генной инженерии.

**Генетическая трансформация** — процесс переноса трансгена.

**Генетически модифицированные (трансгенные) растения (ГМР)** — растения, содержащие трансгены.

**Экспрессия гена** — реализация заключенной в нем генетической информации в виде белка и/или фенотипического признака.

уже из нескольких растений. Использование технологии *in vitro*<sup>1</sup> при этом значительно сокращает продолжительность процесса. К примеру, компании «Syngenta» потребовалось 12 лет обычной селекции, чтобы получить сорт кукурузы всего с 10-процентной устойчивостью к кукурузному мотыльку. Для получения почти полностью устойчивой трансгенной Вt-кукурузы ей потребовалось только 5 лет.

Как же получают такие трансгенные растения? Наиболее широко используемый метод генетической трансформации, агробактериальный, был разработан на основе природного процесса. Ученые выяснили, что почвенная бактерия *Agrobacterium tumefaciens* способна переносить в растения свои гены, заставляя растение синтезировать опины, производные аминокислот, ненужные самому растению, но используемые бактериями в качестве источника азота и углерода. Оставалось только модифицировать агробактерии таким образом, чтобы они вместо собственных переносили гены, нужные человеку. Трансформированные клетки отбирают на специальных селективных средах (путем встраивания генов, позволяющих им расти, тогда как обычные клетки гибнут) и затем из них регенерируют целые растения.

Впоследствии был разработан ряд других методов трансформации растительных клеток, из которых наибольшее распространение приобрел биобаллистический, используемый чаще всего для трансформации однодольных. В специальных установках микрочастицы золота или вольфрама с нанесенной на них ДНК ускоряют при помощи сжатого гелия, и они проникают в клетки органа или ткани, используемой в качестве мишени.

## ВОЗМОЖНОСТИ ТРАНСГЕННОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Признаки, которые возможно придать с помощью генной инженерии, весьма разнообразны и в основном ограничены только наличием соответствующих генов. Условно их можно разделить на три группы.

К первой группе относятся признаки, представляющие интерес для производителей сельскохозяйственной продукции. Это устойчивость к засухе, заморозкам, засолению, к определенным болезням или вредителям (например, к колорадскому жуку). С помощью переноса нужных генов можно улучшить поступление питательных веществ из почвы, а также повысить урожайность за счет усиления процессов фотосинтеза, изменения метаболизма углеводов или замедления процессов старения листьев. Возможно также изменить время цветения, повысить укореняемость, преодолеть самонесовместимость пыльцы (все знают, что для получения урожая надо сажать минимум два сорта плодовых деревьев).

Вторая группа признаков интересна уже потребителям — это модификация вкуса и аромата плодов, изменение окраски цветов, увеличение содержания или улучшение качества полезных питательных веществ (белков, жиров, углеводов,

---

<sup>1</sup> *Примеч. автора:* «в стекле» (лат.) — исследования или манипуляции, проводимые на искусственных питательных средах вне живого организма в стерильных условиях. В отличие от *in vivo* («в живом»).

микроэлементов, витаминов) или удаление нежелательных (аллергенных белков, кофеина). Классическим примером трансгенного растения с улучшенной питательной ценностью является «золотой рис». От недостатка витамина А в мире страдают около 230 млн детей, а от анемии, вызванной недостатком железа в пище,— около 2 млрд человек (данные ВОЗ). Эндосперм риса, основного продукта питания в ряде развивающихся стран, не содержит провитамина А. Рис также содержит мало железа, но богат фитиновой кислотой, ингибирующей всасывание железа на 95%. Генные инженеры встроили в рис гены четырех ферментов, которые синтезируют бета-каротин (провитамин А), и такой рис содержит 1,6—2 мкг/г бета-каротина и имеет золотистую окраску, за что он и получил свое название [18]. 300 г такого риса содержит около трети дневной дозы провитамина А, что, по расчетам диетологов, уже достаточно для предотвращения заболеваний и смертности, связанных с недостатком этого витамина. В другой лаборатории в рис встроили ген белка, богатого железом (ферритина), ген фермента, расщепляющего фитиновую кислоту (фитазы), и ген цистеин-богатого белка, усиливающего всасывание железа [12]. Затем две линии скрестили и получили гибридный рис, содержащий провитамин А и обогащенный железом. Решение этих проблем методами генной инженерии заняло всего 8 лет, причем решить их с помощью классической селекции было вообще невозможно.

В третью группу входят растения, представляющие интерес для различных отраслей промышленности и выращиваемые с целью последующей переработки. В них либо изменено количество или качество веществ, уже имеющих в растениях, либо синтезируются совершенно новые. К первым относятся, например, деревья с модифицированным лигнином, что облегчает производство бумаги; ячмень, улучшающий процесс пивоварения. Ко вторым — производящие различные ферменты, вакцины, антитела, биопластик. Это направление получило даже особое название — *molecular farming* — «молекулярное фермерство», а все вышеперечисленные, которые не требуют выделения наработанных веществ, называют *molecular breeding* — «молекулярная селекция».

## ТРАНСГЕННЫЕ РАСТЕНИЯ СЕГОДНЯ...

Площади под трансгенными растениями возросли с 1,7 млн га в 1996 г., когда началось их массовое возделывание, до 67,7 млн га в 2003 г., что составляет уже около 5% от всех пахотных площадей в мире (рис. 5—2). Но так как больше 99% всех трансгенных посевов приходится на сою (63%), кукурузу (23%), хлопок (11%) и рапс (5%), то из занятых этими культурами 272 млн га 25% были засеяны трансгенными сортами (рис. 5—3). 73% площадей под трансгенными культурами было занято растениями с устойчивостью к гербицидам, 18% — с устойчивостью к вредителям (Bt-культуры) и 9% — с сочетанием обоих признаков. Больше всего трансгенных растений выращивают в США (63%), затем следуют Аргентина (21%), Канада (6%), Бразилия и Китай (по 4%). Оставшиеся 2% приходятся на 13 стран. В 2003 г. трансгенная соя занимала в США около 80%, а в Аргентине —

98% всех посевов сои; в Канаде — 68% рапса, а в Китае — 58% хлопка были трансгенными [5].

Причины, по которым в настоящее время наиболее широко возделываются именно эти культуры, именно с этими признаками и именно в этих странах, взаимосвязаны между собой. Дело в том, что устойчивость к гербицидам и насекомым-вредителям часто определяется всего одним геном. Как сами гены, так и способ действия кодируемых ими белков были уже достаточно известны и изучены до наступления эры геной инженерии, что и определило коммерческое применение трансгенной технологии в этом направлении. При разработке новых гербицидов и в научных целях изучались и механизмы устойчивости к ним: путем выделения устойчивых штаммов бактерий, отбора в культуре ткани устойчивых раститель-

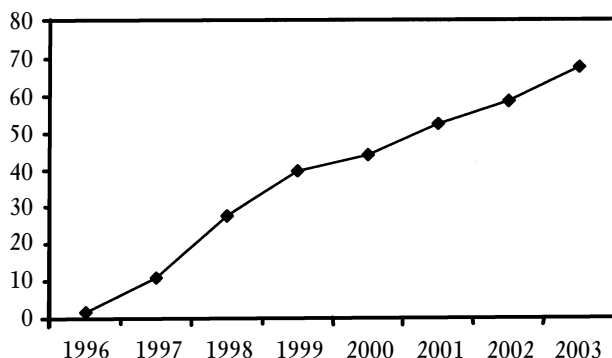


Рис. 5—2. Площади, занимаемые трансгенными растениями в мире (млн га)

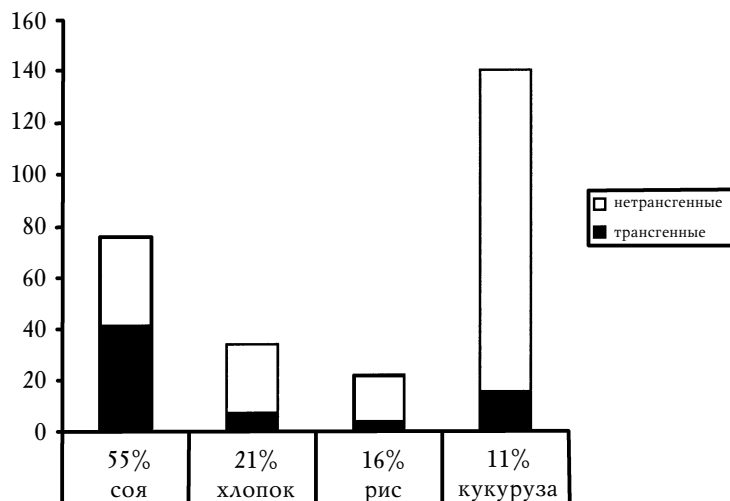


Рис. 5—3. Доля трансгенных посевов в 2003 году и занимаемая ими площадь (млн га)



ных клеток, изучения отобранных в поле, устойчивых диких и культурных видов. В результате для придания растениям устойчивости к гербицидам методами ГИР было разработано три стратегии. Первая — сверхэкспрессия белка-мишени, чувствительного к гербицидам. Вторая — экспрессия мутантной формы белка-мишени, нечувствительного к гербицидам (используется для придания устойчивости к глифосату — гербицид Roundup). И третий — встраивание генов, белки-ферменты которых детоксицируют гербицид (используется для придания устойчивости к фосфинотрицину (глюфосинату). Для борьбы с вредителями применили ген Vt-токсина из почвенной бактерии *Bacillus thuringiensis*. Эта бактерия была открыта в самом начале XX века и уже около 50 лет используется для производства биоинсектицидов.

Так как США являются лидером в области биотехнологии и одновременно стоят на первом месте в мире по производству сои и кукурузы (примерно по 40% всего мирового производства) и на втором — хлопка (около 20%), то нет ничего удивительного, что работы по генетической трансформации там начали проводить с этими культурами. Трансгенные сорта затем стали выращивать и в других странах, где эти культуры имеют важное значение: Китай стоит на первом месте по производству хлопка, Канада — на втором по производству рапса. В Аргентине с 1997 г., когда в ней начали выращивать трансгенную сою, по 2003 г. площади под этой культурой выросли в 1,9 раз (с 6,4 до 12,4 млн га), а производство — в 3,2 раза (с 11 до 35 млн т), и она вышла на третье место в мире, обогнав Китай [4].

И так уж совпало, что изученные к тому времени гены устойчивости к гербицидам и вредителям оказались востребованными для сои, кукурузы, хлопка. В первые фазы своего развития соя растет медленно, и сорняки угнетают растения, значительно снижая будущий урожай. На хлопке от вредителей теряется в среднем 15% урожая на сумму в 3 млрд долл. ежегодно. Для защиты за сезон в среднем проводят 6 обработок (в ряде районов до 30), и стоимость инсектицидов составляет 1,7 млрд долл. (без учета расходов на обработку) [6]. Потери от насекомых-вредителей на кукурузе составляют 9% урожая, или 52 млн т стоимостью 5,7 млрд долл., и около половины из них приходится на долю кукурузного мотылька. Затраты на инсектициды составляют еще 0,55 млрд долл., причем от мотылька они малоэффективны, так как его гусеницы живут внутри стебля [7].

---

---

## Дополнительная информация автора

### Этапы развития генной инженерии растений

- 1983 г.** — создание первых трансгенных растений (Бельгия, Германия, США).
- 1986 г.** — первые полевые испытания трансгенных растений (США, Франция).
- 1992 г.** — первые коммерческие посевы трансгенных растений (табак, устойчивый к вирусам; Китай, около 40 га).
- 1994 г.** — появление на рынке первого генетически модифицированного продукта питания (Flavr Savr — томат с замедленным созреванием; США).
- 1996 г.** — начало широкомасштабного возделывания трансгенных растений (1,7 млн га в 6 странах).

По этим причинам в настоящее время сорта с устойчивостью к гербицидам и вредителям занимают около 99% площадей под трансгенными культурами, но приоритеты постепенно меняются. В 90-е годы в основном работали над растениями, обладающими полезными свойствами для их выращивания, которые сейчас и возделываются на полях. Сейчас же, благодаря расширению наших знаний в области генетики, физиологии, биохимии, открытию и выделению новых генов, основные разработки ведутся уже в области улучшения потребительских свойств у растений, непосредственно употребляемых в пищу. Следующий этап, по прогнозам, это появление совершенно новых в истории сельского хозяйства растений-биофабрик, целенаправленно синтезирующих медикаменты или другие специфические химические соединения.

### **...И ЗАВТРА**

Выращиваемые в настоящее время генетически модифицированные растения в основном сосредоточены в развитых странах, ориентированных на экспорт сельскохозяйственной продукции, и в больших механизированных хозяйствах, практикующих интенсивное сельское хозяйство. большей частью сейчас ГМР выращиваются в районах с высокой продуктивностью для снижения себестоимости продукции (путем сокращения использования ядохимикатов, что также полезно для окружающей среды и здоровья фермеров) или для повышения урожайности за счет снижения потерь от вредителей и сорняков.

Но в будущем наибольший интерес трансгенные растения будут представлять именно для развивающихся стран. Традиционные способы интенсификации — удобрения, ядохимикаты, механизация для них малопригодны из-за высокой стоимости. Между тем именно в развивающихся странах, которые расположены в основном в тропиках и субтропиках, особенно остро стоит проблема защиты от вредителей и болезней, приводящих к большим потерям урожая, так как климат способствует их распространению, а применение ядохимикатов дорого и требует определенной квалификации. Именно в этих условиях выходом могут стать устойчивые сорта. Другая причина низкой урожайности — малоплодородные почвы. Плодородие определяется не только количеством питательных веществ, но и их доступностью для растений. Для решения этой проблемы разрабатываются стратегии повышения доступности питательных веществ (путем выделения корнями ферментов, органических кислот и т. д.) или улучшения их транспорта в растениях.

Тесно связана с проблемой плодородия и повышенная кислотность тропических почв. Кислые почвы занимают около 68% тропической Америки, 38% тропической Азии и 27% тропической Африки [3]. Низкая продуктивность растений на таких почвах в первую очередь вызвана токсичным действием алюминия, который растворяется при кислой реакции среды. В этих условиях он также образует комплексы с такими важными элементами, как фосфор, кальций, магний, железо, делая их недоступными для растений. Для повышения устойчивости растений к алюминию была использована стратегия предотвращения поступления

его ионов в корни путем их связывания органическими кислотами. Трансгенные растения табака и папайи с встроенным геном синтеза лимонной кислоты продемонстрировали устойчивость к алюминию [9]. На почвах с рН = 4 трансгенные растения люцерны с усиленным синтезом сразу нескольких органических кислот имели биомассу корней в два раза большую, чем контрольные, и одновременно повысилась доступность фосфора. Сейчас ведутся работы по встраиванию гена синтеза лимонной кислоты в кукурузу — основную продовольственную культуру в тропиках.

Еще один резерв повышения продуктивности — сокращение потерь путем использования трансгенных растений с замедленным созревaniem плодов. Это представляет большую ценность для быстро созревающих тропических фруктов в развивающихся странах, т. к. недостаток соответствующих условий хранения и развитых транспортных путей к потребителю приводит к большим потерям. В целом же трансгенные растения, способные противостоять вредителям и болезням, рационально использовать питательные вещества и производить в неблагоприятных условиях, долго храниться, позволяют значительно поднять урожайность на уже используемых землях, тем самым способствуя решению продовольственной проблемы в этих странах с одновременным сохранением естественных ландшафтов. Большое преимущество трансгенных сортов по сравнению с обычными сортами интенсивного типа состоит именно в том, что они не требуют глобальных изменений в уже сложившихся системах выращивания растений на маленьких фермах.

Поэтому не случайно, что помимо США, Канады, Австралии трансгенные растения официально разрешены в наиболее населенных странах Азии (Китае, Индии, Индонезии) и Центральной и Южной Америки (Бразилии, Мексике, Колумбии, Аргентине), и площади под ними непрерывно возрастают.

Особая ситуация сложилась в европейских странах. Процедура разрешения выпуска в окружающую среду ГМР была принята в 1990 г. (директива 90/220 Европейской комиссии), и до введения в 1998 г. неофициального моратория на одобрение новых трансгенных растений ее успело пройти 18 трансгенных сортов. В июле 2003 г. мораторий был снят, и в апреле 2004 г. в силу вступили правила об обязательной маркировке продуктов питания с содержанием ГМ-компонентов более 0,9%. В разные годы трансгенные растения в Европе выращивали в Испании, Франции, Португалии и Германии, но они не пользовались большим спросом ни у производителей, ни у потребителей. Выращиваемые в настоящее время трансгенные сорта не направлены непосредственно на повышение урожайности. Однако косвенным путем (за счет сокращения потерь от вредителей и сорняков) они позволяют полнее использовать потенциал растений. Так, при выращивании Вt-хлопка прибавка урожая составила от 5—10% в Китае до 38% в Индии, а Вt-кукурузы — 5% в умеренной зоне возделывания и 10% — в тропической. Но эти сегодняшние сорта, представляющие интерес для производителей, не находят спроса в Европе: урожайность там и так высока (в отличие от развивающихся стран) и она не ориентируется на экспорт сельскохозяйственной продукции (в отличие от США и Канады). В настоящее время там выращивается только несколько десятков тысяч гектаров трансгенной кукурузы — в Испании (почти 7% всей кукурузы) и Германии.

Снижение себестоимости продуктов питания за счет трансгенных сортов также не имеет большого значения для западного потребителя. В развитых странах затраты населения на еду за последние 50 лет уменьшились вдвое в сопоставимых ценах и сейчас они составляют довольно незначительную долю всех расходов (10—20%), поэтому экономия получится небольшой. Избалованного европейца больше заботит качество пищи: его сегодняшний конек — экологически чистые продукты. Хотя стоит отметить, что зерно трансгенной Vt-кукурузы более высокого качества, чем поврежденной вредителями обычной, так как содержит меньше микотоксинов. Возможно, в будущем новые поколения трансгенных растений с улучшенной пищевой ценностью заинтересуют потребителей, а растений с синтезом лекарственных соединений будут востребованы фармацевтической промышленностью.

## ВОЗМОЖНЫЕ ОПАСНОСТИ

Любая технология может нести в себе опасность. Не является исключением из этого правила и генная инженерия растений. Может ли случиться так, что, решая с помощью трансгенных растений продовольственную проблему, мы усугубим не менее важную — экологическую? Противники ГМР утверждают, что возделывание таких растений способно негативно влиять на окружающую среду: через так называемый «горизонтальный перенос генов» в микроорганизмы; непредусмотренное воздействие на организмы, живущие в агроценозе или рядом (нецелевое воздействие); утечку трансгенов с пылью к диким родственникам, отрицательно влияющую на биоразнообразие.

*Горизонтальным переносом генов* (ГПП) называют их передачу другим организмам, а не только от родителей к потомству. Обеспокоенность ряда экологов вызывает возможность переноса из трансгенных растений в микроорганизмы и распространение в их популяции генов устойчивости к антибиотикам, которые используются при получении таких растений. Страхи эти необоснованны по двум причинам. Во-первых, гены устойчивости изначально были выделены именно из микроорганизмов, то есть они уже присутствовали в природной популяции задолго до появления генной инженерии. Такая устойчивость возникает спонтанно и часто — в результате неправильного или избыточного использования антибиотиков. Во-вторых, эксперименты показывают, что перенос участков ДНК из растений в микроорганизмы происходит, если вообще происходит, с очень низкой частотой. Перенос наблюдался только в лабораторных условиях и только гомологичной рекомбинацией, т. е. если в бактерии-реципиенте присутствовал тот же ген или ген с идентичными последовательностями. В силу биологических особенностей вероятность переноса таких генов из природных популяций бактерий (где они уже присутствуют) намного выше, чем из трансгенных растений. В противном случае гены всех организмов уже давно бы перемешались между собой. К примеру, человек ежедневно поглощает с пищей 0,1—1 г нуклеиновых кислот, то есть тысячи и сотни тысяч миллиардов генов, но встраиваний пока не обнаружили. В действительности на сегодняшний день

известно всего несколько случаев ГПГ из растений в бактерии, и самый последний, судя по имеющимся данным, произошел более 10 млн лет назад [13]. Это определили путем построения временной шкалы бактериальной эволюции с помощью биохимических методов. Тем не менее, для исключения даже гипотетической возможности передачи такой устойчивости был разработан ряд технологий. С их помощью стало возможным отказаться от генов устойчивости к антибиотикам (позитивная селекция), удалять эти гены после трансформации (вырезание маркеров) или не позволять им экспрессироваться в бактериях (путем встраивания в них интронов — участков, не кодирующих первичную структуру белка).

*Нецелевые эффекты* трансгенных растений определяются как нежелательное воздействие ГМР или технологий их выращивания на те организмы агроценоза, которые изначально не являются мишенью для воздействия (нецелевые организмы). В таких эффектах обвиняют ГМР с производством токсичных веществ для защиты от вредителей и патогенов, а также с устойчивостью к гербицидам.

Растения-пестициды не требуют обработок средствами защиты растений, поэтому правомерно было бы сравнивать их влияние на окружающую среду с ядохимикатами. Вt-растения, устойчивые к насекомым, содержат ген Vt-токсина. Этот токсин воздействует только на кишечник вредителей, причем обладает высокой специфичностью: различные штаммы бактерии продуцируют токсины, активные против личинок определенных видов из отрядов чешуекрылых, жесткокрылых и двукрылых. Кроме того, этот токсин активизируется только в пищеварительной системе. Препараты этой бактерии уже более 50 лет используются в сельском хозяйстве и лесоводстве в качестве безопасного для людей, животных и полезных насекомых биоинсектицида. К сожалению, они быстро теряют активность и поэтому их доля в мировом производстве инсектицидов составляет менее 2% [8]. Растения с таким геном не требуют обработок инсектицидами, которые действительно негативно влияют на окружающую среду.

Преимущества такого способа были выявлены в скандале с бабочкой-монархом. Для борьбы с кукурузным мотыльком были получены растения кукурузы, содержащие ген Vt-токсина. Эти растения прошли всестороннюю проверку в Агентстве по охране окружающей среды США (EPA) и были признаны безопасными для нецелевых организмов. Тем не менее, в мае 1999 г. в журнале «Nature» появилась статья, в которой сообщалось о повышенной смертности личинок бабочки-монарха (*Danaus plexippus*), питавшихся листьями, покрытыми Vt-пыльцой [11]. Экологи потребовали запретить трансгенные растения, бабочка стала символом анти-ГМР движения, однако ученые не признали достоверность этой работы из-за целого ряда методологических ошибок и начали широкомасштабное изучение данного вопроса. Несколько университетов США и Канады под эгидой Министерства сельского хозяйства США (USDA) в течение двух лет проводили исследования. В результате было установлено, что пыльца Vt-кукурузы не опасна для бабочки-монарха, а также для другой бабочки — парусника поликсены (*Papilio polyxenes*) (обе эти бабочки обитают на растениях вблизи полей), тогда как опасным для нее является применяемый на кукурузе инсектицид широкого спектра действия цихалотрин-лямбда. Верховный Суд США в ответ на поданный Гринписом

судебный иск также постановил, что для полезных насекомых Bt-растения безопаснее пестицидов.

Первые трансгенные растения синтезировали средства защиты постоянно в течение своего периода роста (конститутивно) и во всем растении. Сейчас же, путем использования различных промоторов (регуляторных областей генов), можно добиться экспрессии трансгенов только в определенных органах или тканях, только при определенных условиях (например, при нападении вредителей) или только в определенный период времени (например, в момент созревания).

Другие обвинения касаются использования гербицидов на трансгенных растениях. Вред заключается в том, что обработки химикатами опосредованно снижают численность насекомых, птиц и мелких животных — через уничтожение сорняков, которыми они питаются или используют в качестве укрытия. На это стоит заметить, что уничтожение сорняков проводится всегда и везде. Гербициды при этом применяют не только на трансгенных растениях, но и на обычных, и, как правило, более токсичные. Используется и множество других методов борьбы — агротехнические, механические, физические, биологические. Искусственные системы (поля, сады и т. п.) создаются специально для получения сельскохозяйственной продукции. Поэтому рассматривать в них сорную растительность не в качестве конкурентов культурным растениям, а как убежище или источник пищи для сопутствующей фауны представляется не вполне уместным.

*Вертикальная утечка генов* — так называется перенос ДНК от родительского растения своим потомкам, представляющий основную возможную опасность использования ГМР для окружающей среды. Этот перенос осуществляется через пыльцу при переопылении культурных растений (любых, не только трансгенных) с близкородственными культурными, сорными или дикорастущими видами. Такая утечка из сельскохозяйственных культур в дикорастущие и сорные виды происходит постоянно, а началась она с момента использования человеком процесса селекции. Этот процесс идет и в обратном направлении — такая утечка генов, как правило, ухудшает качества культурных растений. По этой причине в семеноводстве для предотвращения переопыления с дикими родственниками используют так называемую пространственную изоляцию. Чем же может угрожать утечка трансгенов?

В ноябре 2001 г. в журнале «Nature» появилась статья об обнаружении в мексиканском штате Оаксака, родине кукурузы, в образцах местных сортов последовательностей трансгенной ДНК [15]. Это сообщение было подхвачено рядом экологических организаций и развернуто в кампанию по запрещению импорта и выращивания трансгенных растений в центрах видообразования, т. к. это якобы может угрожать природному генетическому биоразнообразию. Ученые Международного центра по изучению кукурузы и пшеницы (СИММУТ, Мексика) проверили большое количество образцов (более 300) злополучной кукурузы как из различных областей того же штата, так и из собственной коллекции, но ни в одном из них им так и не удалось обнаружить трансгенную ДНК. Но дело даже не в этом. Существует ли вообще угроза биологическому разнообразию от трансгенных растений?

Словари определяют биоразнообразие как совокупность всего разнообразия, существующего на различных уровнях организации живого вещества — генетиче-

ского, видового, экосистемного. Трансгенные растения угрожают якобы генетическому разнообразию (генофонду отдельного вида) и видовому (числу видов в экосистеме). В первом случае утечка трансгенов уменьшит ресурс ценных генов, используемых для селекции, и селекционеры не смогут вывести новые сорта. Во втором случае утечка приведет к появлению у родственных диких растений новых свойств, которые позволят им вытеснить естественную флору, а вместе с ней и другие организмы, зависящие от нее.

Письмо об ошибочности взгляда на генетическое разнообразие как на застывшую, статичную систему, в которой введение нового гена обязательно влечет удаление старого, на примере все той же кукурузы появилось в «Science» еще в начале 2000 г., то есть задолго до «кукурузной» истории [10]. Исследования СИММУТ показали, что происходит постоянное изменение сортов в результате как биологии растения (перекрестное опыление), так и деятельности человека (6000 лет постоянного отбора) — генофонд сегодня уже отличается от того, каким он был 5 лет назад. Это справедливо для любого вида — возникают мутации, особи скрещиваются между собой, возникают все новые и новые комбинации генетических последовательностей. Виды непрерывно изменяются, это происходило на протяжении всей эволюции, и именно это позволяет виду выжить, приспособившись к изменениям окружающей среды. Встраивание в растения генов из таких организмов, которые не могут передать гены естественным путем, наоборот, будет только способствовать генетическому биоразнообразию.

Несостоятельными являются и утверждения, что перенос какого-либо трансгена придаст дикому виду такое преимущество, что он вытеснит все остальные. Дикое растение, широко используемое селекционерами для выведения новых сортов в качестве донора нужных признаков, не вытесняет окружающие. Все культурные растения не выдерживают конкуренции с дикими, они зависят от человека и способны существовать только с его помощью. В процессе селекции он очень часто придавал признаки, ненужные и даже вредные в природе. К примеру, из дикорастущей пшеницы с ломким колосом (что способствует распространению вида, но неудобно для сбора) человек вывел пшеницу с нераспадающимися колосьями (что облегчает сбор, но препятствует распространению). По выживаемости культурные растения никогда не сравнятся с дикими — у них иное предназначение. Кроме того, природной экосистеме присуща саморегуляция: возрастание численности любого вида тут же приводит к размножению питающихся им хищников (травоядных), паразитов и патогенов, которые и регулируют его численность, препятствуя чрезмерному возрастанию, поэтому доминирование одного вида в естественных условиях невозможно, оно возможно только в искусственных — сельскохозяйственных ландшафтах. Но такие виды способны существовать только при помощи человека. Тем не менее, разрабатываются технологии, позволяющие предотвратить возможность переноса генов с пылью, например, перенос трансгенов в хлоропласты (в пыльце они отсутствуют).

Использование ГМР в принципе может повлиять на различные виды в агроценозе, питающиеся вредителями и сорняками или паразитирующими на них, но агроценоз — это искусственная система, а естественное сообщество живых организмов на этом месте уже исчезло. С другой стороны, использование более безопасных для нецелевых видов по сравнению с ядохимикатами трансгенных

растений может только способствовать улучшению видового биоразнообразия на полях.

В действительности же биоразнообразию угрожает превращение природных ландшафтов в сельскохозяйственные. Так, нобелевский лауреат Норманн Борлоуг писал, что для получения урожая 1998 г. по технологиям 1950 г. потребовалось бы дополнительно распахать 1,2 млрд га земли, то есть 33% всех пастбищ или 29% всех лесов в мире, а с учетом меньшей продуктивности этих земель — и того больше. Никакое использование удобрений и ядохимикатов и тем более генетически модифицированных растений не сравнится с ущербом окружающей среде от такого развития событий — более 90% видов растений и животных обитают в лесах (в тропических — около 70%). Кстати, в истории с бабочкой-монархом энтомологов значительно больше беспокоила хозяйственная деятельность человека в местах зимовки этих бабочек, разрушающая их естественную среду местообитания. Генная инженерия растений, как и другие способы интенсификации сельского хозяйства, позволяет сохранить нетронутыми огромные площади лесов, степей, лугов. А в идеальном случае позволит даже сократить площадь земель сельскохозяйственного назначения — что и произошло в последние десятилетия в Европе под влиянием «зеленой революции». Вот почему генная инженерия способствует сохранению биоразнообразия, а вовсе не уничтожает его.

Критики генной инженерии утверждают, что сама природа этой технологии способствует проявлению в трансгенных растениях так называемых непредсказуемых эффектов. Так как встраивание трансгена в геном происходит случайным образом, то один и тот же ген в зависимости от места вставки может по-разному влиять на работу окружающих генов (позиционный эффект). А поскольку гены переносятся из самых разных, подчас весьма отдаленных организмов, то в новом окружении этот ген может влиять на несколько признаков (плейотропный эффект). В качестве примеров приводятся соя с повышенной чувствительностью к высоким температурам, удлинение периода покоя семян у рапса, ускоренное цветение тополя и другие. На самом деле все непредсказуемые эффекты в равной степени присущи и обычной селекции. Гибриды кукурузы с цитоплазматической мужской стерильностью типа Техас занимали в США более 85% всех посевов. Однако в начале 70-х годов там разразилась эпифитотия грибкового заболевания *southern leaf blight*, поразившего только эти гибриды. Выяснилось, что белок патогена взаимодействовал с мембраной митохондрий, что приводило к нарушению дыхательной функции [1].

Не менее непредсказуемыми могут быть сорта, полученные с помощью мутагенеза — такая обработка затрагивает множество генов. В 2003 г. сорта рапса, выведенные традиционной селекцией, занимали в Канаде всего 10% площади. Остальные 90% приходились на гербицидоустойчивый рапс: 68% — трансгенный и 22% — полученный путем мутагенеза. Растения со встройкой всего одного гена подвергаются тщательному изучению и контролю в отличие от растений, прошедших гораздо более мощную обработку химикалиями или облучением. В плодоводстве широко используется так называемая клоновая селекция — отбор естественных мутаций. Примерами служат многие всем известные красноокрашенные сорта яблони и груши. Однако вместе с изменением окраски у них иногда наблюдается уменьшение лежкости плодов или другие отклонения.



В докладе группы экспертов ФАО и ВОЗ (2000) сообщалось, что основное отличие трансгенной технологии от обычной селекции заключается в способности переносить новые признаки с большей скоростью и точностью. Там же отмечалось, что «возможное проявление непредсказуемых эффектов не является уникальным для технологии рекомбинантной ДНК, но также общим явлением для традиционной селекции». Так как по существующим законам до выхода на поля трансгенные растения изучают всесторонне и тщательно, по сравнению с обычными сортами, то и вероятность найти различные отклонения выше. К примеру, изменения в содержании проламинов и ксантофиллов в трансгенном рисе не детектировались стандартными анализами, а были обнаружены только с использованием специализированных методов — гель-электрофореза и высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ). Очень вероятно, что доскональное изучение обычных сортов также могло бы обнаружить в них ряд отклонений. Помимо нейтральных и негативных эффектов, у трансгенных растений наблюдались и положительные: в картофеле снижалось содержание гликоалкалоидов, в рисе повышалось содержание витамина В<sub>6</sub>. Эти растения «с отклонениями» могут быть использованы как доноры ценных признаков.

Инго Поттрикус, автор «золотого риса», продукта, который явился ответом на все критические замечания ГМР-оппозиции, замечает, что оппозицию беспокоит не столько забота об окружающей среде, здоровье потребителей, необходимость помощи бедным и обездоленным, сколько решительная борьба против технологии ради политического успеха.

Как и любую технологию, ГИР можно применить и в неблагоприятных целях. Так как с ее помощью можно изменить уровень накопления в растениях различных соединений или синтезировать совершенно новые вещества, то можно предположить создание растений с повышенным уровнем синтеза токсинов, наркотических веществ; сниженной устойчивостью к неблагоприятным факторам внешней среды и т. д., что необходимо иметь в виду при выработке государственных и международных правил реализации проектов генной инженерии.

## РЕАЛЬНЫЕ ПРЕИМУЩЕСТВА

Положительное влияние генной инженерии на окружающую среду может быть как прямым, так и косвенным. Целое направление этой технологии заключается в создании растений, предназначенных для фиторемедиации («растительное излечение») — очистки почвы и воды от тяжелых металлов, органических соединений, радиоактивных веществ, а воздуха в городах — от оксидов азота. Другие ГМР могут быть использованы в качестве биосенсоров — для обнаружения различных загрязнителей.

Достигается это тремя различными способами:

- аккумуляцией — поглощением из почвы и накоплением в растениях вредных соединений (тяжелых металлов);

- деградацией — синтезом в растениях ферментов, которые способствуют расщеплению загрязнителей (органических соединений);
- стабилизацией — производством веществ, которые иммобилизуют загрязнители на поверхности корней или почвы.

В США подсчитали, что стоимость фиторемедиации одного акра почвы, загрязненной свинцом, на глубину 50 см составляет 60—100 тыс. долл., тогда как традиционный метод очистки, который заключается в удалении, перевозке и захоронении такого же объема почвы, обойдется в 400—1700 тыс. долл.

Косвенную пользу приносит ряд других разработок. Например, трансгенные лесные породы в конечном итоге позволят сохранить нетронутыми лесные насаждения. Леса, помимо расчистки под посевы, вырубаются для получения древесины (к примеру, спрос на древесину тропических ценных пород возрос с 50-х годов в 15 раз), а также: производства бумаги, заготовки топлива (в развивающихся странах для этих целей используется более трети ежегодно вырубаемого леса). Создание искусственных плантаций, на которых будут выращиваться трансгенные деревья с особыми свойствами, могло бы способствовать сохранению лесов.

Примерами таких разработок являются:

- деревья (тополь, эвкалипт) с ускоренным ростом, выращиваемые с целью получения биомассы для производства этанола или других промышленных целей;
- деревья с модифицированным содержанием лигнина: его уменьшение повышает эффективность производства бумаги, а повышение — увеличивает энергетическую ценность и прочностные характеристики;
- деревья с окрашенной в красно-коричневый цвет древесиной, имитирующие редкие и ценные породы.

Особенно интенсивно разработки с трансгенными деревьями (в основном тополем) ведутся в Китае. В свое время эта страна лишилась  $\frac{3}{4}$  всех лесов и свои потребности в древесине планирует удовлетворять за счет искусственных насаждений.

Большую ценность могут представлять растения, непосредственно синтезирующие биопластик; они позволят сократить потребность в нефти, и такой пластик быстро разлагается микроорганизмами — в течение нескольких месяцев, тогда как полиэтилену на это требуется 100—200 лет. Например, получение поли-3-гидроксимасляной кислоты ферментативным путем из растительного крахмала занимает четыре этапа, в то время как при ее непосредственном синтезе в растениях — всего один, и для получения того же количества пластика трансгенных растений потребуется в 4 раза меньше [16]. Путем встраивания генов биосинтеза этого вещества в хлоропласты арабидопсиса удалось довести его содержание до 4% от сырого веса (или до 40% — от сухого). Еще пример: окрашенный уже в растениях хлопок не нуждается в красящих веществах, а их производство и сам процесс окраски являются экологически вредными.

Наконец, растения, обладающие устойчивостью к вредителям и болезням, не нуждаются в ядохимикатах. Около 40% всех инсектицидов используется на

хлопке, и выращивание Bt-хлопка позволило сократить количество обработок в 2—3 раза. В целом же в мире в 2001 г. благодаря трансгенному хлопку использование инсектицидов на этой культуре сократилось на 13%, а в некоторых странах, специализирующихся на его выращивании, применение пестицидов сократилось еще больше: в Китае — на 61%, в США — на 31%, в Австралии — на 27%. Одновременно происходит уменьшение потребления горючего за счет сокращения использования техники. Эта экономия составила в 2000 г. в США на хлопке 9,6 тыс. м<sup>3</sup>. В том же году канадские фермеры за счет ГМР снизили потребление дизельного топлива на 31 тыс. м<sup>3</sup>, что вызвало двойной эффект: снижение нагрузки на почву и выбросов углекислого газа на 110 тыс. т. Таким образом, возделывание трансгенных растений уже привело к уменьшению загрязнения окружающей среды ядохимикатами, увеличению числа полезных насекомых, снижению риска отравления фермеров инсектицидами, а также сокращению выбросов в атмосферу углекислого газа.

## РОССИЙСКИЙ ПУТЬ

В последний десяток лет на Западе вошли в моду биопродукты — продукты питания, выращенные с использованием органического земледелия, а также косметика, мебель, одежда, произведенные только из природных компонентов. Причина ясна — на насыщенном товарами рынке необходимо постоянно изыскивать новые способы привлечения покупателей, и товары с приставкой «био» всего лишь один из них. К примеру, «биохлеб» в два раза дороже обычного, но зато он смолот из экологически чистого зерна на мельнице без единого гвоздя. Рынок биопродуктов составляет в Европе около 2—3% всего рынка в целом, в США экологически чистые продукты питания занимают примерно 2% рынка.

Как известно, «органическим земледелием» называют такую систему возделывания растений, при которой исключено использование минеральных удобрений (только органические), химических средств защиты растений и трансгенных растений. Кроме того, выращивание должно проводиться в экологически чистом месте. В целом в мире органическое сельское хозяйство занимает 2—3% пахотных площадей. Лидирует здесь Европа: Швейцария (9%), Австрия (8,6%), Италия (6,8%), Швеция (5,2%), Чехия (3,9%), Великобритания (3,3%), то есть страны, давно решившие продовольственные проблемы.

В последнее время все чаще слышны призывы к специализации российского сельского хозяйства на производстве экологически чистой продукции. Доводы кажутся весьма весомыми: стоит такая продукция в 1,5—2 раза дороже обычной, минеральные удобрения и тем более ядохимикаты в последние годы почти не использовались, трансгенные растения к выращиванию пока не разрешены, а большой процент сельского населения и дешевизна рабочей силы компенсируют повышенную трудоемкость такого производства.

К сожалению, эти теоретические выкладки не подкреплены цифрами, а между тем простой подсчет баланса питательных веществ в почве показывает невозможность такого развития событий.

По данным Госкомстата, в 2003 г. в Российской Федерации валовой сбор зерна составил 72,5 млн т, сахарной свеклы — 18,8 млн т, подсолнечника — 4,8 млн т, картофеля — 36,6 млн т, овощей — 14,7 млн т. Суммарно все эти культуры вынесли из почвы с урожаем: азота — 3,1 млн т, фосфора — 1,1 млн т, калия — 3,3 млн т. Расчеты показывают, что такое количество нужных растениям питательных веществ содержится в 450—600 млн т органических удобрений (навоза), а учитывая, что коэффициент усвоения составляет 0,2—0,4, то для восполнения потерь требуется вносить около 1,5 млрд т ежегодно (при теперешних урожаях).

Другой вариант подсчета. Нормы внесения органических удобрений составляют 20—50 т/га (в зависимости от культуры), и это с учетом минеральных, а без них надо вносить еще на 20—30 т/га больше. Так как под вышеперечисленными культурами в России занято 53—55 млн га, то для них потребуется (если не использовать минеральные удобрения) по самым скромным подсчетам около 2,5 млрд т навоза. Эта цифра превышает предыдущую, т. к. фактические урожаи значительно ниже реально возможных в связи с несовершенной агротехникой, плохим уходом, потерями от вредителей и болезней и т. п.

Между тем, одна голова крупного рогатого скота производит в год, в зависимости от условий содержания, 6—10 т навоза, то есть потребуется около 200—250 млн голов, причем взрослых особей. Однако, по данным того же Госкомстата, к 1 декабря 2003 г. поголовье крупного рогатого скота в России составило всего лишь 25,6 млн голов (причем всех возрастов). Имеющиеся также 17,2 млн голов свиней и 17,0 млн голов овец и коз эквивалентны еще 6—7 млн голов КРС. Разумеется, органические удобрения не ограничиваются только навозом, существуют еще торф, фекалии, сапропель и прочие, но с другой стороны, перевозка (даже на небольшие расстояния) и хранение сотен миллионов тонн всей этой органики вызывает очень много проблем, в том числе экологического и санитарного свойства.

Ситуация усугубляется разбросом содержания питательных веществ в органических удобрениях, их несбалансированностью (в торфе соотношение  $N : P_2O_5$  составляет 7—10:1, а  $N : K_2O$  — 10—15:1) и в связи с их замедленным действием невозможностью быстрой коррекции нехватки того или иного питательного вещества.

Таким образом, удобрять поля с органическим земледелием будет нечем, и производство экологических продуктов питания будет весьма напоминать ситуацию в России в прошедшие века, когда среднему крестьянину, имевшему одну корову и одну лошадь, нечем было удобрять поля и урожай составлял сам-друг—сам-четверт, т. е. всего в 2—4 раза больше посеянного (зато экологически чистого). Земледелие вплоть до середины XX века (вспомним целину) шло по экстенсивному пути: истощенные участки забрасывались и распахивались новые.

Поэтому призывы сделать Россию «житницей» экологически чистых продуктов для всего мира выглядят не более чем утопией. Более реальным остается отведение под органическое земледелие всего лишь несколько процентов угодий, т. е. как и во всем мире.

А нужна ли нам генная инженерия, которая больше подходит развивающимся странам, а мы себя к таким не относим? Увы, как это ни обидно для национальной

гордости, ситуация с сельским хозяйством в России больше сходна с ситуацией в развивающихся странах.

Потери от вредителей и болезней очень велики, а ядохимикаты дороги и культура их применения достаточно низка. Ярким примером здесь является картофель. Россия занимает по площадям и сборам второе место в мире после Китая, но урожайность в ней одна из самых низких в мире (ниже только в Африке). Конечно, свою роль играют и не самые лучшие климатические условия, но это не главное. Огромные потери (по разным оценкам, 30—50%) вызваны вредителями и болезнями, а т. к. около 90% картофеля выращивается в частных, в основном приусадебных хозяйствах, то задействовать весь комплекс химических обработок весьма сложно. Выходом здесь мог бы стать трансгенный картофель с устойчивостью к вредителям и болезням.

Более половины всего урожая зерновых в России приходится на Приволжский и Южный федеральные округа, расположенные в засушливых зонах с высокой долей засоленных почв, а даже при слабом засолении урожайность пшеницы резко снижается. Вторая основная зона возделывания злаков — Центральный и Сибирский округа расположены в зоне с умеренным климатом, способствующим широкому распространению грибных заболеваний. Эти проблемы могут быть решены выращиванием трансгенных сортов пшеницы, устойчивых к засухе, засолению и грибным фитопатогенам.

Между тем, выращивание для коммерческих целей трансгенных растений в нашей стране пока не разрешено. Но это не самое страшное. Гораздо хуже то, что некомпетентность ответственных лиц такова, что стало возможным принятие в декабре 2001 г. в составе Федерального Закона Российской Федерации «Об охране окружающей среды» статьи 50 «Охрана окружающей среды от негативного биологического воздействия», часть первая которой гласит: «Запрещается производство, разведение и использование растений, животных и других организмов, не свойственных естественным экологическим системам, а также созданных искусственным путем, без разработки эффективных мер по предотвращению их неконтролируемого размножения, положительного заключения государственной экологической экспертизы, разрешения федеральных органов исполнительной власти, осуществляющих государственное управление в области охраны окружающей среды, иных федеральных органов исполнительной власти в соответствии с их компетенцией и законодательством Российской Федерации».

Это означает, что без специального разрешения запрещено выращивание, скажем, картофеля, т. к. он не свойственен естественным экологическим системам (он прибыл к нам из Южной Америки), а заодно и всех сортов и гибридов культурных растений, поскольку они созданы искусственным путем селекционерами. Как говорится, комментарии излишни.

Глобальные проблемы человечества тесно связаны между собой, и решение только одной из них недостаточно для устойчивого развития. Генная инженерия, конечно же, не является панацеей от всех бед, но она может способствовать снижению остроты ряда из них, а именно:

- продовольственной безопасности — способствуя увеличению производства продовольствия за счет повышения урожайности и снижения потерь, а также улучшению его качества;
- экологической безопасности — способствуя сохранению биоразнообразия путем сохранения естественных ландшафтов за счет повышения продуктивности уже имеющихся сельскохозяйственных угодий, а также сокращению применения ядохимикатов;
- рационального использования природных ресурсов — способствуя экономии трудовых и энергетических ресурсов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Araya A., Zabaleta E., Blanc V., Begu D., Hernould M., Mouras A., Litvak S. RNA editing in plant mitochondria, cytoplasmic male sterility and plant breeding//Electronic Journal of Biotechnology. 1998. Vol. 1. P. 1-9.
2. Borlaug N. E. and Christopher Dowswell. The Unfinished Green Revolution — The Future Role of Science and Technology in Feeding the Developing World//Present at conference «Seeds of Opportunity». London, 2001.
3. Eswaran H., Reich P., Beinroth F. Global distribution of soils with acidity. In AC Moniz, ed, Plant-Soil Interactions at Low pH. Brazilian Soil Science Society. Sao Paulo, Brazil, 1997. P. 159—164.
4. FAO/WHO 2000. Safety aspects of genetically modified foods of plant origin. Report of a joint FAO/WHO. Expert consultation on foods derived from biotechnology. WHO, Geneva Switzerland, 29 May — 2 June 2000. 35 p.
5. James C. (2003a). Global Status of Commercialized Transgenic Crops: 2003//ISAAA Briefs, № 30.
6. James C. (2002). Global Review of Commercialized Transgenic Crops: 2001. Feature: Bt Cotton//ISAAA Briefs, № 26.
7. James C. (2003b). Global Review of Commercialized Transgenic Crops: 2002. Feature: Bt Maize//ISAAA Briefs, № 29.
8. Jouanin L., Bonade-Bottino M., Girard C., Morrot G., Giband M. Transgenic plants for insect resistance. Plant Science. 1998. Vol. 131. P. 1—11.
9. Juan Manuel de la Fuente, Verence Ramirez-Rodriguez, Jose Luis Cabrera-Ponce, Luis Herrera-Estrella. Aluminum Tolerance in Transgenic Plants by Alteration of Citrate Synthesis//Science. 1997. Vol. 276. P. 1566—1568.
10. Juan Pablo Ricardo Martinez-Soriano and Diana Sara Leal-Klevezas. Transgenic Maize In Mexico: No Need For Concern//Science. 2000. Vol. 287. P. 1399.
11. Losey J. E., Rayor L. S. and Carter M. E. Transgenic pollen harms monarch larvae//Nature. 1999. Vol. 399. P. 214.
12. Lucca P., Hurrell R., Potrykus I. Genetic engineering approaches to improve the bioavailability and the level of iron in rice grains. Theoretical and Applied Genetics. 2001. Vol. 102. P. 392—397.
13. Nielsen K. M., Bones A. M., Smalla K., van Elsas J. D. Horizontal gene transfer from transgenic plants to terrestrial bacteria — a rare event?//FEMS Microbiology Reviews. 1998. Vol. 22. P. 79—103.
14. Prem P. Jauhar Genetic engineering and accelerated plant improvement: Opportunities and challenges. Plant Cell, Tissue and Organ Culture. 2001. Vol. 64. P. 87—91.
15. Quist D., Chapela I. H. Transgenic DNA introgressed into traditional maize landraces in Oaxaca, Mexico//Nature. 2001. Vol. 414. P. 541—543.

16. *Steinbuechel A. and Fuchtenbusch B.* Bacterial and other biological systems for polyester production//Trends in Biotechnology. 1998. Vol. 16. P. 419—427.

17. United Nations, World Population Prospects: The 2000 Revision. Highlights. United Nations, New York, 2001. P. 1.

18. *Ye X., Al-Babili S., Klöti A., Zhang J., Lucca P., Beyer P., Potrykus I.* Engineering the provitamin A ( $\beta$ -carotene) biosynthetic pathway into (carotenoid-free) rice endosperm//Science. 2000. Vol. 287. P. 303—305.