

ИНВАЗИОННЫЙ ПОТЕНЦИАЛ ГМ-РАПСА

© 2025 Викторов А.Г.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН, Москва 119071, Россия
e-mail: aleviktorov@ya.ru

Поступила в редакцию 15.09.2028. После доработки 08.11.2025. Принята к публикации 18.11.2025

В обзоре рассмотрена почти 30-летняя история выращивания биотехнологических сортов масличного рапса (*Brassica napus*), продаваемых под торговой маркой «канола». Трансгенные конструкции, обеспечивающие устойчивость к неселективным гербицидам, усилили высокий инвазионный потенциал рапса как такового, давая ГМ-сортам селективное преимущество перед обычными сорняками.

Популяции самосеяков ГМ-рапса стали постоянным атрибутом транспортной инфраструктуры в странах, где рапс выращивается, в странах, куда его семена импортируются, и в странах, через которые происходит этот транзит.

Происходит передача трансгенов от ГМ-рапса родственным видам капустоцветных. Обнаружены популяции сорняков, в которых циркулируют трансгенные конструкции устойчивости к неселективным гербицидам. Эти популяции со временем приобретают устойчивость и к другим гербицидам. Так, в Аргентине, где никогда не выращивался ГМ-рапс, широко распространяется популяция трансгенной сурепицы *Brassica rapa*, устойчивой к пяти гербицидам.

В 2024 г. площадь мировых посевов рапса (в том числе канолы) равнялась 42,9 млн га, из которых 10,448 млн га (24,3%) заняты трансгенными сортами. Показательно, что с 2012 г. по настоящее время площади посевов трансгенных сортов рапса (канолы) остаются на уровне 10–11 млн га. Прекращение роста и стабилизация этого показателя в начале 2010-х годов коррелирует с появлением основного корпуса данных о высоком инвазионном потенциале ГМ-сортов этой культуры.

Ключевые слова: генетически модифицированные организмы, неселективные гербициды, глифосат, самосеяки, инвазии, сорняки, *Brassicaceae*, *Brassica napus*, *Brassica rapa*.

DOI: 10.35885/1996-1499-18-4-29-44

Введение

Семейство *Brassicaceae* включает более 300 родов и около 400 видов растений, широко распространённых по всему миру. Представители этого таксона веками выращиваются для получения пищи, корма для сельскохозяйственных животных, приправ, масел, а также в качестве декоративных культур. Все шесть основных культивируемых видов *Brassica* генетически связаны между собой. Считается, что в своё время произошла естественная гибридизация между тремя диплоидными видами (репой *Brassica rapa* L, капустой огородной *Brassica oleracea* L и горчицей чёрной *Brassica nigra* L), которая привела к появлению трёх аллотетраплоидов (рапса *B. napus* L, абиссинской горчицы *B. carinata* A. Braun и горчицы сарептской, или русской, *Brassica juncea* (L.) CZERN., 1859). Таким образом, широко возделываемый вид *B. napus* ($2n =$

$4x = 38$) возник в результате естественного межвидового скрещивания между *B. rapa* ($2n = 2x = 20$) и *B. oleracea* ($2n = 2x = 18$). Судя по всему, это событие произошло несколько десятков тысяч лет назад в Средиземноморье [Tillería et al., 2023].

Семена рапса считались непригодными в качестве пищи людей и корма для животных из-за высокого содержания эруковой кислоты и глюкозинолатов. В Европе это растение начали выращивать в XIII веке лишь с целью получения масла для осветительных приборов (уличных фонарей, ламп и лампад). В Канаде масштабные посевы рапса появились в 1942 г., когда возник дефицит технического масла для смазки механизмов военных кораблей [CFIA, 2017]. Интенсивные селекционные программы впоследствии позволили получить сорта *B. napus*, семена которых имели низкое содержание эруковой кислоты и глюкозинолатов.

Эти сорта рапса получили зонтичное название «канола». Торговая марка «Канола (Canola)» происходит от словосочетания «канадское масло с низкой кислотностью (Canadian oil, low acid)», она зарегистрирована в Канаде в 1970 г. В 1986 г. в торговую марку «Канола» были внесены изменения, согласно которым она могла применяться только к сортам *B. napus*, из которых можно получить рапсовое масло, содержащее менее 2% эруковой кислоты, и муку, имеющую менее 30 мкмоль глюкозинолатов на грамм. Лицензионные соглашения позволяют подписавшим им компаниям использовать слово «канола» и символ цветка с четырьмя лепестками на всех продуктах, которые соответствуют стандартам и спецификациям Канадского совета по каноле (Canola Council of Canada) [Kneen, 1992]. В мировой литературе принято термин «канола (ГМ-канола)» использовать в случаях, когда речь идёт о растениях, выращенных из семян, полученных согласно этому лицензионному соглашению, во всех других случаях используется термин «рапс (ГМ-рапс)».

Семена современных сортов канолы содержат от 35 до 45% масла. Этот продукт занимает в Канаде 80% рынка салатного масла, 56% рынка шортенингов (кондитерских кулинарных жиров) и 42% рынка маргаринов. Масло канолы также используется в косметике, типографских красках, кремах для загара, промасленных тканях, рецептурах пестицидов и в промышленных смазках. Мука канолы (побочный продукт при извлечении масла из семян) имеет высокое содержание белка и широко используется в качестве корма сельскохозяйственных животных. Некоторые сорта канолы, выведенные уже в XXI веке, употребляются в качестве сырья для производства биотоплива. Их отличает высокое содержание эруковой кислоты, повышающей качество топлива, с одной стороны, а с другой – делающих их непригодными для применения в кулинарии, однако, несмотря на формальное противоречие названия с химическим составом, они также позиционируются на рынке как «канола» по разрешению Канадского совета по каноле [CFIA, 2017].

В настоящее время рапс относится к числу важнейших сельскохозяйственных куль-

тур благодаря разнообразному ассортименту как пищевых, так и технических продуктов, получаемых из него. Как универсальная культура, он может выращиваться во многих климатических условиях. Его также используют в программах севооборота, особенно с зерновыми культурами, для прерывания жизненных циклов фитопатогенов и замедления развития устойчивости к гербицидам. В последнее время мировое производство рапса, в том числе канолы, составляет приблизительно 90 млн т в год. Крупнейшими производителями этой культуры являются страны ЕС, которые производят порядка 20 млн т (22% от общего мирового производства), Канада – 19 млн т (21%), Китай – 16 млн т (18%), Индия – 12 млн т (13%) и Австралия – 6 млн т (7%). Ожидается, что мировое производство, потребление и спрос рапса возрастут в краткосрочной и среднесрочной перспективе. Так, Международный совет по зерну прогнозирует, что в сезоне 2025/2026 посевные площади достигнут 44 млн га. Если это произойдёт, рапсом будет засеяна самая большая площадь за всю историю сельского хозяйства. Ожидается, что рынок рапсового масла вырастет с 38,91 млрд долларов США в 2025 г. до 51,1 млрд долларов США к 2032 г., что соответствует среднегодовому темпу роста в 3,97%. Этот рост во многом обусловлен растущим использованием рапсового масла в качестве сырья для производства дизельного топлива. Так, например, в США почти 60% импортируемого рапсового масла потребляется этим сектором экономики. С октября 2023 г. по февраль 2024 г. импорт рапсового масла в США достиг 1,3 млн т, что на 21% больше, чем за аналогичный период предыдущего года. На мировом рынке масличных культур рапс (канола) занимает третье место после сои и хлопчатника, опережая даже подсолнечник. Это объясняется экономической выгодой: семена, собранные с 1 га рапсового поля, дают 1100 кг масла, в то время как такой же показатель для подсолнечника равен 600 кг, а для сои – 290 кг [Editor, 2025].

В обзоре рассмотрена почти 30-летняя история появления и распространения как отдельных растений, так и целых популяций биотехнологических сортов канолы в резуль-

тате самосево в странах, где они выращиваются, в странах, импортирующих их семена, и в странах, осуществляющих транзит последних.

Сорта канолы, устойчивые к гербицидам

В 90-е г. прошлого века канола как запатентованный сорт рапса вошла в число первых сельскохозяйственных культур в программу создания биотехнологических сортов, устойчивых к неселективным гербицидам (глифосату и глюфосинату). Сорта, устойчивые к глифосату, до настоящего времени продаются под торговой маркой Roundup-Ready™ и представляют собой самую большую долю рынка ГМ-канолы в мире. Резистентность к глифосату в большинстве трансгенных линиях обеспечивается генетической конструкцией, содержащей два гена: один кодирует нечувствительную к глифосату 5-енолпирувилшикимат-3-фосфатсинтазу (CP4 EPSPS) из *Agrobacterium* sp. штамм CP4, а другой – ген *goxv247* бактерии *Ochrobactrum anthropi* штамм LBAА, кодирующий фермент глифосатоксидоредуктазу (GOX), разлагающую глифосат на аминометилфосоновую кислоту (АМФК) и глиоксилат [Green, 2009]. Сорта канолы, устойчивые к глюфосинату, имеют трансгены *pat* почвенной бактерии *Streptomyces viridochromogenes* (Krainsky 1914) Waksman and Henrici 1948 или *bar* бактерии *Streptomyces hygroscopicus* (Jensen, 1931) Yüntsen *et al.*, 1956., которые кодируют фосфинотрицинацетилтрансферазу (PAT). Этот фермент детоксифицирует глюфосинат путём его ацетилирования. Канола торговой марки Navigator™ Canola, устойчивая к ГМ-бромксинилу, получена с использованием гена *оху* (кодирующего фермент нитрилазу, ответственную за расщепление бромксинила до нефитотоксичного соединения) грамтрицательной факультативно-анаэробной условно-патогенной бактерии *Klebsiella pneumoniae* subsp. *ozaenae* (Abel 1893) Ørskov 1984. Известен также трансгенный сорт канолы, устойчивый к системному гербициду дикамбе, обладающему ауксин-подобным действием (2-метокси-3,6-дихлорбензойной кислоте). Генно-инженерная конструкция этого сорта несёт ген *dmo* почвенной бактерии

Pseudomonas maltophilia (штамм DI-6). Ген *dmo* кодирует фермент дикамба-О-деметилазу, преобразующую дикамбу в 3,6-дихлорсалициловую кислоту (3,6-DCSA), которая не обладает гербицидной активностью [Pandolfo *et al.*, 2016; Sohn *et al.*, 2021].

В 1987 г. с помощью традиционной селекции созданы не-трансгенные, устойчивые к имидазолинону (IMI) две линии канолы (PM1 и PM2) с мутантным геном *VnAHAS*, которые коммерциализированы в Канаде в 1996 г. под торговой маркой Clearfield® [Krato and Petersen, 2012; Tan *et al.*, 2005]. Мутация в PM1 имеет одну замену в кодоне 653 (серин на аспарагин) в локусе *VnAHAS1*, что обеспечивает устойчивость к гербицидам IMI. Линия PM2 имеет точечную мутацию в кодоне 574 (замена триптофана на лейцин), расположенную в локусе *VnAHAS3*, что обеспечивает устойчивость к гербицидам IMI и определённую перекрестную устойчивость к сульфонилмочевинам и триазолопиримидинам. Линия PM2 имеет более высокий уровень резистентности, чем PM1 [Powles and Yu, 2010; Tan *et al.*, 2005]. Также методами классической генетики (естественная мутация и возвратные скрещивания) выведены сорта канолы, резистентные к триазиновым гербицидам [Pandolfo *et al.*, 2016; ISAAA, 2025].

Окультуривание рапса произошло относительно недавно, а потому риски использования ГМ-канолы, устойчивой к гербицидам, связаны с тем, что она всё ещё сохраняет большое число «диких» признаков, определяющих высокий инвазионный потенциал. К таковым относятся быстрый рост, аллогамия и опыление насекомыми, раннее созревание семян, их высокая способность к рассеиванию и вторичному покою [Gulden *et al.*, 2003]. Из-за ранней растрескиваемости стручков около 10% семян (~10000 на 1 м²) осыпается до или во время сбора урожая. Семена рапса очень мелкие (диаметр 0,9–2,2 мм, а масса 2,5–7,0 мг), а в совокупности с тем, что они гладкие и сферические, их сохранение в почвенном банке семян существенно облегчается [Gulden *et al.*, 2008; Belter, 2016]. Если осыпавшиеся семена проникают в более глубокие слои почвы посредством вспашки по-

сле уборки, они могут развивать состояние вторичного покоя. В состоянии вторичного покоя семена могут сохраняться в естественных условиях до 10 и более лет [Pekrun et al., 1997; Gulden et al., 2004; Lutman et al., 2003]. В случаях, когда в ходе полевых работ семена перемещаются на поверхность, они могут прорасти. Поэтому рапс часто встречается в результате самосево. Так, на полях различных культур в Дании были обнаружены растения рапса, который выращивали здесь 11 лет назад [Andersen et al., 2010].

Наличие сортов канолы, резистентных к гербицидам, остро поставило вопрос о передаче генов (трансгенов), ответственных за эти признаки, родственным сорным видам семейства Капустные, обладающим высоким инвазионным потенциалом. Эти растения встречаются на полях основных сельскохозяйственных культур по всему миру. Так, например, вид *B. rapa* объединяет две формы: кормовую репу и экономически значимый сорняк сурепицу или птичий рапс, космополитически распространённый на полях сельскохозяйственных культур, на пастбищах и обочинах дорог [Simard et al., 2006]. *B. rapa* и *B. campestris* были описаны Линнеем как два самостоятельных вида: репа – как *B. rapa*, а сорняк – как *B. campestris*, но в 1833 г. немецкий ботаник Johann Metzger объединил таксоны в один вид – *B. rapa* [Тохеорус et al., 1984]. Частота гибридизации сурепицы, растущей рядом с полями рапса, довольно низкая (0,4–1,5%). Однако этот показатель существенно повышается (до 56–93%), когда сурепица в качестве сорняка растёт на полях рапса [FitzJohn et al., 2007; Devos et al., 2009]. Опыты по гибридизации показали, что все гибриды F1 между рапсом и сурепицей морфологически похожи на рапс, но имеют пониженную фертильность пыльцы (около 55%) [Warwick et al., 2003]. В экспериментах было показано, что эти межвидовые гибриды могут скрещиваться между собой и производить жизнеспособное потомство до поколений F3. В 2008 г. в Аргентине на полях сельскохозяйственных культур были обнаружены в качестве сорняков устойчивые к имидазолинону межвидовые гибриды этих растений, возникшие в результате скрещивания сурепицы и канолы

сорта Clearfield® [Ureta et al., 2017; Torres Carbonell et al., 2020]. Это говорит о том, что ГМ-канола может передавать ген устойчивости к гербициду сурепице, где он может сохраняться неопределённо долгое время.

В 2024 г. различные сорта ГМ-канолы выращивались в четырёх странах мира (Австралия, Канада, США и Чили) на площади более 10 млн га, а экспорт семян этой биотехнологической культуры осуществлялся ещё примерно в 20 стран [AgbioInvestor GM Monitor, 2025]. В первых трёх странах из вышеназванных, где эта трансгенная культура выращивалась на больших площадях, был проведён более или менее масштабный мониторинг популяций её самосево. Подобные исследования в странах импортёрах проводились в Аргентине, Великобритании, Швейцарии, Японии и в ряде государств ЕС. И во всех этих странах были обнаружены самосевы.

Трансгенные самосевы в странах, где ГМ-рапс выращивается

Канада стала первой страной, где начали выращивать канолу с трансгенами устойчивости к неселективным гербицидам (глифосату и глюфосинату). Первые посевы этих биотехнологических сортов появились здесь в 1996 г. на площади 140 000 га, что равнялось 4% от всех посевов этой культуры (3,45 млн га). Все последующие годы происходило неуклонное увеличение посевов канолы, достигнувшие в 2012 г. показателя 8,97 млн га. При этом уже 95% этих площадей находились под трансгенными сортами. С этого года по настоящее время (2024 г.) эти показатели принципиально не меняются. Небольшое уменьшение или увеличение посевов ГМ-канолы каждый год компенсировалось пропорциональным увеличением или уменьшением посевов конвенциональных (выведенных методами традиционной селекции) сортов, однако 95%-ная доля трансгенных сортов неуклонно сохранялась [AgbioInvestor GM Monitor, 2025].

Вскоре после начала высева ГМ-сортов канолы стали поступать сообщения о трансгенных самосевах рапса как на полях конвенциональной канолы, так и в рудеральных местообитаниях. Плотность их популяций сильно колебалась и в пространстве, и во

времени. Так, из 27 протестированных партий конвенциональных семян 14 имели уровень содержания трансгенов устойчивости к гербицидам выше 0,25% и, следовательно, не соответствовали 99,75%-ному стандарту чистоты для сертифицированных семян рапса, а три партии семян имели уровень содержания трансгенов устойчивости к глифосату, превышающий 2,0% [Friesen et al., 2003]. В 1998 г. в провинции Альберта были обнаружены самосевы рапса, которые выжили после нескольких обработок глифосатом. Их дальнейшее исследование показало, что из-за соседства полей, засеянных тремя линиями канолы (двух трансгенных и одной конвенциональной), устойчивыми к трём разным гербицидам, образовались гибриды, устойчивые к их разным сочетаниям, в том числе ко всем трём (глифосату, глюфосинату и имидазолинону) [Hall et al., 2000].

Канада до конца XX века имела международную репутацию производителя высококачественной горчицы трёх видов (жёлтой (*Sinapis alba*), коричневой и восточной (*B. juncea*)). Стоимость экспорта горчицы, производимой согласно правилам органического земледелия и соответствующим образом сертифицированной, оценивалась в 100 млн долларов в год (в ценах 2000 г.). Мониторинг горчицы импортёрами ЕС выявил следовые количества трансгенов ГМ-канолы, выращиваемой в Канаде. Некоторые из этих ГМ-событий не были одобрены в европейских странах. Агентство по стандартизации продуктов питания (The UK Food Standards Agency, или сокращенно FSA) сообщило, что семена коричневой горчицы, импортированные во Францию, имели низкий уровень содержания трансгенов торговых марок ГМ-канолы (Roundup Ready и Liberty Link). Уровень этих трансгенов в семенах горчицы был оценен как не превышающий 0,003%, что не представляло никакого риска для здоровья, однако экспорт канадской горчицы на европейский континент прекратился. Управление органического производства провинции Саскачеван после этого инициировало коллективный иск против фирм Monsanto и Aventis CropScience с целью получения компенсации за потерю доходов, однако перспек-

тивная отрасль производства органической горчицы в западной Канаде прекратила своё существование [Editor, 2002; Smyth et al., 2002; Demeke et al., 2006].

В 2005 г. в Канаде уже около 80% посевов канолы относились к генно-модифицированным сортам (5,5 из 7,0 млн га) [Beckie et al., 2006], поэтому для выяснения масштаба утечек трансгенов в окружающую среду был предпринят ряд исследований. Так, в 2005 г. был проведён мониторинг обочин железнодорожных путей и автомобильных дорог в двух регионах Канады: провинции Саскачеван, где выращивалась половина канадской ГМ-канолы, и в провинции Британская Колумбия, через порт которой (Ванкувер) на тихоокеанском побережье Канады шёл практически весь экспорт семян этой биотехнологической культуры. Железные и автомобильные дороги, обочины которых обрабатываются неселективными гербицидами, представляют собой идеальную систему, в которой устойчивые к ним растения укореняются и распространяются в результате действия естественного отбора, им благоприятствующего, что приводит к увеличению затрат на содержание инфраструктуры дорог без сорняков. Площадь, занятая самосевными растениями ГМ-рапса, усреднённая по 155 участкам в Саскачеване, была заметно меньше вдоль железнодорожных путей, чем вдоль автомобильных дорог; напротив, тот же показатель, усреднённый по 54 участкам в Ванкувере, был больше вдоль железнодорожных путей, чем вдоль автомобильных дорог. В обоих случаях средняя плотность ГМ-растений выше в популяциях, обнаруженных вдоль железнодорожных путей, чем вдоль автомобильных дорог. Две трети растений рапса, отобранных в Саскачеване и Ванкувере, были трансгенными, хотя относительная доля растений с признаками устойчивости к глифосату или глюфосинату различалась. Частота встречаемости трансгенных растений в рудеральных биотопах коррелировала с размером их посевов в предшествующие годы. Единственный межвидовой трансгенный гибрид сурепицы (*B. rapa*) и рапса (*B. napus*) был обнаружен возле дороги в Ванкувере, что подтвердило высокую вероятность гибридизации между

этими двумя видами *Brassica* [Yoshimura et al., 2007; Beckie et al., 2006].

В 2005–2007 гг. в трёх районах на юге канадской провинции Манитоба было проведено исследование распределения самосево рапса на обочинах автомобильных дорогах и краях полей, на которых в предыдущих сезонах выращивалась канола (в двух (Макдональд и Карман) – один раз в 4 года ротации, а в третьем (Рейнланде) – реже). Кроме того, во всех трёх районах имелись элеваторы и предприятия по переработке семян этой культуры. Самосевы рапса чаще всего встречались в редкой растительности, непосредственно на обочинах, а реже всего – в более густой растительности канав, где они менее конкурентоспособны. Эти растения обычно встречались с большей плотностью на краях полей во всех трёх сельскохозяйственных ландшафтах. Так, на пробных участках площадью 110 м² их численность на обочинах варьировала от 35 до 1220 растений, в то время как на краях полей этот показатель находился в пределах от 35 до 3050 растений. Кроме того, подавляющее большинство (93–100%) самосево либо сами имели трансгенные признаки, либо производили ГМ-потомство как результат опыления трансгенной пылью. Факторы, связанные с их наличием, значительно различались между соседствующими обочинами дорог и краями полей, это позволило предположить, что их распространение происходило независимо друг от друга. Количество самосево на обочинах дорог увеличивалось как с улучшением качества поверхности дорожного полотна (что коррелировало с увеличением интенсивности движения по нему), так и с близостью элеваторов и фабрик по переработке зерна. Вместе с тем плотность трансгенных самосево на краях полей увеличивалась при наличии соседнего поля ГМ-канолы в текущем году, а также внесении гербицидов и уменьшалась после вспашки. В целом численность самосево была выше в Макдональде и Кармане, чем в Рейнланде, что, вероятно, отражало меньшую частоту выращивания канолы в последнем районе [Knispel & McLachlan, 2010].

Популяции самосево рапса вдоль путей сообщения в Канаде не уничтожались ни му-

ниципальными властями, ни менеджментом автомобильных и железных дорог, а усилия в этом направлении фермеров, как правило, ограничивались полями и непосредственно прилегающими биотопами [Yoshimura et al., 2007]. Такие методы борьбы с сорняками, как регулярное скашивание сорной многолетней растительности, на деле приводили к появлению большего числа однолетних сорняков, включая самосевы *B. napus*. Применение обычных гербицидов широкого спектра действия, таких как глифосат и глифосинат, для уничтожения самосево ГМ-рапса как в агроценозах, так и в соседствующих местообитаниях, а также на обочинах дорог к успеху, естественно, тоже не приводили, так как давали конкурентное преимущество трансгенным самосевам перед всеми прочими [Hall et al., 2000; Friesen et al., 2003]. Единственный эффективный способ борьбы с самосевами – вспашка – не применялся большинством фермеров, практиковавших нулевую или консервационную обработку почвы с целью уменьшения эрозии, сохранения почвенной влаги и снижения затрат. Как раз именно эта категория фермеров использовала глифосат для борьбы с сорняками, и распространение самосево ГМ-рапса создаёт для них большие проблемы [Friesen et al., 2003].

Поскольку небольшие популяции самосево ГМ-рапса на обочинах дорог и границах агроценозов со временем не увеличивались, сделали вывод, что их естественное распространение было незначительным по сравнению с утечкой семян из антропогенных векторов ландшафтного масштаба. Таким образом, меры по уничтожению отдельных популяций самосево трансгенного рапса в подобных биотопах, скорее всего, будут нивелироваться объёмом семян этой трансгенной культуры и большей протяжённостью путей сообщения, по которым происходит их транспортировка [Knispel et al., 2008].

В США первые коммерческие посевы ГМ-канолы, устойчивой к гербицидам, появились в 1999 г. Тогда их площадь составили 90 000 га, или 20% от всех посевов этой культуры. В течение последующих лет эти показатели увеличивались, достигнув в 2011 г. значений соответственно в 690 000 га и 96%.

В 2024 г. в США из 1,80 млн га полей канолы только 50 000 га приходилось на конвенциональные сорта [AgbioInvestor GM Monitor, 2025; Fernandez-Cornejo et al., 2014]. Первое исследование популяции самосево́в этой биотехнологической культуры произведено в 2010 г. в штате Северная Дакота, одном из основных регионов выращивания канолы в Соединенных Штатах. Исследование заключалось в поиске самосево́в рапса, растущих на обочинах автомобильных дорог трёх типов (дорог между штатами, дорог штатов и дорог графств). Всего было обследовано 5400 км обочин. Пробы брались через каждые 8,05 км вдоль трансекты длиной 50 м и шириной 1 м. Все собранные растения рапса (406 экземпляров) проверялись на содержание трансгенных белков; 347 (86%) из собранных растений дали положительный результат на белки, обеспечивающие устойчивость к глифосату и глифосинату (CP4 EPSPS и PAT соответственно). Плотность самосево́в варьировала от 0 до 175 растений на квадратный метр. Более того, были обнаружены две особи с обоими трансгенами. На момент проведения исследования сорта канолы с таким сочетанием признаков ещё не поступили в продажу, что говорит о произошедшей в природе гибридизации двух ГМ-сортов. Это исследование стало первым сообщением в США об укоренившихся в окружающей среде популяциях генетически модифицированных растений [Schafer et al., 2011].

В 2011 г. на поле в штате Калифорния (США), где в 2007 г. выращивалась ГМ-канола, были обнаружены в большом количестве (более 1000 растений на 1 га) самосево́вы этой культуры, выросшие из сохранившихся в поле семян, в состоянии вторичного покоя [Munier et al., 2012].

В Австралии долго колебались в отношении внедрения ГМ-канолы. Австралийское управление по регулированию генных технологий (OGTR) выдало разрешение на использование фермерами трансгенных сортов этой культуры Roundup Ready® и InVigor® в 2003 г., но они не выращивались в коммерческих целях до 2008 г. Это было связано с тем, что с 2003 по 2007 г. шла разработка процедур и методов, которые позволили бы эффективно

разделить посево́ы и логистические потоки семян конвенциональной канолы и ГМ-канолы. В 2008 г. сорта канолы Roundup Ready начали выращивать на 9600 га, что дало урожай в 9336 т зерна, а в 2010 г. в общей сложности 317 производителей собрали с 72 000 га 49 000 т семян этой биотехнологической культуры [McCauley et al., 2012]. Площадь посево́ов ГМ-канолы постепенно возрастала, достигнув в 2024 г. размера 940 000 га, или 27% от всех посево́ов этой культуры (3,480 млн га) [AgbioInvestor GM Monitor, 2025].

Несмотря на все меры, предпринятые в Австралии для предотвращения утечек трансгенов, в 2010 г. был зафиксирован ряд инцидентов: в первом случае ГМ-растения проросли на соседнем поле зерновых из-за сильного ветра во время посевной кампании. Трансгенные растения были удалены вручную, что подтвердила проверка, проведённая через две недели после прополки. Второй случай был также связан с сильным ветром, снёсшим скошенную ГМ-канолу на соседнее поле. Эти растения были удалены, и в течение несколько лет в данном месте проводился мониторинг самосево́ов этой культуры [McCauley et al., 2012]. В декабре 2010 г. подтвердились подозрения одного фермера в Коджонапе о наличии ГМ-рапса на его поле органического овса, сертифицированном Национальной ассоциацией устойчивого сельского хозяйства Австралии (National Association for Sustainable Agriculture, Australia, или сокращенно NASAA). В пресс-релизе от 3 января 2011 г., подтверждающем решение NASAA аннулировать сертификацию данного органического производства, было сказано: «Органическая продукция, сертифицированная NASAA, имеет нулевую терпимость к содержанию ГМО, что соответствует требованиям Национального стандарта для органических и биодинамических продуктов и Австралийского национального органического стандарта AS6000. Это необходимо для обеспечения целостности и качества органической продукции NASAA как для предприятий, так и для потребителей» [NASAA, 2011]. В исковом заявлении, поданном в Верховный суд Западной Австралии, утверждалось, что

фермер, выращивающий ГМ-канолу, проявил халатность, позволив ей попасть на поле органического овса до сбора урожая, что вызвало потерю органического статуса. Однако в своём решении суд отметил, что ГМ-рапс ГМ-канола была одобрена для реализации в качестве посевного материала в Австралии в 2010 г. и выращивающий ее фермер не совершил никаких нарушений, а потому он не может нести юридическую ответственность за реакцию органа по сертификации органической продукции [Australian organic farmer loses GM test case, 2014].

В 2009–2013 гг. проводился мониторинг самосеивов ГМ-рапса на обочинах дорог и в природных биотопах Западной Австралии. В 2009 г. в кустарниковых зарослях было обнаружено около 300 растений ГМ-рапса, случайно занесённых туда штормовым ветром с прилегающего поля, что позволило изучить выживаемость ГМ-рапса в естественной экосистеме. Эта популяция смогла сохраниться только в течение трёх лет. Так, в 2010 г. было обнаружено 19 самосеивов, в 2011 г. – 96, 2012 г. – 5, а в 2013 и 2014 гг. в этом месте не обнаружено ни одного растения ГМ-рапса. Оценка выживаемости самосеивов и их плодовитость показали, что в данных природных условиях они имеют мало шансов стать инвазивным, поскольку подвергаются большому количеству стрессовых факторов как биологических (конкуренция со стороны многолетних трав и злаковых сорняков, поедание кроликами самих растений и птицами ещё не созревших стручков, поражение грибковыми заболеваниями), так и абиотических (главным образом низкое количество осадков), которые снижают их выживаемость. В этой естественной, нетронутой кустарниковой местности трансген, придающий растениям рапса устойчивость к глифосату, не давал преимуществ в приспособленности, что позволило бы сохраниться популяции с течением времени. В октябре 2012 г. при обследовании окрестностей крупного зернохранилища Perth Metro вдоль обочины ведущей к нему дороги протяженностью 3500 м было обнаружено 2578 самосеивов рапса (93% которых устойчивы к глифосату). Большинство этих растений

развились зрелые стручки, что указывает на способность ГМ-рапса производить жизнеспособные семена на обочине дороги. Около 73% растений дали семена, а 27% самосеивов семян не дали, так как поздно проросли. Хотя максимальное количество самосеивов обнаружено на расстоянии 500 м от приёмного пункта, общей тенденцией было снижение их количества по мере удаления от зернохранилища. Все растения, выжившие после обработки глифосатом, были обработаны атразином или имазамоксом + имазапиром соответственно. Однако ни одно растение не выжило после последовательного применения гербицидов, что позволило предположить, что они не несли признаков множественной устойчивости к гербицидам. Расщепление в потомстве обнаруженных самосеивов ГМ-рапса показало, что они произошли от семян, рассыпанных на дороге за два года до этого, т.е. в 2010 г. Самосеивы ГМ-рапса, обнаруженные на обочине дороги, в отличие от росших в кустарниковых зарослях, обитали в местности с гораздо большим количеством осадков (+100–400%), не были затронуты межвидовой конкуренцией с другими сорняками и гораздо меньше страдали от кроликов и птиц. Кроме того, на обочине дорог значительная корреляция ($r = 0,975$) между средней плодовитостью растений (семенами) и плотностью почвенного семенного банка в следующем году свидетельствовала о том, что постоянное пополнение потерянными при транспортировке семенами обеспечивало сохранение популяции в течение как минимум трёх лет [Busi, Powles, 2016].

В Австралии, Канаде и США транспортные сети связывают огромные сельскохозяйственные поля ГМ-канолы и элеваторы с расположенными от них в тысячах километрах портами, через которые происходит экспорт этой культуры (Yoshimura et al., 2007). Таким образом, распространение трансгенных семян происходит в пространственных масштабах, намного превышающих ландшафты, в которых они выращиваются, а продолжающееся возделывание и соответственно транспортировка создают и поддерживают популяции ГМ-канолы за пределами агроценозов.

Самосевы ГМ-рапса в странах, импортирующих и осуществляющих транзит семян

Среди 20 стран, импортирующих семена ГМ-канолы, наиболее тщательное исследование распространения самосевов этой культуры было проведено в Японии. Рапс *B. napus* выращивался в Японии в промышленных масштабах до конца прошлого века, но популяции его самосевов (саморасселения) продолжали встречаться в различных местах (чаще всего на обочинах дорог и берегах рек). Потребности Японии в семенах этой масличной культуры в XXI веке обеспечиваются главным образом за счёт импорта: ежегодно порядка 2 млн т семян *B. napus* поступает морским путём из Канады, где около 80% этой культуры в середине 2000-х годов было генетически модифицировано. Таким образом, большинство импортируемых Японией семян рапса происходят из ГМ-сортов, устойчивых к гербицидам [Saji et al., 2005].

Впервые самосевы ГМ-рапса обнаружены в порту Касима в округе Канто в Японии в 2003 г. во время мониторинга, проведённого Министерством сельского хозяйства, лесного хозяйства и рыболовства Японии. В 2004 г. собрано более 13 тысяч семян с растений *B. napus*, *B. rapa* и *B. juncea*, росших в шести портах, на берегах рек и на обочинах четырёх дорог, ведущих из порта Касима на предприятия по переработке масличных семян (в общей сложности в 143 местах). Проростки этих семян подвергались воздействию гербицидов, иммунохимическому и ДНК-анализу. Таким образом, было обнаружено, что трансгенный рапс рос в пяти из шести крупных портов и на обочинах двух из четырёх исследованных дорог в районе Канто. Тем не менее в растениях тех же видов (*B. napus*, *B. rapa* и *B. juncea*), росших вдоль берегов рек в той же местности (Канто), трансгены обнаружены не были. Поскольку трансгенный рапс рос либо на территории основных портов, через которые ввозят семена канолы из Канады, либо вдоль основных дорог, по которым их перевозят, трансгенные растения, вероятнее всего, выросли из семян, утерянных во время транспортировки [Saji et al., 2005]. Это был первый случай обнаружения

трансгенных самосевов в стране, где данная биотехнологическая культура никогда не выращивалась.

В следующем году тем же коллективом аналогичное исследование было проведено на западном побережье Японии. Было обследовано семь портовых зон (территории портов, обочины дорог, берега рек). Трансгенные, устойчивые к гербицидам семена обнаружены у 12 материнских растений *B. napus*, растущих по обочинам дорог двух портовых зон (Йоккайти и Хаката). Поскольку через эти два порта импортируются значительные объёмы канолы, в основном из Канады, трансгенные растения, вероятнее всего, выросли из импортных семян, которые были утеряны во время транспортировки. Часть потомства от двух из 12 растений имела трансгены устойчивости как к глифосату, так и к глюфосинату. Таким образом, два типа трансгенных растений *B. napus* скрещивались друг с другом, поскольку трансгенная линия канолы с двойной устойчивостью к гербицидам в то время ещё не была коммерциализирована. Поскольку генотип материнских растений этих самосевов не был исследован напрямую, не ясно, была ли устойчивость к нескольким гербицидам в потомстве этих растений вызвана перекрёстным опылением непосредственно в Японии или же гибридизация произошла ещё в Канаде, где подобные случаи на тот момент зафиксированы не были, но отмечены в США [Schafer et al., 2011]. Как и в предыдущем исследовании, не было обнаружено трансгенных семян у растений *B. rapa* или *B. juncea* [Aono et al., 2006]. В 2007 г. в порту Мидзусима также было обнаружено растение рапса с устойчивостью к двум гербицидам. Место его нахождения на пирсе указывает на то, что гибридизация двух ГМ-линий, скорее всего, произошла ещё в Канаде до попадания семян в этот японский порт. С другой стороны, в Йоккайти семена рапса, устойчивые к нескольким гербицидам, были обнаружены на обочинах дорог в течение четырёх последовательных лет и на берегах рек в течение двух последовательных лет, но материнских растений с этим свойством обнаружено не было. Это означает, что на этих участках произошло скрещивание между двумя типами устойчи-

вых к гербицидам растений, хотя вероятность того, что скрещивание произошло до импорта семян в Японию, также нельзя полностью исключить. Более того, в 2008 г. на берегу реки возле порта Йоккайти были обнаружены семена гибрида между трансгенным рапсом *B. napus* ($2n = 38$) и сурепицей *B. rapa* ($2n = 20$), поскольку некоторые полученные из них сеянцы имели устойчивость к глифосату и необычный диплоидный набор хромосом ($2n = 29$) [Aono et al., 2011]. Эти данные говорят о большом потенциале интрогрессии трансгенов устойчивости к гербицидам в родственные инвазионные виды.

В 2006–2011 гг. в Японии проводилась 6-летняя программа мониторинга самосево капустоцветных растений в окрестностях 12 японских портов, через которые проходит импорт семян ГМ-канола ($212,7\text{--}235,3 \times 10^5$ т/г. в период 2006–2011 гг.). Было обнаружено 1029 популяций *B. napus*, 1169 популяций *B. juncea* и 184 популяции *B. rapa*. Общей тенденцией расширения или сокращения этих популяций отмечено не было. Особи ГМ-рапса были обнаружены в 414 популяциях из 1029 (40%) в 10 из 12 портов, но их доля в популяциях сильно различалась в зависимости от года и местоположения. Доля популяций, содержащих ГМ-рапс, была высокой ($> 60\%$) в трёх портах (Тибэ, Йоккаичи и Хаката). В других портах эта доля была $< 30\%$, а в портах Осака и Тобата – нулевой. Таким образом, трансгенные популяции не показали увеличения или уменьшения в течение шести лет в окрестностях всех 12 портов, через которые проходил импорт ГМ-канола [Katsuta et al., 2015].

В Аргентине ГМ-канола никогда не выращивалась, а национальным секретариатом (министерством) сельского хозяйства было даже запрещено экспериментальное выращивание ГМ-канола, устойчивой к глифосату. В 2007 г. запрет был расширен, и любой импорт семян этой культуры должен был сопровождаться анализом на отсутствие трансгенов от страны-экспортера. Тем не менее в 2012 г. одичавшие популяции рапса с трансгенами устойчивости к глифосату были обнаружены в юго-восточной провинции Буэнос-Айрес [Pandolfo et al., 2016]. Кроме того, в том же районе в 2012 г. на нескольких полях сои и

других культур в качестве сорняка была обнаружена сурепица *B. Rapa*, несущая трансген резистентности к глифосату, причём некоторые из этих растений также показали устойчивость к имидазолинону [Pandolfo et al., 2018]. Таким образом, понадобилось не более четырёх лет, чтобы обнаруженная в 2008 г. популяция сурепицы, резистентная к имидазолинону, стала не восприимчивой ещё и к глифосату [Ureta et al., 2017; Torres Carbonell et al., 2020].

С момента первого обнаружения сурепицы, устойчивой к двум гербицидам, площадь заражения ими увеличивалась в геометрической прогрессии, и в 2023 г. они присутствовали на полях более чем 70 округов шести провинций Аргентины [AAPRESID, 2023]. Одна из причин связана с тем, что в Аргентине более половины площади обрабатывается с помощью наёмной сельскохозяйственной техники (в том числе уборочной), которая служит основным вектором распространения семян сорных растений. Другая причина масштабного распространения резистентной к гербицидам сурепицы заключается в том, что, вопреки известным теоретическим предположениям, у неё отсутствует «цена приспособленности», т.е. она конкурентоспособна даже при отсутствии давления отбора в виде применения глифосата и имидазолинона [Tillería et al., 2023]. Кроме того, попытки борьбы с ней рецептурами с другими механизмами действия привели лишь к тому, что под действием естественного отбора она приобрела впоследствии устойчивость к ещё двум гербицидам: 2,4-Д (2, 4-дихлорфеноксисукусной кислоте), подавляющей процессы роста и развития у многих двудольных, и фторхлоридону (ингибитору биосинтеза каротиноидов). Таким образом «аргентинская» сурепица стала первым сорняком, устойчивым к фторхлоридону, до последнего времени служившему «палочкой выручалочкой» в борьбе с сорняками, устойчивыми к другим гербицидам [AAPRESID, 2025].

В Африке и Евразии ГМ-канола никогда не выращивалась, однако многие страны импортируют её семена или осуществляют их транзит. Как ни странно, самый тщательный мониторинг самосево рапса на предмет при-

существования в них трансгенов произвела одна из самых маленьких европейских стран – Швейцария. Данное обстоятельство связано с тем, что эта альпийская республика – лидер по внедрению органического земледелия, а её жители придают большое значение проблеме ГМО и, соответственно, потенциальному ущербу от неконтролируемого распространения трансгенов.

Швейцария не давала разрешения ни на посевы ГМ-канола, ни на импорт её семян, однако предоставление своих транспортных путей в целях транзита последних оказалось достаточным для возникновения популяций ГМ-самосево́в этой культуры. В 2011–2012 гг. в Швейцарии и Княжестве Лихтенштейн было обследовано 79 железнодорожных станций и сортировочных узлов в районе портов, и в 58 (73%) из них обнаружены самосевы рапса. В общей сложности из 2403 растений, прошедших тестирование на наличие трансгенов, у 50 (2,1% от общего количества) в четырёх из 79 мест отбора проб обнаружена экспрессия трансгена, обеспечивающего устойчивость к глифосату. На железнодорожном вокзале Лугано (кантон Тичино) положительный результат на трансген дали 91,3% растений, на разгрузочной железнодорожной станции в рейнском речном порту Кляйнхюнинген (кантон Базель-Штадт) – 88,9%, на железнодорожном вокзале Санкт-Йоханн (кантон Базель-Штадт) – 92,3% и на железнодорожной станции Муттенц-Аухафен (кантон Базель-Штадт) – 2,1%. Трансгенные самосевы, очевидно, выросли из семян, просыпавшихся из вагонов или во время перегрузки контейнеров с судов на поезда. В первых трёх местах ГМ-растения, скорее всего, выросли из одного или нескольких семян, которые из-за обработок глифосатом подверглись сильному положительному отбору на трансген, что привело к увеличению его распространения в местных популяциях [Schoenenberger and Andrea, 2012]. Если бы в популяциях с высокой численностью ГМ-растений (например, в Лугано, Кляйнхюнингене и Санкт-Йоханн) все семена-основатели были трансгенными, присутствие особей, не содержащих трансгена, было бы маловероятным, поскольку ГМ-канола содержит их в гомозиготном со-

стоянии, что исключает возможность генетического дрейфа.

В 2013 г. был проведен более тщательный мониторинг популяций одичавшего рапса в рейнском порту и на грузовой железнодорожной станции Санкт-Йоханн г. Базель. Всего было отобрано 2787 растений. Присутствие трансгенного рапса, устойчивого к глифосату, было подтверждено во всех ранее задокументированных местах отбора проб и дополнительно обнаружено в одном новом месте отбора проб в рейнском порту. Кроме того, впервые в Европе были обнаружены растения ГМ-канола, устойчивые к глюфосинату (торговая марка InVigor, фирма Bayer). Они росли в пяти местах отбора проб в рейнском порту. Авторы предположили, что наиболее вероятным источником семян ГМ-канола может быть загрязненная ими пшеница, импортируемая в больших объёмах из Канады [Schulze et al., 2014].

Мониторинг двух участков железнодорожных путей, пролегающих от швейцарских границ с Италией и Францией до соответствующих заводов по переработке семян масличных культур в Южной и Северной Швейцарии, общей протяжённостью 14,8 км также показал наличие самосево́в рапса, несущих трансген устойчивости к глифосату. На южном участке было обнаружено 22 ГМ-самосево́в, а на северном – 159. Такое неравномерное распределение связано с тем, что основной экспорт семян канола проходит через северный транспортный узел в районе г. Базель [Necht et al., 2014]. Выше по течению Рейна самосевы ГМ-рапса встречаются значительно реже. Так, обследование девяти биотопов вблизи крупных предприятий по переработке семян и в портах вдоль р. Рейн в ФРГ, проведённое в 2014 г., выявило как отдельные самосевы, так и целые популяции одичавшего рапса во всех исследованных местах. Однако из 1918 исследованных растений подтверждено наличие только одного трансгенного растения, устойчивого к глифосату [Franzaring et al., 2016].

Хотя ГМ-канола никогда не была разрешена для выращивания в Европейском союзе, 11 стран ЕС в разное время проводили её полевые испытания, и в некоторых из них

впоследствии обнаружены самосевы этой биотехнологической культуры. Так, в 1995 г. в Швеции на ферме Лённсторп проводились полевые испытания трёх линий ГМ-канолы (урожай был собран осенью того же года). В 1996–2005 гг. на ферме выращивались пшеница, ячмень и сахарная свёкла. Несмотря на надлежащие агротехнические методы и меры контроля, спустя 10 лет на этом поле было выявлено 15 трансгенных самосеивов ГМ-рапса [D’Hertefeldt et al., 2008]. В ФРГ в период с 1994 по 2007 г. было проведено более 300 полевых экспериментов с 15 сортами ГМ-канолы в 88 различных местах. Мониторинг этих агроценозов впоследствии показал появление самосеивов ГМ-рапса через 13–15 лет после проведения этих однократных опытов в открытом грунте. Кроме самосеивов были также обнаружены гетерозиготные гибриды трансгенного рапса (устойчивого к глифосату) с конвенциональными сортами [Belter, 2016].

В целом опыт многих стран показывает, что даже при прекращении выращивания ГМ-канолы её трансгены, попавшие в окружающую среду, могут в ней долго сохраняться, и их судьбу невозможно спрогнозировать (см. рис.).

Заключение

Высокий инвазионный потенциал рапса как таковой усилился у биотехнологических сортов этой культуры, имеющих трансгены устойчивости к неселективным гербицидам. Поскольку борьба с сорняками в большинстве стран ведётся с помощью глифосата и глифосината, то резистентные к ним самосевы ГМ-рапса получают громадное селективное преимущество перед другими растениями и только увеличивают своё распространение.

В результате широкомасштабного выращивания ГМ-рапса и транспортировки его семян на большие расстояния популяции трансгенных самосеивов этой культуры стали постоянной чертой сельскохозяйственных ландшафтов в Северной Америке и придорожных экосистем в Японии и Австралии. Хотя небольшие локальные популяции, как правило, недолговечны, потери семян при перевозке автомобильным и железнодорожным транспортом постоянно создают новые популяции. Этот баланс локального вымирания и распространения в масштабе ландшафта предполагает, что популяции самосеивов ГМ-канолы могут функционировать как метапопуляция. Концепция «метапопуляции» (популяции популяций) подразумевает необходимость миграции для замещения вымерших (уничтоженных) небольших



Рис. Распространение самосеивов ГМ-рапса.

изолированных популяций для поддержания существования метапопуляции в границах конкретного ландшафта [Levin, 1969; Hanski, 1998] и может быть полезна для понимания рисков, связанных с несанкционированным распространением трансгенных культур вообще и ГМ-рапса в частности [Claessen et al., 2005].

Во-первых, учитывая высокий инвазионный потенциал ГМ-рапса, сосуществование его полей в одном ландшафте с полями конвенционального, а тем более органического производств этой культуры практически лишено смысла из-за неизбежного засорения трансгенами. Именно с этим связано практически полное доминирование ГМ-канолы в Канаде и США. В Австралии и Чили эта проблема решается путём разнесения в пространстве биотехнологических, конвенциональных и органических полей этой культуры, а также логистических потоков собранных на них семян. Во-вторых, высокая вероятность скрещивания биотехнологических сортов с близкородственными сорными видами неизбежно будет приводить к возникновению «суперсорняков», устойчивых к одному или нескольким гербицидам (как это произошло в случае «аргентинской сурепицы»). В-третьих, присутствие как самосево самого ГМ-рапса, так и его внутри- и межвидовых гибридов на полях других культур неизбежно приведёт к засорению урожая и неконтролируемому распространению трансгенов на большие расстояния, в том числе и на другие континенты [Warwick et al., 2008]. В-четвёртых, вспашка, считающаяся единственным эффективным методом борьбы с самосевами рапса, лишь откладывает проблему до следующего агротехнического мероприятия, меняющего почвенные слои местами и выносящего семена рапса на поверхность и дающего им шанс выйти из состояния вторичного покоя и прорасти. Задokumentировано, что в состоянии вторичного покоя семена рапса могут находиться как минимум 15 лет и, скорее всего, это не предел [Warwick et al., 2008].

С 1996 г. по начало 2012 г. рост мировых посевов масличного рапса (канолы) шёл главным образом за счёт ГМ-сортов. Площадь их посевов неуклонно росла до 2012 г. и с тех

пор колебалась в ту или иную сторону около отметки 10 млн га. Показательно, что этот показатель с 2012 г. по настоящее время принципиально не меняется, что коррелирует с появлением основного корпуса данных о высоком инвазионном потенциале ГМ-сортов этой культуры. Так, в 2024 г. площадь мировых посевов канолы равнялась 42,9 млн га, из которых 10,448 млн га (24,3%) были заняты трансгенными сортами [AgbioInvestor GM Monitor, 2025].

Финансирование работы

Исследования проведены в рамках государственного задания по теме «Проблемы экологической безопасности № 1021062812202-9/89».

Конфликт интересов

Автор заявляет, что у него нет конфликта интересов.

Соблюдение этических стандартов

Статья не содержит никаких исследований с участием животных в экспериментах, выполненных автором.

Список литературы

- AAPRESID 2023. https://www.aapresid.org.ar/rem-malezas/mapa-malezas/#maleza%5B%5D=nabos-rg&tipo_mapa=presencia_maleza&malezas%5B%5D=nabos-r2-4d&malezas%5B%5D=nabos-rg&malezas%5B%5D=nabos-rals&anosPM%5B%5D=2019&anosPM%5B%5D=2021&anosPM%5B%5D=2023 (Accessed on 02 November 2025).
- AAPRESID 2025. Alerta roja: Se confirmó la resistencia de *Brassica rapa* a flurocloridona // <https://aapresid.org.ar/blog/alerta-roja-confirmando-resistencia-brassica-rapa-flurocloridona> (Accessed on 02 November 2025).
- AgbioInvestor GM Monitor, 2025. <https://gm.agbioinvestor.com/gm-production> (Accessed on 02 November 2025).
- Andersen N.S., Rasmussen J., Jørgensen R.B. You reap what you sow – or do you? – volunteers in organic row-sown and broadcast-sown oilseed rape fields // *Eur. J. Agron.* 2010. Vol. 32. P. 121–126. DOI: 10.1016/j.eja.2009.09.001
- Aono M., Wakiyama S., Nagatsu M., Nakajima N., Tamaoki M., Kubo A., Saji H. Detection of feral transgenic oilseed rape with multiple-herbicide resistance in Japan // *Environ. Biosafety Res.* 2006. Vol. 5. P. 77–87
- Aono M., Wakiyama S., Nagatsu M., Kaneko Y., Nishizawa T., Nakajima N., Tamaoki M., Kubo A., Saji H. Seeds of a Possible Natural Hybrid between Herbicide-Resis-

- tant *Brassica napus* and *Brassica rapa* Detected on a Riverbank in Japan // GM Crops. 2011. Vol. 2, no. 3. P. 201–210. DOI: 10.4161/gmcr.2.3.18931
- Australian organic farmer loses GM test case (Update) (2014, May 28) retrieved 2 November 2025 from <https://phys.org/news/2014-05-australian-farmer-gm-case.html> (Accessed on 02 November 2025).
- Beckie H.J., Harker, K.N., Hall L.M., Warwick S.I., Legere A., Sikkema P.H., Clayton G.W., Thomas A.G., Leeson J.Y., Seguin-Swartz G., Simard M.-J. A decade of herbicide-resistant crops in Canada // Can. J. Plant. Sci. 2006. Vol. 86. P. 1243–1264.
- Belter A. Long-term monitoring of field trial sites with genetically modified oilseed rape (*Brassica napus* L.) in Saxony-Anhalt, Germany. Fifteen years persistence to date but no spatial dispersion // Genes. 2016. Vol. 7, no. 1: 3. DOI: 10.3390/genes7010003
- CFIA (Canadian Food Inspection Agency). Biology Document BIO2017-03 Canadian Food Inspection Agency The Biology of *Brassica napus* L. (Canola/Rapeseed). <https://inspection.canada.ca/en/plant-varieties/plants-novel-traits/applicants/directive-94-08/biology-documents/brassica-napus#c312007> (Accessed on 02 November 2025).
- Busi R., Powles S.B. Transgenic glyphosate-resistant canola (*Brassica napus*) can persist outside agricultural fields in Australia // Agric. Ecosys. Environ. 2016. Vol. 220. P. 28–34.
- Claessen D., Giligan C.A., Van den Bosch F. Which traits promote persistence of feral GM crops? Part 2: implications of metapopulation structure // Oikos. 2005. Vol. 110. P. 30–42.
- Demeke T., Perry D.J., Scowcroft W.R. Adventitious presence of GMOs: scientific overview for Canadian grains // Can. J. Plant. Sci. 2006. Vol. 86. P. 1–23.
- Devos Y., De Schrijver A. & Reheul D. Quantifying the introgressive hybridisation propensity between transgenic oilseed rape and its wild/weedy relatives // Environ. Monit. Assess. 2009. Vol. 149. P. 303–322. <https://doi.org/10.1007/s10661-008-0204-y>
- D’Hertefeldt T., Jørgensen R.B., Pettersson L.B. Long-term persistence of GM oilseed rape in the seedbank // Biol. Lett. 2008. Vol. 4. P. 314–317. DOI:10.1098/rsbl.2008.0123
- Editor. Global and domestic outlook for canola // Farmer’s Weekly. 14 march 2025. P. 57.
- Editor. Going with the flow // Nat. Biotechnol. 2002. Vol. 20. P. 527.
- Fernandez-Cornejo J., Wechsler S., Livingston M., Mitchell L. Genetically engineered crops in the United States // USDA-ERS Econ. Res. Rep. 2014. Vol. 162. P. 1–60. DOI:10.2139/ssrn.2503388
- FitzJohn R.G., Armstrong T.T., Newstrom-Lloyd L.E., Wilton A. D. & Cochrane M. Hybridisation within *Brassica* and allied genera: evaluation of potential for transgene escape // Euphytica. 2007. Vol. 158. P. 209–230. DOI: 10.1007/s10681-007-9444-0
- Franzaring J., Wedlich K., Fangmeier A., Eckert S., Zipperle J., Krah-Jentgens I., Hünig C., Züghart W. Exploratory study on the presence of GM oilseed rape near German oil mills // Environ. Sci. Pollut. Res. 2016. Vol. 23. P. 23300–23307.
- Friesen L.F., Nelson A.G., Van Acker R.C. Evidence of contamination of pedigreed canola (*Brassica napus*) seedlots in western Canada with genetically modified herbicide resistance traits // Agron. J. 2003. Vol. 95. P. 1342–1347.
- Green J.M. Evolution of Glyphosate-Resistant Crop Technology // Weed Science. 2009. Vol. 57, no. 1. P. 108–117. DOI:10.1614/WS-08-030.1
- Gulden R.H., Shirtliffe S.J., Thomas A.G. Harvest losses of canola (*Brassica napus*) cause large seedbank inputs // Weed Science. 2003. Vol. 51. P. 83–86. DOI:10.1614/0043-1745
- Gulden R.H., Thomas A.G., Shirtliffe S.J. Relative contribution of genotype, seed size and environment to secondary seed dormancy potential in Canadian spring oilseed rape (*Brassica napus*) // Weed Research. 2004. Vol. 44. P. 97–106. DOI:10.1111/j.1365-3180.2003.00377.x
- Gulden R.H., Warwick S.I., Thomas A.G. The biology of Canadian weeds. *Brassica napus* L. and *B. rapa* L. // Can. J. Plant Sci. 2008. Vol. 88. P. 951–996. DOI:10.4141/CJPS07203
- ISAAA (International Service for the Acquisition of Agri-Biotech Applications). GM Approval Database. <https://www.isaaa.org/gmapprovaldatabase/default.asp> Accessed 5 July 2025.
- Katsuta K., Matsuo K., Yoshimura Y., Ohsawa R. Long-term monitoring of feral genetically modified herbicide-tolerant *Brassica napus* populations around unloading Japanese ports // Breed. Sci. 2015. Vol. 65. P. 265–275.
- Hall L., Topinka K., Huffman J., Davis L., Good A. Pollen flow between herbicide-resistant *Brassica napus* is the cause of multiple-resistant *B. napus* volunteers. Weed Science. 2000. Vol. 48. P. 688–694.
- Hanski I. Metapopulation dynamics // Nature. 1998. Vol. 396. P. 41–49.
- Hecht M., Oehen B., Schulze J., Brodmann P., Bagutti C. Detection of feral *GT73* transgenic oilseed rape (*Brassica napus*) along railway lines on entry routes to oilseed factories in Switzerland. Environ // Sci. Pollut. Res. 2014. Vol. 21. P. 1455–1465.
- Kneen B. The rape of canola. Toronto: New Canada Publications, 1992. 233 p. ISBN 1-55021-066-1
- Knispel A.L., McLachlan S.M., Van Acker R.C., Friesen L.F. Gene flow and multiple herbicide resistance in escaped canola populations // Weed Science. 2008. Vol. 56. P. 72–80.
- Knispel A.L., McLachlan S.M. Landscape-scale distribution and persistence of genetically modified oilseed rape (*Brassica napus*) in Manitoba, Canada. Environ // Sci. Pollut. Res. 2010. Vol. 17. P. 13–25.
- Krato C. Petersen J. Gene flow between imidazolinone-tolerant and – susceptible winter oilseed rape varieties // Weed Research. 2012. Vol. 52. P. 187–196.
- Levin R. «Some demographic and genetic consequences of environmental heterogeneity for biological control» // Bulletin of the Entomological Society of America. 1969. Vol. 15. P. 237–240.

- Lutman P.J.W., Freeman S.E., Pekrun C. The long-term persistence of seeds of oilseed rape (*Brassica napus*) in arable fields // *J Agric Sci.* 2003. Vol. 141. P. 231–240. DOI: 10.1017/S0021859603003575
- McCauley R., Davies M., Wytntje A. The step-wise approach to adoption of genetically modified (GM) canola in Western Australia // *AgBioForum.* 2012. Vol. 15. P. 61–69.
- Munier D.J., Brittan K.L., Lanini W.T. Seed bank persistence of genetically modified canola in California // *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2012. Vol. 19. P. 2281–2284.
- NASAA (National Association for Sustainable Agriculture Australia). NASAA response to WA GM contamination (Press Release) (2011, January 3). Available on the World Wide. http://www.nasaa.com.au/data/media/NASAA%20Press%20Release_140F06.pdf
- Pandolfo C.E., Presotto A., Carbonell F.T., Ureta S., Poverne M., Cantamutto M. Transgenic glyphosate-resistant oilseed rape (*Brassica napus*) as an invasive weed in Argentina // *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.* 2016. Vol. 23. P. 24081–24091. DOI: 10.1007/s11356-016-7670-5
- Pandolfo C.E., Presotto A., Carbonell F.T., Ureta S., Poverne M., Cantamutto M. Transgene escape and persistence in an agroecosystem: the case of glyphosate-resistant *Brassica rapa* L. in central Argentina // *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.* 2018. Vol. 25. P. 6251–6264. DOI: 10.1007/s11356-017-0726-3
- Pekrun C., Lutman P.J.W., Baeumer K. Induction of secondary dormancy in rape seeds (*Brassica napus* L.) by prolonged imbibition under conditions of water stress or oxygen deficiency in darkness // *Eur. J. Agron.* 1997. Vol. 6. P. 245–255. DOI: 10.1016/S1161-0301(96)02051-5
- Powles S. B., Yu Q. Evolution in action: plants resistant to herbicides // *Annual review of plant biology.* 2010. Vol. 61. P. 317–347. DOI: 10.1146/annurev-arplant-042809-112119
- Saji H., Nakajima N., Aono M., Tamaoki M., Kubo A., Wakiyama S., Hatase Y., Nagatsu M. Monitoring the escape of transgenic oilseed rape around Japanese ports and roadsides. *Environ. Biosafety Res.* 2005. Vol. 4. P. 217–222.
- Schafer M.G., Ross A.A., Londo J.P., Burdick C.A., Lee E.H., Travers S.E., Van de Water P.K., Sagers C.L. The establishment of genetically engineered canola populations in the US // *PLoS ONE.* 2011. Vol. 6, no. 10. e25736. DOI: 10.1371/journal.pone.0025736
- Schoenenberger N., D'Andrea L. Surveying the occurrence of spontaneous glyphosate-tolerant genetically engineered *Brassica napus* L. (*Brassicaceae*) along Swiss railways // *Environmental Sciences Europe.* 2012. Vol. 24, 23. DOI: 10.1186/2190-4715-24-23
- Schulze J., Frauenknecht T., Brodmann P., Bagutti C. Unexpected diversity of feral genetically modified oilseed rape (*Brassica napus* L.) despite a cultivation and import ban in Switzerland // *PLoS ONE.* 2014. Vol. 9, e114477.
- Simard M.-J., Légère A., Warwick S.I. Transgenic *Brassica napus* fields and *Brassica rapa* weeds in Quebec: sympatry and weed-crop in situ hybridization // *Can. J. Bot.* 2006. Vol. 84. P. 1842–1851. DOI: 10.1139/B06-135
- Smyth S., Khachatourians G.G., Phillips P.W.B. Liabilities and economics of transgenic crops // *Nat. Biotechnol.* 2002. Vol. 20. P. 537–541.
- Sohn S.I., Pandian S., Oh Y.J., Kang H.J., Ryu T.H., Cho W.S., Shin, K.S. A Review of the Unintentional Release of Feral Genetically Modified Rapeseed into the Environment // *Biology.* 2021. Vol. 10, no. 12. P. 1264. DOI: 10.3390/biology10121264
- Tan S., Evans R.R., Dahmer M.L., Singh B.K., Shaner D.L. Imidazolinone-tolerant crops: history, current status and future // *Pest Management Science.* 2005. Vol. 61, no. 3. P. 246–257. DOI: 10.1002/ps.993
- Tillería S.G., Pandolfo C., Presotto A., Ureta S. No Fitness Cost in *Brassica rapa* L. (Wild Turnip) Populations Associated with Transgenic Glyphosate and Non-Transgenic Ahas-Inhibiting Herbicides Resistance // *Crop Protection.* 2023. Vol. 177. 106527. DOI: 10.2139/ssrn.4514533
- Torres Carbonell F., Ureta S., Pandolfo C., Presotto A. Molecular characterization of imidazolinone-resistant *Brassica rapa* × *B. napus* hybrids // *Environmental monitoring and assessment.* 2020. Vol. 192. 746. DOI: 10.1007/s10661-020-08711-6
- Toxeopus H., Oost E.H. and G. Reuling. Current aspects of the taxonomy of cultivated Brassica species. The use of *B. rapa* L. versus *B. campestris* L. and a proposal for a new intraspecific classification of *B. rapa* L. // *Crucifer Newsletter.* 1984. Vol. 9. P. 55–57.
- Ureta M.S., Torres Carbonell F., Pandolfo C., Presotto A.D., Cantamutto M.A., Poverene M. IMI resistance associated to crop-weed hybridization in a natural *Brassica rapa*-population: characterization and fate // *Environmental monitoring and assessment.* 2017. Vol. 189. No. 3. P. 1–12. DOI: 10.1007/s10661-016-5760-y
- Warwick S.I., Simard M.-J., Légère A., Beckie H.J., Braun L., Zhu B., Mason P., Séguin-Swartz G., Stewart C.N. Hybridization between transgenic *Brassica napus* L. and its wild relatives: *Brassica rapa* L., *Raphanus raphanistrum* L., *Sinapis arvensis* L., and *Erucastrum gallicum* (Willd.) OE Schulz // *Theoretical and Applied Genetics.* 2003. Vol. 107. No. 3. P. 528–539. DOI: 10.1007/s00122-003-1278-0
- Warwick S.I., Legere A., Simard M.-J., James T. Do escaped transgenes persist in nature? The case of an herbicide resistance transgene in a weedy *Brassica rapa* population // *Mol. Ecol.* 2008. Vol. 17. P. 1387–1395.
- Yoshimura Y., Beckie H.J., Matsuo K. Transgenic oilseed rape along transportation routes and port of Vancouver in western Canada // *Environ. Biosafety Res.* 2007. Vol. 5. P. 67–75.

INVASIVE POTENTIAL OF GM RAPESEED

© 2025 Viktorov A.G.

A.N. Severtsov Institute of Ecology and Evolution, Russian Academy of Sciences, 119071 Moscow, Russia
e-mail: aleviktorov@ya.ru

The review examines the nearly 30-year-long history of cultivating biotechnological varieties of oilseed rape (*Brassica napus*), sold under the brand name «canola». Transgenic constructs conferring resistance to non-selective herbicides have enhanced the high invasive potential of rapeseed, giving GM varieties a selective advantage over common weeds.

Self-seeded populations of GM rapeseed have become a permanent trait of transport infrastructure in countries where rapeseed is grown, in countries where its seeds are imported, and in countries through which this transit occurs.

Transgenes are transferred from GM rapeseed to related *Brassica* species. Weed populations have been discovered in which transgenic constructs for resistance to non-selective herbicides circulate. These populations eventually acquire resistance to other herbicides. For example, in Argentina, where GM rapeseed has never been grown, a population of transgenic *B. rapa*, resistant to five herbicides, is spreading widely.

In 2024, the global rapeseed crop area (including canola) equaled 42.9 million hectares, of which 10.5 million hectares (24.3%) were occupied by transgenic varieties. It is significant that from 2012 to the present, the area planted with transgenic rapeseed (canola) varieties has remained at 10-11 million hectares. The cessation of growth and stabilization of this indicator in the early 2010s correlates with the emergence of a major body of data on the high invasive potential of GM varieties of this crop.

Key words: genetically modified organisms, non-selective herbicides, glyphosate, volunteers, invasions, weeds, *Brassicaceae*, *Brassica napus*, *Brassica rapa*.