

ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ ИСПЫТАНИЕ ПЕРВЫХ БИОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ГИБРИДОВ САХАРНОЙ СВЕКЛЫ И ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИХ ВЫРАЩИВАНИЯ

Логвинов А.В., доктор сельскохозяйственных наук

Мищенко В.Н., кандидат сельскохозяйственных наук

Логвинов В.А., кандидат биологических наук

Шевченко А.Г., доктор сельскохозяйственных наук

Тюпаков К.Э.*, доктор экономических наук

Батракова Н.В., Дмитрова Е.С., Шувалов А.А.

ФГБНУ «Первомайская селекционно-опытная станция сахарной свеклы»

e-mail: 1maybest@mail.ru

*ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет имени

И.Т. Трубилина»

e-mail: tupakov@yandex.ru

***Аннотация.** На основе использования достижений в области генной инженерии и классической селекции созданы и апробированы в селекционной практике первые раздельноплодные стерильные линии ТМС 8-93 и ТМС 3-127, устойчивые к глифосату, а также сростноплодные фертильные линии - доноры устойчивости ТОн 3-99, ТОн Кр24 с устойчивостью к глифосату 96-100 %, в качестве отцовских компонентов скрещивания. Высокую продуктивность показал первый устойчивый к глифосату и церкоспорозу биотехнологический гибрид сахарной свеклы ТГ-1385 (ТМС 8-93 x ТОнКр24) F1 с урожайностью 61,4 т/га и сбором сахара 10,0 т/га. Гибель сорных растений после опрыскивания глифосатом в поле составила более 98,5 %, при этом сохранность растений сахарной свеклы в среднем за два года составила 98 %. Затраты на приобретение гербицидов снизились на 23 %. Экономическая эффективность выращивания биотехнологического гибрида по данным стационарных испытаний составила 6422 руб. в расчете на 1 га посева.*

***Ключевые слова:** сахарная свекла, селекция, линии-опылители, биотехнологический гибрид, глифосат, устойчивость, испытание, урожайность, засоренность, экономическая эффективность.*

Одними из слабых звеньев отрасли свекловодства в России является несоблюдение экологических принципов размещения зон семеноводства и отсутствие специализированных семеноводческих хозяйств, способных обеспечить сельхозтоваропроизводителей качественными семенами гибридов сахарной свеклы отечественной селекции [2, 6, 9]. Не теряет своей актуальности задача по снижению потерь потенциальных урожаев в процессе выращивания и уборки корнеплодов и семенных растений, связанных с высокой засоренностью посевов [5]. Решение данной задачи усложняется тем, что внесение удобрений и полив,

необходимые для получения высоких урожаев, одновременно создают благоприятные условия и для развития сорняков в агроценозах сахарной свеклы [1, 10]. В результате конкурентной борьбы за питание, влагу и свет недобор урожая корнеплодов и сахара с гектара может достигать 25–40 %.

Вспомним, что в XVIII–XIX вв. существовал только один способ борьбы с сорняками – ручная прополка. В первой половине XX века начали применять механическую прополку, а со второй – химическую (гербицидную) обработку посевов. Но используемые в настоящее время гербициды (баковые смеси), уничтожая сорные растения, в течение 7–10 дней после внесения оказывают токсическое воздействие и на сахарную свеклу, что также приводит к снижению урожая и сбора сахара. Поэтому создание гибридов сахарной свеклы, устойчивых к гербицидам и, в частности, к глифосату, является одной из приоритетных задач.

В настоящее время обобщены материалы зарубежных и отечественных авторов, обоснованно доказавших целесообразность форсирования исследований по биотехнологии сахарной свеклы [3, 7, 9], в частности, разработки биологических методов борьбы с сорными растениями.

В данной статье представлены материалы, которые подтверждают полученные ранее выводы, экспериментально доказывают экономическую целесообразность проведения дальнейших исследований и необходимость государственной регистрации первых линий и новых рентабельных гибридов сахарной свеклы, устойчивых к глифосату.

В исследованиях учитывается актуальность новых подходов к использованию генно-инженерных материалов, позволяющих изменять генотипы сахарной свеклы и создавать формы, устойчивые к глифосату,

тем самым существенно снизить засоренность посевов, а также сократить кратность и объемы внесения агрохимикатов [1, 4, 6, 8].

В основу работы были положены следующие концептуальные положения и термины:

1. **Сахар** имеет химическую формулу $C_{12}H_{22}O_{11}$, не содержит белок и ДНК и не зависит от геномной модификации [12].

2. **Глифосат** $C_8H_9NO_5P - N$ – (фосфометил) – глицин – системный неселективный гербицид для сплошного уничтожения растений. Подавляет синтез ароматических аминокислот – фенилаланина и тирозина, блокируя работу гена – фермента EPSPS (5-енолпирувил шикимат – 3 фосфат синтаза). После опрыскивания вызывает гибель растений в агроценозе обычной сахарной свеклы, а при выращивании устойчивых к глифосату гибридов растения культуры остаются невредимыми. Обладает низкой токсичностью [7, 11]. У человека и животных нет фермента, который мог бы блокировать глифосат.

3. **Линия сахарной свеклы** – генетически однородные потомки, устойчивые к глифосату, созданные с использованием современных достижений биотехнологии и классической селекции, содержащие привнесенный в клетки сахарной свеклы генно-инженерный материал ДНК для получения целевых свойств. Растения линии способны к воспроизводству и наследованию устойчивости к глифосату при репродукции.

4. **Биотехнологический гибрид сахарной свеклы** – гетерозиготный организм, устойчивый к глифосату, созданный с использованием современных дости-

жений биотехнологии и классической селекции, содержащий привнесенный в клетки сахарной свеклы генно-инженерный материал ДНК с целью повышения продуктивности и качества продукции.

Важность исследований ФГБНУ «Первомайская селекционно-опытная станция сахарной свеклы» подтверждается тем, что среди приоритетных направлений реализации государственной политики импортозамещения ключевая роль отводится:

- ускоренному созданию новых рентабельных гибридов, в том числе биотехнологических, на основе использования материалов генной инженерии;

- четкой координации и организации системы первичного и репродукционного семеноводства новых гибридов;

- внедрению ресурсосберегающих агротехнологий производства семян и фабричной свеклы, обеспечивающих снижение не только материальных затрат, но и пестицидную нагрузку на окружающую среду.

Особую значимость в этой связи приобретает использование методов биотехнологии для создания большего генетического разнообразия и отбора принципиально новых форм с целевыми признаками и свойствами [1, 3, 10, 11, 12]. При том, что в Комплексную программу развития биотехнологий в Российской Федерации были включены задания по генной инженерии и биотехнологическим подходам в селекции сахарной свеклы, они ограничивались проведением только экспериментальных исследований без выхода в производство.

В то же время за период 2012–2023 гг. на Первомайской селекционно-опытной станции были получены **константные линии** – доноры устойчивости к глифосату и на их основе созданы **первые**

в Российской Федерации **биотехнологические гибриды сахарной свеклы с устойчивостью к неселективному системному гербициду 96–100 %**.

В ранних исследованиях было установлено, что устойчивость или толерантность к препарату глифосат контролируется доминантным геном EPSPS.

В работе использовали следующие обозначения: RR – гомозигота по доминантному признаку устойчивости к глифосату, rr – гомозигота по рецессивному признаку устойчивости, а Rr – гетерозигота по признаку устойчивости к глифосату. T-формы – растения, в потомстве которых растения первого и второго года жизни оставались невредимыми после обработки глифосатом. Ежегодно проводили тестовые самоопыление и отборы по признаку устойчивости.



Рисунок 1. Тестирование селекционных материалов в лабораторных условиях



Для создания константного селекционного материала в качестве реципиента использовали обычные формы растений сахарной свеклы, ранее полученные на Первомайской селекционно-опытной станции:

1. Фертильные линии-опылители (ММ) разного происхождения, многосемянные.

2. Фертильные линии О-типа (mm), проверенные на закрепительную способность по признаку ЦМС (генотип Nxxxz), односемянные.

3. МС-линии, в качестве МС-тестера, со стерильной пылью, с генотипом Sxxxz (МС) для получения гибридных семян отечественных ТМС-гибридов (устойчивых к глифосату).

Для разных групп скрещивания и гибридных комбинаций были разработаны собственные методические подходы (рис. 1, 2).

1. В процессе самоопыления и размножения по типу sibсов применяли индивидуальные и парные изоляторы, групповые и вегетационные кабинки.

2. Для получения пробных гибридных комбинаций компоненты скрещивания высаживали на небольших пространственно изолированных участках (на расстоянии 3–5 км друг от друга) для свободного переопыления.

3. Полученные в опытах пробные ТМС-гибриды и отцовские компоненты (ТММ) ежегодно оценивали по устойчивости к глифосату, сравнивали с контрольным гибридом по урожайности, качеству продукции, устойчивости к церкоспорозу и рентабельности (рис. 3, 4).

Выращивали растения по общепринятым методикам с некоторыми модификациями, которые были представлены ранее в наших работах [1, 5].

Исследуемые оригинальные растения Т-форм, экспериментальных гибридов и гибридных комбинаций от анализирующих и насыщающих скрещиваний обрабатывали глифосатом в фазе первой или второй пары настоящих листьев. Растения, не выжившие в ходе эксперимента, относили к генотипу «гг». Оставшиеся в живых растения фенотипически не различались, по генотипу предположительно относились к типу «Rг»



Рисунок 2. Участок самоопыления индивидуальной изоляции

или «RR». Дальнейший отбор проводился по фенотипу. Сохранность растений сахарной свеклы и гибель сорняков учитывали через 7 и 10 дней после опрыскивания глифосатом.

Статистическую обработку данных проводили ежегодно, рассчитывали все показатели стандартными методами с использованием пакетов прикладных программ «EXEL» и «STATISTICA».

На первом этапе селекционных работ создание устойчивых к глифосату линий ограничивалось получением сростноплодной гомозиготной отцовской линии с геном RR и обычной линией МС mm гг.



Рисунок 3. Оценка новых линий в питомнике предварительного испытания



Рисунок 4. Экологическое испытание экспериментальных гибридов сахарной свеклы

Отцовская линия создавалась самофертильной (для сохранения генотипа), комбинационно способной (КС) и устойчивой к болезням. Такую форму многократно скрещивали с обычной МС линией для получения гибридных F1 семян. При их использовании в

будущих производственных посевах достаточно применения любого гербицида, содержащего глифосат, для уничтожения всех сорных растений в соответствии с разработанными рекомендациями.

Все оригинальные селекционные материалы ежегодно проходили комплексное тестирование в системе стационарных испытаний и сверялись с данными экологических испытаний 2016–2018 гг. и 2022–2023 гг.

Экологические испытания в 2022–2023 гг. проводили на экспериментальной базе Первомайской селекционно-опытной станции и НПХ «Кубань» ФГБНУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина».

Изучались впервые созданные биотехнологические гибриды сахарной свеклы ТГ-1385 и ТГ-1386, стандартом (контролем) служил коммерческий гибрид Рубин. В НПХ «Кубань» посев проводили в первой декаде апреля пневматической сеялкой «Амазоне», а на экспериментальной базе Первомайской селекционно-опытной станции – во второй декаде апреля.

Таблица 1. Продуктивность первых биотехнологических гибридов сахарной свеклы, устойчивых к глифосату, по данным экологического испытания 2023 г.

Гибрид	Густота насаждения, тыс/га	Урожайность, т/га	Сахаристость, %	Сбор сахара, т/га	Устойчивость к глифосату, %	Засоренность, %	Поражение церкоспорозом, балл
НПХ «Кубань» Кубанский государственный аграрный университет Посев 02.04.2023 г., отбор проб и учет 14.09.2023 г.							
ТГ-1385	111	63,0	17,0	10,7	98	1,0	1,5
ТГ-1386	103	58,5	17,3	10,1	100	1,0	1,0
Рубин, стандарт	103	57,8	17,6	10,2	0	3,0	1,5
НСР ₀₅		4,6	0,8				
ФГБНУ «Первомайская селекционно-опытная станция сахарной свеклы» Посев 18.04.2023 г., отбор проб и учет 05.10.2023 г.							
ТГ-1385	113	51,6	16,9	8,7	97	2,0	2,0
ТГ-1386	116	48,4	16,4	7,9	93	2,5	1,0
Рубин, стандарт	112	48,1	16,7	8,1	0	3,5	2,0
НСР ₀₅		3,7	0,6				
Средние показатели по двум экологическим пунктам в 2023 г.							
ТГ-1385	112	57,3	16,9	9,7	98	1,5	1,8
ТГ-1386	109	53,5	16,8	8,9	96	1,7	1,0
Рубин, стандарт	108	53,0	17,1	9,1	0	3,2	1,7

Площадь делянки составила 135 м², ширина междурядья – 45 см, расстояние между растениями в ряду – 17–20 см. Опыт закладывали в трехкратной повторности.

Планирование опыта, доставку семян, уход за посевами, опрыскивание, учеты и анализ данных проводили сотрудники опытной станции совместно с сотрудниками кафедры общего и орошаемого земледелия Кубанского ГАУ.

На участках экологического испытания в контрольном варианте сорняки пропалывали вручную два-три раза. Растения биотехнологических гибридов и часть растений контрольного варианта дважды опрыскивали глифосатсодержащим гербицидом Торнадо 540 (2,5 л/га), норма расхода рабочего раствора составила 200 л/га. Учет сорных растений проводили по общепринятым методикам.

Учеты основных показателей устойчивости и продуктивности

Таблица 2. Продуктивность первых биотехнологических гибридов сахарной свеклы, устойчивых к глифосату по данным испытания в двух экологических пунктах 2022–2023 гг.

Категория, номер	Гибрид	Густота насаждения, тыс/га	Урожайность (биол.), т/га	Сахаристость, %	Сбор сахара, т/га	Устойчивость к глифосату, %	Засоренность, %	Поражение церкоспорозом, балл
2253	ТГ-1385	118	61,4	16,3	10,0	98	1,6	1,5
2254	ТГ-1386	115	56,0	16,1	9,0	97	1,5	1,8
	Рубин, стандарт	119	56,7	16,3	9,3	0	2,9	1,5

изучаемых гибридов проводили 9 и 30 сентября 2022 г. Результаты были обобщены и опубликованы в сборнике «Труды Кубанского государственного аграрного университета». – 2022, № 8 (101).

Продуктивность наиболее ценного биотехнологического гибрида ТГ-1385 в экологическом испытании 2023 г. представлена в таблице 1. Его урожайность в НПХ «Кубань» была на 5,2 т/га выше, чем у обычного коммерческого гибрида Рубин, а сбор сахара – на 0,5 т/га больше. Пораженность церкоспорозом была на уровне контрольного варианта, а засоренность – ниже по сравнению с коммерческим гибридом.

Испытание на экспериментальной базе «Первомайская СОС» проходило в менее благоприятных почвенно-погодных условиях. Урожайность гибрида ТГ-1385 составила 51,6 т/га, превысив стандарт всего на 3,5 т/га. Существенных различий по содержанию и сбору сахара не отмечено. Засоренность посевов была значительно ниже по сравнению с контролем (табл. 1). Продуктивность другого биотехнологического гибрида ТГ-1386 была на уровне стандарта.

Согласно данным экологического испытания, средняя урожайность первого биотехнологического гибрида ТГ-1385 составила 61,4 т/га, что на 4,7 т/га выше стандарта – гибрида Рубин. По содержанию сахара значительных отличий не обнаружено. Сбор сахара у гибрида ТГ-1385 составил 10 т/га, что на 0,7 т/га (7,5 %) больше по сравнению с коммерческим гибридом Рубин (табл. 2).

Урожайность гибрида ТГ-1385, выращиваемого в экологическом пункте НПХ «Кубань», существенно превышала стандарт на 5 %-ном уровне значимости. В экологическом пункте Первомайской СОС прибавка по урожайности находилась в пределах точности опыта на 5 %-ном уровне значимости. Почвенно-погодные условия не позволили выявить генетический потенциал биотехнологического гибрида в экологическом пункте Первомайская СОС.

Для расчета экономической эффективности перспективного гибрида ТГ-1385 были взяты два ключевых наиболее контролируемых показателя: прибавка урожайности (т/га) в денежном выражении и расходы на приобретение гербицидов (руб.) для защиты обычных и биотехнологических гибридов сахарной свеклы от сорных растений (см. табл. 3–5).

Таблица 3. Затраты на приобретение гербицидов для защиты посевов сахарной свеклы от сорных растений

Наименование средств защиты растений	Расход на 1 га, л/кг	Цена за 1 л/кг	Затраты на 1 га, руб.
Перспективная технология защиты сахарной свеклы, устойчивой к глифосату (экологическое испытание)			
Торнадо 500, л	2,5	679	1698
Итого	2,5		1698
Технология, применяемая в АО «Успенский сахарник»			
Первая обработка 26.04.2017 г. (баковые смеси)			
Бетанал Эксперт ОФ, л	1	1580	1580
Фронтьер Оптима КЭ, л	0,2	1730	346
Арбитр, кг	0,03	17500	525
Тренд – 90 Ж, л	0,3	533	160
Декстер КЭ, л	0,15	3500	525
Итого	1,68		3126
Вторая обработка 05.05.2017 г.			
Бетанал 22, л	1,2	1350	1620
Фронтьер Оптима, л	0,5	1730	865
Кари-Макс, СП, кг	0,03	17500	525
Агрон, ВР, л	0,2	3150	630
Легион, л	0,2	1155	231
Бит 90, л	0,2	530	106
Итого	2,33		3977
Третья обработка 28.05.2017 г.			
Бетанал 22, л	1,3	1350	1755
Кари-Макс, СП, кг	0,03	17500	525
Фронтьер Оптима, л	0,5	730	865
Декстер, л	0,15	3500	525
Легион Комби, л		1155	347
Бит 90, л	0,2	530	106
Итого	2,38		4123
Всего	6,39		11236

При выращивании устойчивых к глифосату гибридов затраты на приобретение гербицидов за три года уменьшились в среднем на 23 % по сравнению с затратами на коммерческие неустойчивыми гибриды. Экономическая эффективность в расчете на 1 га составила 6422 руб. Таким образом, повысить рентабель-

Таблица 4. Затраты на приобретение гербицидов для уничтожения сорных растений, 2018 г.

Наименование средств защиты растений	Расход на 1 га л/кг	Цена за 1 л/кг	Затраты на 1 га, руб.
Перспективная технология защиты сахарной свеклы, устойчивой к глифосату (экологическое испытание)			
Первая обработка (первая декада мая)			
Тотал 480 ВР, л	2,5	404,7	1012
Вторая обработка (третья декада мая)			
Тотал 480 ВР, л	2,5	404,7	1012
Итого	5,0		2024
Технология, применяемая в свеклосеющих хозяйствах (баковые смеси)			
Первая обработка (третья декада апреля)			
Бетанал Эксперт ОФ, л	1,0	944,3	944,3
Фронтьер Оптима КЭ, л	0,2	1689,1	338
Арбитр, кг	0,03	19950	599
Тренд – 90 Ж, л	0,3	416	125
Декстер КЭ, л	0,15	1529,5	229
Итого	1,68		2235
Вторая обработка (третья декада мая)			
Бетанал 22, л	1,2	598,5	718
Фронтьер Оптима, л	0,5	16891	845
Кари-Макс, СП, кг	0,03	7315	220
Агрон, ВР, л	0,2	2660	532
Легион, л	0,2	1529,5	306
Бит 90, л	0,2	416	83
Итого	2,33		2704
Третья обработка (вторая-третья декада мая)			
Бетанал 22, л	1,3	598,5	778
Кари-Макс, СП, кг	0,03	7315	220
Фронтьер Оптима, л	0,5	1689,1	845
Декстер, л	0,15	1529,5	229
Легион Комби, л	0,3	1529,5	459
Бит 90, л	0,2	416	83
Итого	2,48		2614
Всего	6,49		7553

ность производства сахарной свеклы можно за счет более высокой продуктивности биотехнологических гибридов и снижения затрат на приобретение гербицидов. Для подтверждения полученных результатов и обоснования возможной коммерциализации экологическое испытание биотехнологических гибридов планируется продолжить в 2024 г.

Использование перспективной технологии в условиях 2017 г. на полевом участке АО «Успенский сахарник» показало, что для уничтожения сорняков было достаточно провести однократное опрыскивание глифосатсодержащим гербицидом Торнадо 500 (табл. 3).

Для сравнения приведены затраты на приобретение гербицидов в свеклосеющих хозяйствах (баковые смеси) и возможные затраты при использовании альтернативной перспективной технологии (табл. 4).

Затраты на приобретение гербицидов для защиты сахарной свеклы от сорных растений в 2019 г. подтверждают показатели, полученные в 2017–2018 гг. (табл. 5).

Таблица 5. Затраты на приобретение гербицидов для защиты сахарной свеклы от сорных растений в 2019 г. (по состоянию на 7 мая)

Наименование средств защиты растений	Расход на 1 га	Цена за 1 л/кг	Затраты на 1 га, руб.
Перспективная технология защиты сахарной свеклы, устойчивой к глифосату (экологическое испытание)			
Первая химическая обработка 07.05			
Тотал 480, ВР, л	2,0	480	960
Вторая химическая обработка 20.05			
Тотал 480, ВР, л	2,0	480	960
Итого	4,0		1920
Технология, применяемая в свеклосеющих хозяйствах			
Первая химическая обработка 29.04			
Синбетан Эксперт ОФ	1,00	925	925,0
Карамболь	0,03	13215,0	396,4
Фронтьер Оптима	0,20	1890	379,0
Декстер	0,20	521	104,2
Агролип 93	0,20	87	17,4
Итого	1,63		1822,0
Вторая химическая обработка 07.05			
Синбетан Эксперт ОФ.	0,70	925	647,5
Карамболь	0,03	13215	396,4
Бетанал Макс Про	0,50	2562	1281,0
Альфа-Пиралид	0,20	1486	297,2
Декстер	0,20	521	104,2
Итого	1,63		2726,3
Третья химическая обработка 20.05			
Синбетан Эксперт ОФ.	0,70	925	647,5
Карамболь	0,03	13215	396,4
Бетанал Макс Про	0,50	2562	1281,0
Альфа-Пиралид	0,20	1486	297,2
Декстер	0,20	521	104,2
Клетомид Плюс Микс	0,50	1090	545,0
Итого	2,13		3271,3
Всего	5,39		7819,7

