

СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СЕЛЕКЦИИ СОРГО САХАРНОГО НА УСТОЙЧИВОСТЬ К ПОНИЖЕННЫМ ТЕМПЕРАТУРАМ

В. Л. КОПЫЛОВИЧ, В. И. БУШУЕВА, В. А. РАДОВНЯ, Д. А. РОМАНЬКОВ

*УО «Белорусская государственная орденов Октябрьской Революции
и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия»,
г. Горки, Республика Беларусь, 213407*

(Поступила в редакцию 10.03.2023)

Сорго сахарное – перспективная кормовая культура для южных и центральных районов Беларуси, обладающая непревзойдённой засухоустойчивостью и высокой урожайностью сухого вещества. Селекция сорго сахарного в РНДП «Полесский институт растениеводства» проводится с 2008 года по направлению создания раннеспелых и холодостойких сортов на фоне посева в оптимально ранние сроки. С помощью многофакторного линейного регрессионного анализа показано существенное влияние суммы активных температур в период начального развития (май) на урожайность сухого вещества у новых сортообразцов в конкурсном сортоиспытании ($n=6$), отсутствующее у стандартного сорта Славянское приусадебное, а также у группы коллекционных сортообразцов ($n=48$). Это подтверждает способность новых сортообразцов эффективно использовать тепловые ресурсы в начальный период роста. Наиболее значимыми факторами формирования урожайности сухого вещества у всех сортообразцов в коллекционном питомнике и в конкурсном сортоиспытании являются сумма активных температур и количество осадков в период интенсивного роста (июль).

В отличие от стандартного сорта новые сортообразцы не реагировали на количество осадков в период всходов, что подтверждает их повышенную устойчивость к фитотоксическому действию почвенного гербицида Гардо Голд. Обсуждается способность стандартного сорта Славянское приусадебное к компенсации гербицидного стресса за счёт активизации ростовых процессов в период активного роста, что говорит о возможности создания более продуктивных сортов. Остаётся неясным, за счёт каких процессов достигается эффективное использование тепловых ресурсов (адаптация к холоду или к гербицидному стрессу), в связи с чем предлагается в селекции сорго сахарного использовать комплексный признак «устойчивость к пониженным температурам».

Ключевые слова: *сорго сахарное, селекция, коллекционный материал, урожайность, холодостойкость, фитотоксичность, стресс.*

Sugar sorghum is a promising fodder crop for the southern and central regions of Belarus, which has unsurpassed drought resistance and high dry matter yield. Selection of sugar sorghum in the "Polesye Institute of Plant Growing" has been carried out since 2008 in the direction of creating early ripe and cold-resistant varieties against the background of sowing at the optimally early time.

With the help of multivariate linear regression analysis, a significant effect of the sum of active temperatures during the initial development period (May) on the dry matter yield of new variety samples in competitive variety tests ($n=6$) was shown, which is absent in the standard variety Slavyanskoe priusadebnoe, as well as in the group of collection variety samples ($n=48$). This confirms the ability of new variety samples to efficiently use thermal resources in the initial period of growth. The most significant factors in the formation of dry matter yield in all variety samples in the collection nursery and in competitive variety testing are the sum of active temperatures and the amount of precipitation during the period of intensive growth (July).

Unlike the standard variety, the new variety samples did not react to the amount of precipitation during the germination period, which confirms their increased resistance to the phytotoxic effect of the Gardo Gold soil herbicide. The ability of the standard variety Slavyanskoe priusadebnoe to compensate for herbicide stress due to the activation of growth processes during the period of active growth is discussed, which indicates the possibility of creating more productive varieties. It remains unclear by what processes the efficient use of thermal resources is achieved (adaptation to cold or to herbicide stress), and therefore it is proposed to use the complex trait "tolerance to low temperatures" in the breeding of sugar sorghum.

Key words: *sweet sorghum, selection, collection material, yield, cold resistance, phytotoxicity, stress.*

Введение

Сорго – важнейшее сельскохозяйственное растение, занимающее пятое место по объёму мирового производства. Благодаря своей засухоустойчивости это одна из основных продовольственных культур в Африке и Индии. В США, Мексике, Аргентине, Австралии, а в последнее время и в странах Западной Европы расширяются посевы сорго силосного для производства кормов и биогаза. В Республике Беларусь в связи с изменениями климата сорго сахарное может стать неплохой альтернативой кукурузе в качестве кормовой культуры благодаря своей более высокой засухоустойчивости и эффективному использованию питательных веществ.

В странах с умеренным климатом для достижения максимально возможной продолжительности вегетации посев сорго сахарного необходимо проводить в возможно ранние сроки. При этом прорастание семян и начальное развитие растений будет проходить при пониженных температурах.

Установлено, что в условиях Белорусского Полесья посев сорго сахарного возможен уже в третьей декаде апреля, но посевы, проведённые в I–II декадах мая, несколько уступая по сбору сухого вещества, имеют равную урожайность зелёной массы и менее подвержены рискам заморозков [4].

Для условий лесостепной зоны Украины наилучшее развитие растений сорго сахарного наблюдается при посеве во второй декаде мая [1]. В северо-восточной части Беларуси посев сорго сахарного рекомендуется проводить в первой декаде июня [3].

Являясь изначально тропическим C_4 -растением, сорго чувствительно к температурам ниже $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ [5]. По некоторым данным температуры ниже $21\text{ }^{\circ}\text{C}$ уже оказывают стрессовые воздействия [6]. Низкотемпературный стресс оказывает вредное воздействие почти на все физиологические процессы как на гетеротрофном этапе (всходы), так и на автотрофном этапе роста (фотосинтез и развитие корней). Таким образом, для выращивания сорго сахарного в странах умеренного климата, отличающегося коротким вегетационным периодом, необходимо создание скороспелых (раннеспелых) и холодостойких сортов и гибридов.

Обычно под холодоустойчивостью понимается способность теплолюбивых растений переносить кратковременные понижения температур не ниже $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Таким образом, холодоустойчивость выступает признаком устойчивости к стрессовому фактору, за реализацию признака отвечают различные механизмы: переносимость низких температур (до определённого предела) без видимых эффектов за счёт различий химического состава мембран, скорость и эффективность действия систем адаптации (синтез стрессовых белков, изменение гормонального баланса и др.). Наиболее действенный метод повышения холодоустойчивости сорго сахарного – проведение селекции непосредственно в районе его возделывания. В таком случае создаются условия для отбора генотипов, наиболее адаптированных к комплексу стрессовых факторов.

Селекция сорго сахарного в РНДУП «Полесский институт растениеводства» проводится с 2008 года, полная схема селекционного процесса развёрнута в 2013 году. При создании сортов ставилась задача получения кондиционных семян в условиях республики, что возможно только за счёт сочетания в сорте признаков раннеспелости и холодостойкости.

Целью настоящей работы стала оценка эффективности селекции сорго сахарного на холодостойкость в РНДУП «Полесский институт растениеводства».

Основная часть

Обычно отбор селекционного материала на холодоустойчивость затруднён из-за непредсказуемой погоды, что приводит либо к слишком мягкому, либо к чрезмерно жёсткому отбору генотипов и неполной оценке селекционного материала в последующие годы, когда интенсивность стрессового фактора будет недостаточной. В наших исследованиях посев селекционного материала проводился ежегодно в начале мая, что позволило отбирать достаточно холодостойкие генотипы, обладающие признаками высокой продуктивности, и таким образом создать сбалансированные гибридные популяции. Последние являются основой для создания популяционных сортов.

Холодостойкие образцы сорго сахарного способны развиваться в условиях пониженных температур и длинного дня, отличаются более стабильным признаком продолжительности ювенильного периода развития (всходы – начало цветения). У нехолодостойких скороспелых образцов может отмечаться снижение продуктивности в годы с прохладной весной. Оценка холодостойкости сортов и гибридов проводится различными прямыми и косвенными способами: оценка в экологическом сортоиспытании в северных районах, посев в провокационно-ранние сроки, использование климатических камер, различные лабораторные методы. В настоящей работе мы применили статистические методы анализа, которые позволяют оценить уровень реакции генотипа (группы генотипов) на изменяющиеся погодные условия.

Для статистического анализа были использованы данные урожайности сухого вещества в коллекционном питомнике за 2016–2018 годы – контрольная группа, включающая 48 сортообразцов сорго сахарного различного происхождения и групп спелости. С контрольной группой сравнивалась группа новых сортообразцов, представленная 6 образцами в питомнике конкурсного сортоиспытания, а также сорт-стандарт *Славянское приусадебное*.

Ввиду того, что методики проведения исследований в коллекционном питомнике и конкурсном сортоиспытании существенно различаются, сравнение абсолютных значений селекционных признаков между питомниками является некорректным. Поэтому сравнение сортообразцов проводилось в относительных величинах к единому стандартному сорту (*Славянское приусадебное*), а также сравнивались статистические модели. Последние рассчитывались методом многофакторного линейного регрессионного анализа с помощью программы Excel. В расчётах принималось пересечение линии регрессии с осью ординат в точке 0, что позволяет отнести полученные зависимости к упрощённым биологическим моделям, коэффициенты в таком случае количественно описывают влияние признака на функцию (урожайность сухого вещества).

Погодные условия за годы проведения исследований существенно различались. В 2016 году в мае создались наиболее благоприятные условия для появления всходов сорго: среднесуточная температура

составила 15,2 °С. Во второй декаде мая всходы развивались при низких температурах (12,8 °С). В дальнейшем до конца августа среднесуточные температуры превышали 15 °С, а дефицит почвенной влаги отмечался во второй декаде июля, а также в конце августа–сентябре. Последующий 2017 год отличался недостаточной теплообеспеченностью в I–II декадах мая (период прорастания и начального развития сорго сахарного), среднесуточные температуры составили всего 11,0–12,6 °С. В дальнейшем среднесуточные температуры воздуха превысили 15,9 °С, а во второй половине вегетации (август–октябрь) температурный режим снова оказался выше среднемультилетних показателей на 0,3–6,8 °С.

Агрометеорологические показатели 2018 года отличались высокими среднесуточными температурами воздуха в мае и I–II декадах июня. В этот период на фоне дефицита осадков отмечалась умеренная почвенная засуха – влажность почвы составляла 1,5–4,7 %. В дальнейшем условия влаго- и теплообеспеченности оказались благоприятными для роста и развития растений сорго: среднесуточные температуры воздуха превышали 20,2 °С, а влажность почвы была в пределах 6,2–9,8 %.

В табл. 1 приведены суммы эффективных температур (ЭТ) в критические периоды роста сорго сахарного (рассчитаны как сумма среднесуточных температур за вычетом 5 °С) и количество выпавших осадков (Ос), используемые в регрессионном анализе. Расчёты показали, что использование метеорологических данных за другие месяцы, а также суммы активных температур даёт менее значимые зависимости, либо данные параметры в формуле не учитываются (коэффициенты равны 0).

Таблица 1. Условия тепло- и влагообеспеченности сорго сахарного

Год	Сумма эффективных температур, °С			Осадки, мм		
	май	июль	апрель–сентябрь	май	июль	апрель–сентябрь
2016	321	447	1269	98	149	316
2017	270	360	1108	58,6	138,6	456
2018	343	409	1474	34,3	74,55	281

Почва опытного участка – дерново-подзолистая супесчаная, pH – 5,7–5,8, содержание подвижного фосфора и обменного калия повышенное, гумуса – 2,1–2,2 %. Возделывание сорго велось в широкоярдных посевах (70 см). Посев проводился ежегодно в первых числах мая. В коллекционном питомнике площадь делянки составляла 2 м² при двукратной повторности, посев осуществлялся вручную с последующим формированием густоты стояния растений (5–6 растений на 1 метре погонном). Ввиду существенных различий по устойчивости к д. в. гербицида Гардо Голд, борьба с сорняками проводилась вручную.

В конкурсном сортоиспытании площадь делянки составляла 20 м² при четырёхкратной повторности. Посев проводился ручной сеялкой с нормой высева 150 тыс. шт./га. Формирования густоты стояния не осуществлялось, борьба с сорняками осуществлялась с помощью гербицида Гардо Голд (внесение до всходов в дозе 3 л/га). Применение гербицида Гардо Голд следует рассматривать как дополнительный стрессовый фактор в дополнение к действию пониженных температур в период всходов сорго сахарного. В годы с прохладной весной и большим количеством осадков, выпадающих в течение 21 дня после появления всходов, доза внесения более 2,0 л/га оказывает существенное фитотоксическое действие [2]. Однако это обязательный элемент технологии возделывания, в связи с чем повышение полевой устойчивости к д. в. данного гербицида явилось одной из целей селекции сорго сахарного.

За годы исследований в коллекционном питомнике наибольшее варьирование урожая сухого вещества отмечено в 2017 году, наименее теплообеспеченном и избыточно увлажнённом (табл. 2). В условиях года некоторые образцы полегали и тем самым ограничивали свою урожайность. Тем не менее, в этом году выделились холодоустойчивые образцы, эффективно использующие имеющиеся тепловые ресурсы. Максимальная урожайность сухого вещества в 2017 году лишь на 14 ц/га уступала наиболее благоприятному для развития сорго сахарного 2016 году.

Таблица 2. Варьирование урожайности сухого вещества сорго сахарного в коллекционном питомнике и в конкурсном сортоиспытании, ц/га

Показатель	Коллекционный питомник (n=48)			Конкурсное сортоиспытание (n=6)		
	2016	2017	2018	2016	2017	2018
Среднее	167 71,4% *	142 71,0%	151 76,6%	147,7 93,5%	138,0 97,2%	120,1 96,1%
Минимум	92,0	64,9	82,4	129	119	91,9
Максимум	234	220	213	160	164	147,7
Дисперсия	1327	1814	1117	156	235	488
St – Славянское приусадебное	234	200	197	158	142	125

Примечание: * – в знаменателе – относительная средняя урожайность к стандарту.

Проведение многофакторного регрессионного анализа позволяет вычлениить действие на урожайность сорго сахарного наиболее существенных факторов внешней среды (табл. 3). В среднем по 48 образцам коллекционного питомника в 2016–2018 годах наибольшее влияние на урожайность сухого вещества сорго сахарного оказали сумма эффективных температур и количество осадков в июле (период

максимального роста растений). Надо отметить, что у стандартного сорта *Славянское приусадебное*, как более продуктивного, значения коэффициентов при переменных оказались более высокими, что говорит о способности генотипа более эффективно использовать имеющиеся ресурсы тепла и влаги.

Анализ показал, что на урожайность сухого вещества новых сортообразцов сорго сахарного, проходящих конкурсное сортоиспытание, оказывает влияние сумма эффективных температур за май (коэффициент X_1). Количественный размер относительно небольшой (0,03 ц/га на каждый градус суммы эффективных температур), но он характеризует способность генотипов расти и развиваться при пониженных температурах при такой интенсивности, что эффекты можно отследить при уборке – на конечном этапе продукционного процесса.

Таблица 3. Уравнения многофакторной линейной регрессии зависимости урожайности сухого вещества сорго сахарного

Питомник	X_1 – сумма ЭТ за май	X_2 – сумма ЭТ за июль	X_3 – сумма Ос за май	X_4 – сумма Ос за июль	R^2 S
Коллекционный питомник, среднее по n=48	0	0,29	0	0,30	$\frac{0,87}{38,1}$
Коллекционный питомник, <i>St - Славянское приусадебное</i>	0	0,32	0	0,34	–
Конкурсное сортоиспытание, среднее по n=6	0,03	0,18	0	0,46	$\frac{0,97}{17,1}$
Конкурсное сортоиспытание, <i>St - Славянское приусадебное</i>	0	0,23	-0,24	0,53	–

Установлено, что новые сортообразцы в среднем практически равноценны стандартному сорту *Славянское приусадебное* по эффективности использования ресурсов тепла в период активного роста, однако хуже используют осадки, выпадающие в июле (относительные различия коэффициента X_4 составили 13 %).

Вместе с тем на урожайность стандартного сорта *Славянское приусадебное* значительное отрицательное влияние оказывает сумма осадков за май, что следует связывать с фитотоксическим влиянием на продукционный процесс почвенного гербицида Гардо Голд. Действительно, при проведении исследований фитотоксические эффекты на сорт *Славянское приусадебное* отмечались нами ежегодно: всходы появлялись на 1–4 дня позже, растения имели искривлённую форму, окраска при этом сохранялась сочно-зелёной. Наибольший эффект отмечался в 2016 году, когда в мае выпало 98 мм осадков.

В среднем по группе новых сортообразцов такого влияния не обнаружено, что позволяет говорить о более высокой их толерантности к д. в. гербицида Гардо Голд. Однако, следует обратить внимание на факт, что в условиях 2016 года при наибольшем фитотоксическом эффекте на растения в период ювенильного развития сорт *Славянское приусадебное* показал наибольшую урожайность относительно новых сортообразцов, т. е. оказался способным компенсировать стрессовое воздействие за счёт повышения интенсивности ростовых процессов в последующее время. Этот факт свидетельствует о значительном потенциале селекции по созданию более продуктивных сортов и гибридов сорго сахарного за счёт сочетания в одном генотипе холодостойкости на начальном этапе роста и высокой интенсивности продукционных процессов в летний период.

Не следует отвергать гипотезу, что положительное влияние суммы эффективных температур, накопленных на начальном этапе развития сорго сахарного, заключается скорее в повышении устойчивости растений к гербицидному стрессу, нежели в их устойчивости к низкотемпературному стрессу. Возможно, имеет место повышение адаптивности растений по обоим направлениям, определение их размеров и характера связей требует дополнительных исследований.

На настоящем этапе в практической селекции мы предлагаем относить устойчивость сорго сахарного к фитотоксическому действию почвенных гербицидов, как одному из элементов комплексного признака «устойчивость к пониженным температурам». Возможно, на его проявление оказывают влияние совершенно иные механизмы, чем на способность растений к обмену веществ при пониженных температурах, но главная суть показателя заключается в устойчивости к стрессовому воздействию холода на все продукционные процессы (ростовые, адаптационные) и эффективное использование тепловых ресурсов на начальном этапе роста.

Заключение

Таким образом, с помощью многофакторного линейного регрессионного анализа нами показано существенное влияние суммы активных температур в период ювенильного развития (май) на урожайность сухого вещества у новых сортообразцов сорго сахарного, отсутствующее у стандартного сорта

Славянское приусадебное. Кроме того, новые сортообразцы являются более устойчивыми к фитотоксическому действию почвенного гербицида Гардо Голд.

Вопрос за счёт каких процессов достигается эффективное использование тепловых ресурсов на начальном этапе развития (ростовые процессы, адаптация к холоду или гербицидному стрессу) требует дальнейших исследований. В связи с этим предлагается в практической селекции сорго сахарного использовать более комплексный признак «устойчивость к пониженным температурам», включающий в себя не только толерантность к холоду, но и устойчивость к почвенным гербицидам, фитотоксическое действие которых усиливается при пониженных температурах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Герасименко, Л. А. Влияние сроков сева и глубины заделки семян на фотосинтетическую продуктивность посевов сорго сахарного (*Sorghum saccharatum* (L.) Pers.) / Л. А. Герасименко // Сортовивчення та охорона прав на сорти рослин: науч.-практ. журн. – 2014. – № 4 (25). – С. 73–77.
2. Копылович, В. Л. Эффективность внесения гербицидов в посевах сорго сахарного в условиях Белорусского Полесья / В. Л. Копылович, В. А. Радовня, Н. М. Шестак // Вестник БГСХА: науч.-метод. журн. – 2021. – №4. – С. 87–92.
3. Персикова, Т. Ф. Влияние сроков посева, доз азотных удобрений и микроэлементов на продуктивность и качество зелёной массы сорго сахарного в условиях северо-востока Беларуси / Т. Ф. Персикова, А. З. Большаков, Е. А. Блохина // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – 2014. – №2. – С. 105–109.
4. Шестак, Н. М. Продуктивность и основные приёмы возделывания сорго сахарного в южной части Беларуси: автореф. дис. ... канд. с.х. наук: 06.01.09 / Н. М. Шестак; НАН Беларуси, НПП по земледелию. – Жодино, 2019. – 20 с.
5. Yu J., Tuinstra M. R. Genetic analysis of seedling growth under cold temperature stress in grain sorghum // Crop Science. – 2001. – Т. 41. – №. 5. – С. 1438–1443.
6. Richburg, J. T. Evaluation of Crop Tolerance and Weed Control in Corn and Grain Sorghum with Atrazine Replacements Graduate Dissertations of Master of Science in Crop, Soil & Environmental Sciences. [Electronic resource]. – University of Arkansas, 2019. – Mode of access: <https://scholarworks.uark.edu/etd/3220> – Date of access: 29.10.2021.