

## НАСЛЕДОВАНИЕ СОДЕРЖАНИЯ САХАРОВ И ПРОТЕИНА В ЗЕЛЕННОЙ МАССЕ СОРГО САХАРНОГО

**Ковтунова Н. А.**

ФГБНУ «Аграрный научный центр «Донской»

г. Зерноград, Российская Федерация

**Аннотация.** Целью исследований являлось выявление закономерностей наследования содержания сахаров в соке стеблей и сырого протеина в сухом веществе сорго сахарного. Установлено, что для получения сортов с высоким значением данного признака в гибридизацию необходимо включать образцы с наибольшими различиями по данному признаку. Для дальнейшей работы на увеличение содержания сахаров в соке стеблей выделены трансгрессивные формы из комбинаций А-105/3 х Дебют, А-105/3 х К-334. Для получения высокобелковых сортов в качестве исходных форм необходимо использовать образцы с высокими показателями этого признака. При скрещивании средне- с высокобелковыми сортами наблюдается доминирование больших значений признака, гибриды имеют среднее значение 6,6-6,8 %.

**Summary.** The aim of this study was to identify patterns of inheritance of sugar content in stem sap and crude protein in dry matter in sweet sorghum. It was established that to obtain varieties with high values for this trait, it is necessary to include accessions with the greatest differences in this trait in hybridization. Transgressive forms from the combinations A-105/3 x Debut and A-105/3 x K-334 were isolated for further work on increasing sugar content in stem sap. To obtain high-protein varieties, accessions with high values for this trait must be used as parent forms. When crossing medium- and high-protein varieties, dominance of high values for this trait is observed, with hybrids having an average value of 6.6-6.8%.

**Ключевые слова:** сорго, сахар, протеин, наследование, доминирование, гибриды, ген.

**Key words:** sorghum, sugar, protein, inheritance, dominance, hybrids, gene.

Сорго является перспективной кормовой и, что особенно важно в условиях континентального климата нашей страны с периодически возникающими засухами, засухоустойчивой культурой. Главным достоинством сорго сахарного является сочный сладкий стебель. Сахара, полученные из сорго, по своему составу превосходят сахара из сахарной свеклы и тростника, а сироп по содержанию биологически активных веществ близок к натуральному меду и может с успехом использоваться в кондитерском и хлебопекарном производстве [1]. По питательности сорговый сироп не уступает сахаросодержащим продуктам из сахарной свеклы, тростника, при том, что его возделывание более экономично и получение урожая основного сырья (зеленой массы) стабильно в любых условиях возделывания. Кроме того, сироп из сорго сахарного в чистом

виде легче усваивается организмом человека, чем кристаллический, и может быть полезным в производстве продуктов оздоровительного питания, который можно употреблять больным сахарным диабетом. При производстве сиропа, соков и этанола необходимо подбирать сорта сорго, которые не только позволяют получать высокий выход сока, но и имеют высокое содержание сахаров [1].

Сорго сахарное показало свою эффективность в качестве сырья для производства этанола благодаря быстрой скорости роста, раннему созреванию, эффективному использованию влаги, устойчивости к бедным и засоленным почвам, широкой адаптивности [3, 4]. Его экономическое превосходство объясняется не только низкими затратами на производство, но и высокой производительностью этанола, объясняющейся высокой урожайностью зеленой массы, содержанием сахаров в соке стеблей, экстрактивностью сока стеблей [5, 6]. Сорго сахарное может давать до 8000 л этанола с га, что в 2 раза выше, чем выход этанола из кукурузы и на 30 % выше, чем из сахарного тростника [7, 8].

В зрелых междоузлиях стебля сахарного сорго содержится больше сахарозы, чем в более молодых. Оптимальной стадией сбора урожая биомассы сорго сахарного считается период, когда накапливается от 15,5 % сахаров, это является главным требованием для получения сока высокого качества для брожения и, следовательно, для получения максимального количества этанола с га [9]. Урожайность слабо коррелирует с содержанием сахаров, что позволяет предположить, что накопленный сахар не сильно влияет на конечную урожайность [10].

В то же время сорго сахарное – это, прежде всего, кормовая культура. По кормовым качествам зеленая масса сорго приближается к кукурузе: в 1 кг содержится 0,2-0,3 к.е., 2,4-2,8 МДж обменной энергии, 30-40 г сырого протеина, 7-11 г жира, 75-90 г сырой клетчатки, 116-213 г безазотистых экстрактивных веществ [11]. Содержание сырого протеина зависит, в первую очередь, от генотипической конституции сортов и характера наследования признака.

Программы селекции сорго сахарного, ориентированные на производство биоэнергии, помимо увеличения урожайности биомассы преследуют цель: повысить количество сахаров в сочных стеблях растений, программы, направленные на обеспечение кормами, – на увеличение содержания протеина в сухом веществе зеленой массы. Изучение закономерностей наследования данных признаков позволит более целенаправленно подбирать исходный материал при создании новых сортов различных направлений использования [12-14]. В связи с этим целью исследований являлось выявление закономерностей наследования содержания сахаров в соке стеблей и сырого протеина в сухом веществе сорго сахарного.

Исследования проводили на полях ФГБНУ «АНЦ «Донской». Предшественник – озимая пшеница. Почва – обыкновенный карбонатным черноземом, с содержанием гумуса в пахотном слое 3,6 %. Посев проводили в оптимальные сроки – температура почвы на глубине залегания семян 14 °С и более – первая-вторая декада мая сеялкой «Клен-4,2». Способ посева – широкорядный с междурядьями 70 см, норма высева 200 тысяч штук всхожих семян на 1 га. Уходные мероприятия проводили в соответствии с Методикой Государственной комиссии по сортоиспытанию сельскохозяйственных культур [15].

Содержание сахаров в соке стеблей определяли оптическим методом в фазе восковой спелости [16]. Образцы оценивали согласно «Широкого унифицированного классификатора СЭВ и Международного классификатора СЭВ возделываемых видов рода *Sorghum* Moench» согласно следующей градации: очень высокое – более 19 %, высокое – 15,1-19,0 %, среднее – 11,1-15,0 %, низкое – 8,0-11,0 % и очень низкое – менее 8 %. Для определения содержания сырого протеина проводили отбор средних проб зеленой массы в фазу молочно-восковой спелости согласно общепринятых методик ГОСТ 13496.4-2019.

Для генетического анализа признака использовали компьютерную программу поиска моделей расщепления Полиген А [17].

Для изучения наследования сахаров сорго сахарного объектом исследований послужили гибриды первого и второго поколения, полученные от скрещивания 5 контрастных по данному признаку форм. Исходные формы по содержанию сахаров в соке стеблей условно были разделены на 3 группы: 12 % сахаров – А-105/3; 13-14 % – Дебют, К-3868, 15-16 % – К-9982, К-334. В качестве родительских форм при изучении наследования сырого протеина использовали образцы, контрастные по изучаемому признаку: низкобелковые (содержание протеина в зеленой массе до 5 %) – Черноградское 1, Сахарсил; среднебелковые (6-7 %) – К-449, Северное 44; высокобелковые (более 7 %) – Редколистный, Амазонит. Уборку зеленой массы проводили в фазе «начало выметывания».

Содержание сахаров в соке стеблей. При изучении гибридов первого поколения по признаку «содержание сахаров в соке стеблей» в основном наблюдалось промежуточное наследование. Выделились 8 комбинаций, у которых наблюдался истинный гетерозис. Максимальное содержание сахаров наблюдалось у гибридов К-334 х Дебют (20 %), А-105/3 х К-3868 (19 %), К-334 х К-9982 (20 %) и других.

У гибридов второго поколения также наблюдались различные типы наследования (рисунок 1).

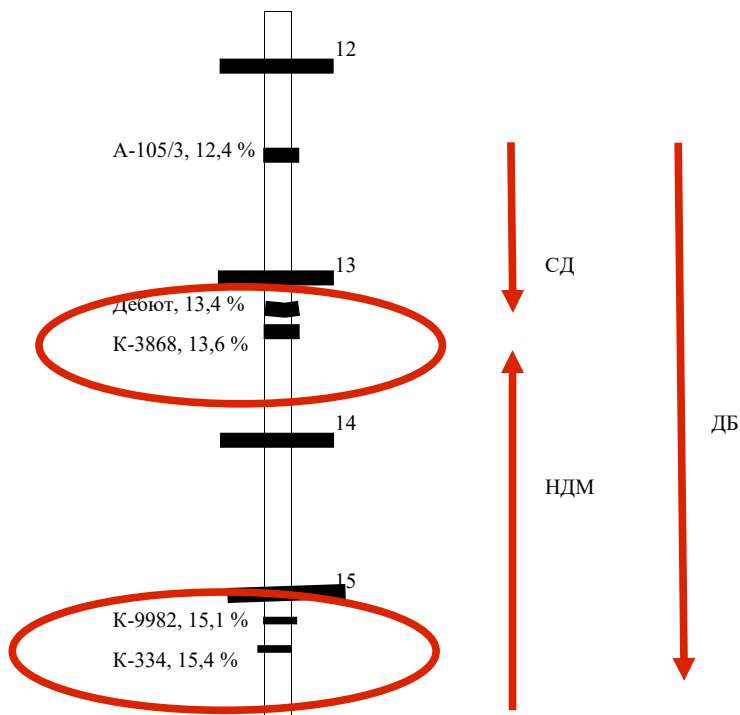


Рисунок 1 – Типы наследования содержания сахаров в соке стеблей сорго сахарного у гибридов F<sub>2</sub>

*Примечание – \* СД – сверхдоминирование, НДМ – неполное доминирование меньших значений, ДБ – доминирование больших значений*

В комбинации Дебют х К-3868 родительские формы имели близкие значения признака (13,4 и 13,6 % соответственно). Программа генетического анализа показала, что генетически они не различались. Такая же картина наблюдается в реципрокных комбинациях К-334 х К-9982.

У реципрокных гибридов F<sub>2</sub> А-105/3 х Дебют, А-105/3 х К-3868, К-3463 х Дебют, К-3463 х К-3868 наблюдается сверхдоминирование. Родительские формы в этих комбинациях различались по одной паре генов. Содержание сахаров у родительских форм гибрида А-105/3 х Дебют – 12,3 и 13,4 % соответственно, а гибрид превосходит их на 2 % и 0,9 % соответственно. Степень доминирования у гибрида составила 3,2. Из гибридной комбинации А-105/3 х Дебют выделены трансгрессивные формы с содержанием сахаров в соке стеблей 16,1-20,0 %, ценные для получения

сортов с повышенным содержанием сахаров и использования их в крахмалопаточной промышленности и производства этанола. Выделены образцы с содержанием сахаров ниже 10 % для использования в селекции на кормовые цели.

В комбинациях Дебют х К-334, Дебют х К-9982, К-3868 х К-334, К-3868 х К-9982 наблюдается неполное доминирование меньших значений признака. Родительские формы различаются по двум парам генов, сила гена составила 1 %. У гибрида К-9982 х К-3868 среднее значение признака составило 14,0 %, родительских форм – 15,1 и 13,6 % соответственно. Степень доминирования составила -0,7. Наблюдалась положительная трансгрессия. Выделены растения с высоким содержанием сахаров в соке стеблей (более 16 %) для дальнейшей селекционной работы.

Примером тригибридного расщепления с доминированием большего значения является комбинация А-105/3 х К-334. Содержание сахаров в соке стеблей у гибрида составило 15,0 %, что близко к значению большего родителя К-334 (15,5 %). Это свидетельствует о доминировании больших значений ( $h^2=0,78$ ). Разница между родительскими формами составила 3,1 %, сила гена – 1 %.

В комбинациях низкосахаристые (А-105/3) х среднесахаристые (Дебют, К-3868), высокосахаристые (К-9982, К-334) х среднесахаристые – доминируют значения 14-15 % содержания сахаров в соке стеблей, при больших различиях в комбинациях низко- х высокосахаристые доминирует 15 %. Для получения сортов с высоким содержанием сахаров в соке стеблей необходимо использовать образцы с наибольшими различиями по данному признаку.

Содержание сырого протеина. У гибридов  $F_1$  гипотетический гетерозис наблюдался в 16 комбинациях скрещивания. В среднем степень гетерозиса была не более 3 %, однако следует выделить 2 комбинации – Сахарсил х Редколистный и К-446 х Зерноградское 1 с гетерозисом 25-30 %.

У гибридов  $F_2$  по содержанию протеина в зеленой массе наблюдались различные типы наследования: от доминирования большего до доминирования меньшего значения.

В реципрокных комбинациях Редколистный х Амазонит, Северное 44 х К-446 родительские формы имели близкие значения. Исходные формы имеют значения признака 7,1 и 7,3 % соответственно, гибрид – 7,4 %. Генетический анализ с помощью программы Полиген А показал, что исходные формы генетически на различаются. Растения данной комбинации обладают наиболее высоким содержанием протеина в зеленой массе, имеются растения со значением признака до 11 %.

В реципрокных комбинациях Зерноградское 1 х Сахарсил (низко- х низкобелковый), Северное 44 х Редколистный, Северное 44 х Амазонит, К-446 х Редколистный, К-446 х Амазонит (средне х высокобелковые)

наблюдалось доминирование больших значений. Так, в комбинации Зерноградское 1 х Сахарсил родительские формы различаются на 0,8 % (4,3 и 5,0 %), среднее значение гибрида составило 5,3 %. Степень доминирования ( $h_r=1,1$ ) указывает на доминирование больших значений. На долю большей родительской формы Сахарсил приходится  $\frac{1}{4}$  частот гибрида, что говорит о различии исходных форм по 1 паре генов.

В реципрочных комбинациях Сахарсил х Редколистный, Сахарсил х Амазонит (низко- х высокобелковый) наблюдается неполное доминирование большего значения. Содержание протеина в зеленой массе у сорта Сахарсил составило 5,0 %, у сорта Редколистный – 7,1 %, у гибрида, полученного от их скрещивания – 6,0 %. В данной комбинации наблюдается широкий размах варьирования значений гибрида от 3,0 до 10,0 %. Степень доминирования составила -0,3. Родительские формы различаются по 1 паре генов. На долю большего родителя (Редколистный) приходится  $\frac{1}{4}$  частот гибрида, расщепление 3:1, т.е. наблюдается доминирование меньших значений. Сила гена составила 2,1.

В реципрочных комбинациях Зерноградское 1 х Амазонит, Зерноградское 1 х Редколистный (низко- х высокобелковый) наблюдается частичное доминирование меньшего значения. У гибрида Зерноградское 1 х Амазонит среднее содержание протеина в зеленой массе составило 5,2 %, большей родительской формы Амазонит – 7,3 %, меньшей – 4,3 %. Степень доминирования равна -0,6. Различия между родительскими формами составили 2 пары генов. Наблюдается расщепление 9:3:3:1, на долю большей родительской формы (Амазонит) приходится  $\frac{1}{16}$  частот гибрида. Сила гена составила 1,5 %.

В комбинациях с участием низкбелковых сортов (Зерноградское 1, Сахарсил) наблюдаются различные типы наследования, но средняя величина признака у гибрида не превышает 6,0 % (за исключением реципрочных комбинаций Сахарсил х Редколистный, Сахарсил х Амазонит). В комбинациях средне- (Северное 44, К-446) х высокобелковые наблюдается доминирование больших значений признака, гибриды имеют среднее значение 6,6-6,8 % (таблица 1). То есть для получения высокобелковых сортов в гибридизацию следует вовлекать образцы с высокими показателями этого признака.

Таблица 1 – Средние значения и типы наследования содержания протеина в зеленой массе у гибридов и родительских форм

| ♂ \ ♀                  | Зерноградское 1, 4,3 % | Сахарсил, 5,0 %   | Северное 44, 5,8 % | К-446, 6,0 %        | Редколистный, 7,1 % | Амазонит, 7,3 %     |
|------------------------|------------------------|-------------------|--------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Зерноградское 1, 4,3 % | -                      | 5,3, ДБ<br>hp=1,1 | 5,0, ОД<br>hp=0    | 5,2, ДБ<br>hp=0,3   | 5,0, ДМ<br>hp= -0,5 | 5,2, ДМ<br>hp= -0,6 |
| Сахарсил, 5,0 %        |                        | -                 | 5,0, ДМ<br>hp= -1  | 5,1, ДМ<br>hp= -0,8 | 5,8, ДМ<br>hp= -0,3 | 6,0, ДМ<br>hp= -0,2 |
| Северное 44, 5,8 %     |                        |                   | -                  | 5,8, нет различий   | 6,7, ДБ<br>hp=0,4   | 6,9, ДБ<br>hp=0,6   |
| К-446, 6,0 %           |                        |                   |                    | -                   | 6,8, ДБ<br>hp=0,5   | 6,6, ДБ<br>hp=0,3   |
| Редколистный, 7,1 %    |                        |                   |                    |                     | -                   | 7,4, нет различий   |
| Амазонит, 7,3 %        |                        |                   |                    |                     |                     | -                   |

Примечание – ДБ – доминирование большего значения, ОД – отсутствие доминирования, ДМ – доминирование меньшего значения

В комбинациях, в которых родители имеют большие фенотипические различия, гибриды имеют широкий размах варьирования, что позволяет выделить трангрессивные формы, превосходящие по качеству лучших родителей. Некоторые трангрессивные формы в F<sub>3</sub> сохранили высокое содержание протеина в зеленой массе: Редколистный х Амазонит (№50) – 8,1 %, Редколистный х Сахарсил (№8) – 7,9 %, Зерноградское 1 х Амазонит (№64) – 6,8 %, Редколистный х Северное 44 (№13) – 7,2 %.

Выводы:

Наследование содержания сахаров в соке стеблей сорго, в основном, носит доминантный характер. Для получения сортов с высоким значением данного признака в гибридизацию необходимо включать образцы с наибольшими различиями по данному признаку. Родительские формы различались по 1-3 парам генов, сила гена составляет 1 % сахаров в соке стеблей сорго сахарного. Для дальнейшей работы на увеличение содержания сахаров в соке стеблей выделены трангрессивные формы из комбинаций А-105/3 х Дебют, А-105/3 х К-334.

По содержанию сырого протеина в зеленой массе сорго сахарного различия между родительскими формами составляли 1-2 пары генов. Сила гена – 0,8-2,1 %. В комбинациях с участием низкобелковых сортов, имеющих 4,0-5,0 % протеина в соке стеблей, доминируют значения признака 5,0-6,0 %. При скрещивании средне- (5,1-6,0 % протеина в соке стеблей) с высокобелковыми (более 7,0 % протеина) сортами наблюдается доминирование больших значений признака, гибриды имеют среднее значение 6,6-6,8 %. Для получения высокобелковых сортов в качестве исходных форм необходимо использовать образцы с высокими

показателями этого признака. Для дальнейшей селекционной работы выделены трансгрессивные формы, которые в F<sub>3</sub> сохранили высокое содержание протеина в зеленой массе: Редколистный х Амазонит – 8,1 %, Редколистный х Сахарсил – 7,9 %, Зерноградское 1 х Амазонит – 6,8 %, Редколистный х Северное 44 – 7,2 %.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Получение глюкозо-фруктозных сиропов из сахарного сорго / А. Д. Гребенкин [и др.] // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2006. – № 9. – С. 26-28.
2. Ковтунова, Н. А. Использование сорго сахарного в качестве питательных веществ для человека (обзор литературы) / Н. А. Ковтунова, В. В. Ковтунов // Зерновое хозяйство России. – 2019. – №3 (63). – С. 3-9. DOI: 10.31367/2079-8725-2019-63-3-3-9.
3. Комплексное использование сока стеблей сахарного сорго для получения этанола и кормовой белково-аминокислотной добавки / Л. В. Римарева [и др.] // Пищевая промышленность. – 2021. – № 5. – С. 56-61. DOI: 10.52653/PPI.2021.5.5.013
4. Потенциал продуктивности сорго сахарного в южной лесостепи Западной Сибири / В. С. Бойко [и др.] // Кормопроизводство. – 2022. – № 4. – С. 29-33
5. Изучение фракционного состава сахаров в соке стебля сахарного сорго в засушливых условиях России / О. П. Кибальник [и др.] // Journal of Agriculture and Environment. – 2022. – № 1(21). DOI: 10.23649/jae.2022.1.21.15
6. Экологическое испытание сортов сахарного сорго в засушливых условиях России и Таджикистана / О. П. Кибальник [и др.] // Аграрная Россия. – 2024. – № 9. – С. 23-26. DOI: 10.30906/1999-5636-2024-9-23-26.
7. Kasegn M.M., Simachew A., Redda Y.T. Evaluation of sugar content and bioethanol production of Ethiopian local varieties “Nech Tinkish” and “Hawaye” sweet sorghum (*Sorghum bicolor* (L.)). *Biotechnol Environ*/ 2024. №1, 2. DOI: 10.1186/s44314-024-00001-6
8. Ritter K.B., Jordan D.R., Chapman S.C., Godwin I.D., Mace E.S., McIntyre C.L. Identification of QTL for sugar-related traits in a sweet x grain sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) recombinant inbred population // *Molecular Breeding*. 2008. №22(3). Pp. 367-384. DOI: 10.1007/s11032-008-9182-6
9. Ковтунова, Н. А. Использование сорго сахарного в качестве источника питательных веществ для человека (обзор литературы) / Н. А. Ковтунова, В. В. Ковтунов // Зерновое хозяйство России. – 2019. – №3(3). – С. 3-9. DOI: 10.31367/2079-8725-2019-63-3-3-9.
10. Ritter K.B., Jordan D.R., Chapman S.C., Godwin I.D., Mace E.S., McIntyre C.L. Identification of QTL for sugar-related traits in a sweet x grain sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) recombinant inbred population // *Molecular Breeding*. 2008. №22(3). Pp. 367-384. DOI: 10.1007/s11032-008-9182-6
11. Время цвести сорго / А. З. Большаков [и др.]. – Ростов-н/Д: ЗАО «Ростиздат», 2008. – 60 с.
12. Длина метелки у гибридов F1-F2 сорго зернового в сравнении с родительскими формами / В. В. Ковтунов [и др.] // Зерновое хозяйство России. – 2025. – Т. 17, № 5. – С. 13-19. DOI 10.31367/2079-8725-2025-100-5-13-19.
13. Наследование высоты растений в комбинациях F1-F2 сорго зернового, полученных между родительскими формами, далекими по эколого-географическому происхождению / В. В. Ковтунов [и др.] // Зерновое хозяйство России. – 2025. – Т. 17, № 2. – С. 5-12. DOI 10.31367/2079-8725-2025-97-2-5-12.
14. Костылев, П. И. Наследование содержания белка в зерне риса (обзор) / П. И. Костылев, Е. В. Краснова, Е. В. Дубина // Зерновое хозяйство России. – 2025. – Т. 17, № 1. – С. 5-14. DOI 10.31367/2079-8725-2025-96-1-5-14.
15. Методика государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур. Выпуск 2. – М.: Колос. 1985. 194 с.

16. Ермаков, А. И. Методы биохимического исследования растений / А. И. Ермаков. – Л.: Агропромиздат. Ленингр. отд., 1987. – 430 с.
17. Мережко, А. Ф. Система генетического изучения исходного материала для селекции растений / А. Ф. Мережко. – Л.: ВИР, 1984. – 70 с.

УДК 631.81.095.337(476)

## МИКРОБИОЛОГИЧЕСКИЕ ПРЕПАРАТЫ – НОВЫЕ РЕШЕНИЯ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ

**Коженевский О. Ч., Семенчук М. С., Коженевский Э. О.**

УО «Гродненский государственный аграрный университет»

г. Гродно, Республика Беларусь

**Аннотация.** Микроорганизмы являются важным элементом в моделировании устойчивого сельского хозяйства, способствуя круговороту питательных веществ, росту растений и сохранению и повышению почвенного плодородия. В данном обзоре рассматриваются вопросы многомерного применения микробных препаратов в современном сельскохозяйственном производстве с акцентом на их потенциал в поддержании здоровья почвы, повышении продуктивности сельскохозяйственных культур и обеспечении экологической устойчивости.

**Summary.** Soil microorganisms are key enablers of agricultural frontiers, contributing to nutrient cycling, plant growth, and maintaining and enhancing soil fertility. This review examines the multifaceted application of microbial agents in modern agricultural production, emphasizing their potential to support soil health, enhance crop productivity, and ensure sustainability.

**Ключевые слова:** микробиом, ризосфера, биоинокулянты, почвенное плодородие, стрессоустойчивость, биостимуляторы.

**Key words:** microbiome, rhizosphere, bioinoculants, soil fertility, stress resistance, biostimulants.

Одной из насущных проблем, стоящих перед современным сельскохозяйственным производством, является достижение устойчивого производства сельскохозяйственной продукции для обеспечения продовольственной безопасности. Изменение климата только усугубило воздействие таких экологических стрессов, как засуха, неравномерное распределение осадков, экстремальные температуры и деградация почв на мировое производство продовольствия [1]. Кроме того, современная сельскохозяйственная практика использования удобрений и химических мелиорантов как основного фактора повышения урожайности привела к разрушительным экологическим последствиям для здоровья человека и плодородия почвы [2]. Несбалансированное использование удобрений и не рациональное обращение с растительными остатками и органикой, неправильная стратегия управления питательными веществами приводит к