

Значение серы в питании растений

Р. Нортон, Р. Миккелсен и Т. Дженсен

Сера – важный элемент питания растений, однако ее содержание в растениях ниже по сравнению с другими макроэлементами. Растения усваивают серу в виде сульфат-иона. В дальнейшем сера восстанавливается и входит в состав незаменимых аминокислот. Сера участвует в ряде важных метаболических процессов в растениях, включая синтез белка. Во многих регионах мира следует уделять большее внимание сбалансированному питанию сельскохозяйственных культур серой.

Сера – важный макроэлемент, необходимый растительным и животным организмам. Она требуется для протекания важных метаболических процессов. В растениях сульфатная сера (SO_4^{2-}) восстанавливается¹ и входит в состав органических соединений, однако животным организмам для удовлетворения потребности в сере необходимо поступление с пищей серосодержащих аминокислот (метионина и цистеина).

В последние годы потребности сельскохозяйственных культур в сере стало уделяться большее внимание, поскольку во многих системах земледелия снизилось поступление серы в почву по сравнению с предыдущими периодами. Применение серосодержащих удобрений становится актуальным в результате роста урожайности сельскохозяйственных культур, изменения структуры севооборотов, сокращения объемов внесения органических удобрений, а также снижения использования удобрений и пестицидов, содержащих серу.

В почве сера в основном находится в составе органического вещества. Сульфаты легко растворимы в воде и содержатся в почвенном растворе большинства типов почв. Это основной источник серы для растений. Сульфат-ионы активно поглощаются корнями, особенно в зоне корневых волосков, и поступают в растительные клетки с помощью белков-переносчиков сульфат-ионов. Внутри растения сульфат-ионы перемещаются с транспирационным током, а затем аккумулируются в вакуолях растительных клеток либо участвуют в ряде биохимических реакций. Кроме того, листья растений поглощают диоксид серы (SO_2) из атмосферы, но обычно в количествах, не превышающих 1 кг S/га/год. Листья растений могут выделять сероводород (H_2S), и, предположительно, это служит механизмом детоксикации при воздействии высоких концентраций SO_2 .

Большая часть сульфатной серы, поглощенной корнями, восстанавливается и входит в состав цистеина в хлоропластах листьев. Цистеин – первичное соединение, из которого в растениях в дальнейшем образуется большая часть других серосодержащих органических соединений. Вышеуказанный процесс начинается с образования аденозинфосфосульфата, и, в конечном итоге, синтезируются различные серосодержащие органические соединения (рис. 1). Восстановление сульфатов – процесс, требующий значительных затрат энергии. Другие важные серосо-



Недостаток серы у пшеницы. На отдельном фото сравниваются листья двух растений – достаточно обеспеченного серой (справа) и испытывающего ее недостаток (слева). (Sharma и Kumar, 2011).



Рис. 1. Схематичное представление процесса ассимиляции и восстановления сульфатов в растениях (адаптировано из: Hawkesford, 2012)

держащие аминокислоты – это цистин (соединенные между собой² две молекулы цистеина) и метионин (рис. 2). В меньших количествах сера входит в состав таких важных органических соединений, как коэнзим А, биотин, тиамин, глутатион, а также сульфолипиды.

Органические соединения, полученные в процессе превращения сульфатов, транспортируются по флоэме к местам активного синтеза белка (верхушки корней и стеблей, плоды, зерновки) и в дальнейшем становятся, по большей части, малоподвижными в растении. Внешние признаки недостатка серы в первую очередь появляются на молодых тканях

¹ До сульфидных и дисульфидных групп (здесь и далее – примечания переводчика).

² Посредством дисульфидной связи.

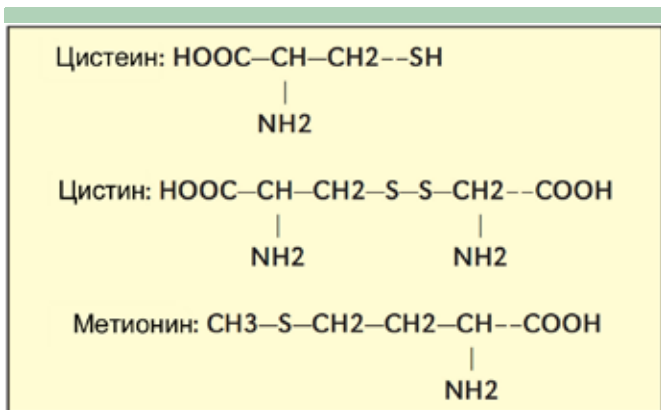


Рис. 2. Три незаменимые аминокислоты, содержащие серу.

Таблица 1. Вынос серы с урожаем основной продукции¹ у ряда сельскохозяйственных культур. Приведены данные при влажности зерна 10%.

Зерновые	S, кг/т	Масличные	S, кг/т
Пшеница	1.4	Рапс	5.0
Ячмень	1.2	Подсолнечник	1.7
Кукуруза	1.1	Хлопчатник	2.9
Рис	0.9	Лен	2.0
Зернобобовые	S, кг/т	Другие культуры	S, кг/т
Соя	3.5	Сахарный тростник (сырая масса)	0.26
Нут	1.8	Люцерна, сено (13% влажность)	2.6
Горох	2.1	Силос из злаковых трав (сырая масса)	2.2
Чечевица	1.4	Хмель (сухая масса)	3.6

¹Побочная продукция сельскохозяйственных культур может содержать столько же серы или даже больше, чем основная продукция.
Источник: National Land and Water Resources Audit, 2001.

растений – листья и жилки приобретают бледно-зеленую и желтую окраску. Хлороз, наблюдаемый при недостатке серы, напоминает недостаток азота. Однако недостаток азота сначала проявляется на старых листьях, поскольку для азота характерна высокая подвижность в растении. Подкормка серосодержащими удобрениями, проведенная после выявления первых признаков недостатка серы, может не приводить к полному восстановлению роста у ряда сельскохозяйственных культур.

Существует большое количество вторичных серосодержащих соединений, выполняющих важные биохимические функции у отдельных видов растений. Некоторые сельскохозяйственные культуры (например, из рода *Brassica*: рапс, горчица) образуют глюкозинолаты и имеют сравнительно высокую потребность в сере. Растения из рода *Allium* (например, чеснок и лук) продуцируют аллиины, в составе которых может находиться более 80% от общего содержания серы в растении. Характерные для лука и чеснока вкус и запах, обусловленные вышеуказанными летучими серосодержащими соединениями, усиливаются при выращивании растений на почвах с высоким содержанием подвижной серы. С этими и другими серосодержащими соединениями связана устойчивость растений к повреждению вредителями, а также к стрессам, вызванным неблагоприятными внешними факторами.

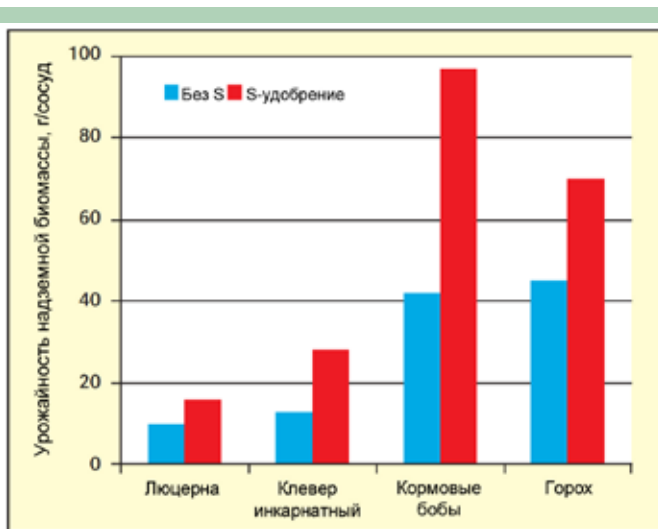


Рис. 3. Повышение урожайности люцерны, клевера инкарнатного, кормовых бобов и гороха при достаточной обеспеченности растений серой (адаптировано из: Lange, 1998).

Потребность растений в сере

Потребность в сере сильно различается у разных сельскохозяйственных культур. Содержание серы в абсолютно сухом веществе растений обычно составляет от 0.1 до 1.0% (в расчете на элемент). Самая высокая потребность в сере характерна, как правило, для растений из рода *Brassica* (таких, как кочанная капуста, брокколи и рапс), затем следуют бобовые культуры и злаки.

Потребность растений в сере меняется в течение вегетационного периода. Например, максимальная потребность в сере у рапса наблюдается в фазу цветения и семяобразования. Поглощение серы кукурузой протекает с фактически постоянной скоростью в течение всего вегетационного периода. При этом в зерне аккумулируется более 50% накопленной растениями серы. Растения пшеницы между фазами цветения и созревания могут терять³ до половины накопленной серы. Необходимо определять потребность в сере каждой отдельной сельскохозяйственной культуры (рис. 3).

Вынос серы с урожаем основной продукции, как правило, находится в диапазоне от 10 до 30 кг S/га и зависит от возделываемой культуры, а также от уровня урожайности (табл. 1), однако для некоторых видов растений из рода *Brassica* поглощение серы может достигать 70 кг S/га.

Качество сельскохозяйственной продукции

При возделывании сельскохозяйственных культур на низко обеспеченных подвижной серой почвах может снижаться урожайность и ухудшаться качество продукции. Обеспеченность растений серой – основной фактор получения качественного растительного белка. У ряда культур от уровня питания серой зависит структура, а также функционирование ферментов и белков в тканях листьев и семенах. Например, форма белковых молекул и функциональные

³ В результате вымывания из растений.

свойства белка зерновых культур зависят от количеств образующегося цистеина. В связи с этим хлеб, выпеченный из зерна пшеницы с низким содержанием серы, не поднимается, в результате чего получают плотные буханки неправильной формы.

Взаимодействие серы с другими элементами питания

Как азот, так и сера играют важную роль в синтезе белка, поэтому между питанием растений азотом и серой существует тесная взаимосвязь. Зачастую одновременный недостаток этих двух элементов питания лимитирует урожайность. Установлено, что в составе белка на 15 частей азота приходится одна часть серы (то есть соотношение N:S = 15:1). Однако данное соотношение характерно не для всех сельскохозяйственных культур. Например, соотношение N:S в зерне пшеницы составляет примерно 16:1, а в семенах рапса – около 6:1.

В целом считается, что такие сельскохозяйственные культуры, как пшеница, сахарная свекла и арахис имеют низкую потребность в сере. Существует множество примеров, показывающих, что для получения запланированного урожая необходимо достаточное питание растений как азотом, так и серой (рис. 4). При недостатке серы у бобовых культур

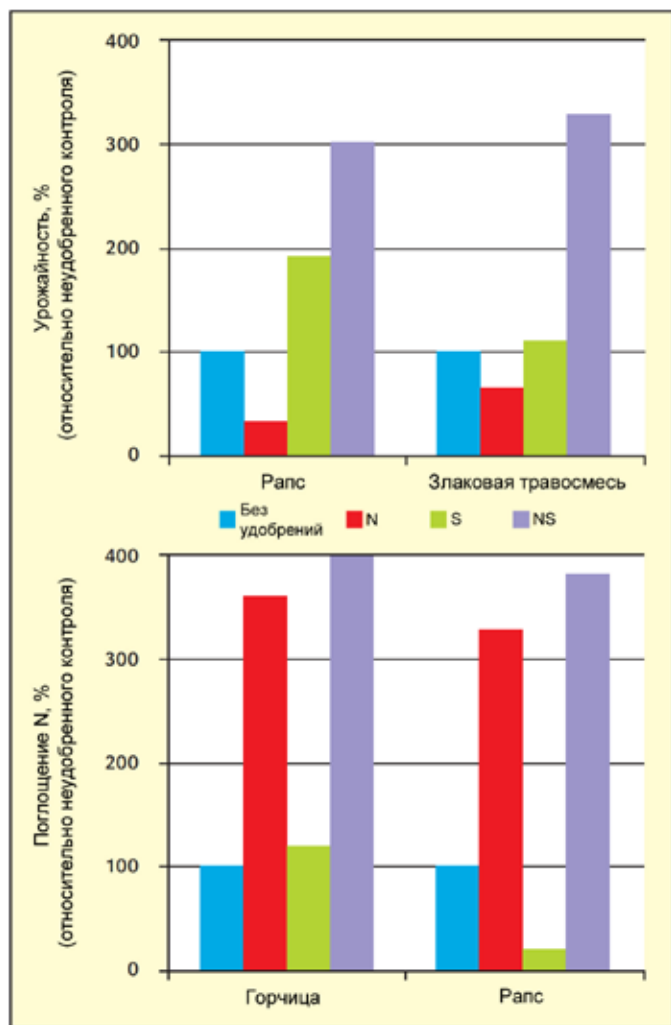


Рис. 4. Влияние совместного и раздельного внесения азотных и серных удобрений на урожайность (вверху) и поглощение азота растениями (внизу) (Aulakh и Malhi, 2004).

уменьшается количество клубеньков на корнях растений и, соответственно, снижается интенсивность фиксации атмосферного азота.

При проведении растительной диагностики не стоит полностью полагаться на соотношение N:S в растениях, так как данный показатель может вводить в заблуждение. Например, требуемое соотношение N:S может быть получено и при низком содержании в растениях обоих элементов питания. Кроме того, избыток азота может быть неправильно истолкован, как недостаток серы и наоборот.

Недостаточное питание растений серой не только снижает урожайность и качество продукции, но и уменьшает эффективность использования азота из удобрений растениями. Таким образом, повышается риск потерь азота, что неблагоприятно сказывается на состоянии окружающей среды. Как показали проведенные исследования, применение серосодержащих удобрений на пастбищах, почвы которых недостаточно обеспечены подвижной серой, способствует росту урожайности и повышает эффективность использования азота из удобрений растениями. Потери азота из почвы при этом снижаются. Исходя из тесной взаимосвязи между питанием растений азотом и серой, Шнаг и Ханеклаус (Schnug и Haneklaus, 2005) допустили, что одна единица серы, требуемая для устранения ее недостатка у растений, эквивалента 15-ти единицами потенциальных потерь азота. Согласно проведенным расчетам, недостаток серы в Германии может приводить к ежегодным потерям 300 млн. кг азота (или 10% от общего объема потребляемых в стране азотных удобрений).

Как известно, применение высоких доз серных удобрений вызывает недостаток молибдена у растений. Это происходит из-за антагонизма между сульфат-ионами и молибдат-ионами (MoO_4^{2-}) в процессе поглощения корневой системой растений, так как указанные анионы конкурируют за специфические участки белков-переносчиков, локализованных в клеточных мембранах корня. В тоже время, молибден входит в состав фермента, регулирующего образование органических серосодержащих соединений. По вышеуказанной причине также наблюдается антагонизм между серой и селеном (особенно селенат-ионами – SeO_4^{2-}). Применение серосодержащих удобрений на почвах пастбищ с достаточным содержанием подвижного селена может снижать содержание селена в травах, что негативно сказывается на удовлетворении потребности животных в селене. Показано, что использование сульфатной формы серы – это эффективный способ снижения поглощения растениями элементов-поллютантов на загрязненных почвах. Однако использование элементарной серы может усиливать поглощение тяжелых металлов (Cu, Mn, Zn, Fe и Ni) растениями в результате подкисления ризосферы в процессе окисления серы.

Система применения серосодержащих удобрений, основанная на Концепции «4-х правил»

Принципы Концепции «4-х правил» применения удобрений (оптимизация форм, доз, сроков и

способов внесения удобрений) применимы ко всем элементам питания растений. Сера может вноситься в разных формах, включая органические удобрения (навоз), и следование вышеуказанной концепции помогает оптимизировать питание растений серой. Примером использования Концепции «4-х правил» применения удобрений может служить внесение сульфата аммония [формы] обычно в рядки вместе с семенами [способы] при посеве мелкосемянных культур [сроки]. Однако количество удобрения [дозы] должно быть небольшим для снижения риска аммиачного отравления растений, особенно при широкорядном посеве, а также при возделывании растений в засушливых условиях и на песчаных почвах. Ниже более подробно обсуждается использование Концепции «4-х правил» применения удобрений для оптимизации питания растений серой.

Формы. Серосодержащие удобрения – это либо водорастворимые сульфатные формы, либо такие формы серы, которые в дальнейшем преобразуются в сульфаты. Необходимо принимать в расчет время, требуемое для преобразования нерастворимой формы серы в доступную для растений сульфатную форму. Для приготовления тукосмесей и ЖКУ, а также для прямого внесения имеется целый ряд хороших твердых и жидких удобрений, содержащих различные формы серы. Комбинирование водорастворимых сульфатных форм и элементарной серы может иметь определенное преимущество, поскольку обеспечивает как быстрое, так и пролонгированное действие серосодержащих удобрений. В данном случае размер частиц элементарной серы – основной фактор, так как меньшие по размеру частицы быстрее окисляются до сульфатов, чем крупные.

Сроки. В сульфатных формах удобрений сера находится в легкодоступной растениям форме, и такие удобрения можно применять в период наибольшего потребления серы растениями. Однако элементарную серу следует вносить в почву заблаговременно, чтобы было достаточно времени для окисления серы микроорганизмами. В регионах с низкими зимними температурами элементарная сера вносится в почву за несколько месяцев вперед до посева растений. При повышении температуры почвы процесс образования сульфатов за счет минерализации гумуса и растительных остатков протекает быстрее, и в результате данного процесса в течение вегетационного периода могут высвободиться значительные количества доступной растениям серы. Для питания большинства растений требуется постоянное поступление сульфатов из почвы.

Способы. Размещение сульфатных форм удобрений лентой рядом с рядком семян – весьма эффективный способ внесения удобрений под однолетние культуры. Однако следует избегать высокой концентрации сульфат-ионов в непосредственной близости от проростков для того, чтобы не допустить осмотического стресса у корневой системы растений. Сульфаты довольно подвижны в почве и передвигаются с током влаги по корнеобитаемой зоне. Наиболее эффективный способ внесения элементарной серы – взброс под вспашку. На затопляемых

почвах элементарную серу лучше всего оставлять на поверхности почвы для того, чтобы сера окислялась до сульфата в тонком аэробном слое на границе раздела почва – вода.

Дозы. Дозы внесения серосодержащих удобрений необходимо устанавливать с учетом потребности сельскохозяйственных культур в сере, физико-химических свойств почвы (гранулометрический состав, содержание гумуса) и климатических условий (температурный режим, количество осадков). Система применения серосодержащих удобрений обычно строится с учетом севооборота. Например, в севообороте рапс – ячмень – пшеница⁴ на Западе Канады высокая потребность рапса в сере может быть удовлетворена за счет внесения серосодержащих удобрений под каждую культуру севооборота.

Для получения устойчивых урожаев сельскохозяйственных культур и надлежащего качества продукции требуется достаточное питание растений серой. При недостатке серы ухудшается синтез белка и снижается эффективность использования азота из удобрений растениями. Кроме того, снижается интенсивность азотфиксации у бобовых культур. Использование Концепции «4-х правил» применения удобрений позволяет оптимизировать питание растений серой.

Д-р Нортон – Региональный директор МИПР по Австралии и Новой Зеландии, e-mail: rnorton@ipni.net;

Д-р Миккелсен – Региональный директор МИПР по Западу Северной Америки, e-mail: rmikkelsen@ipni.net;

Д-р Дженсен – Региональный директор МИПР по Северу Великих Равнин; e-mail: tjensen@ipni.net.

Литература

- Aulakh, M.S. and S.S. Malhi. 2004. In A.R. Mosier, J.K. Syers, and J.R. Freney (eds.) *Agriculture and the nitrogen cycle: Assessing the impacts of fertilizer use on Food production and the environment*. pp. 181-191. Scope no. 65. Island Press, Washington, USA.
- Hawkesford M., 2012. In L.J. De Kok et al. (eds.) *Sulfur metabolism in plants: Mechanisms and application to food security, and responses to climate change*. Proc. Int Plant S Workshop, Springer Netherlands, pp.11-24.
- Lange, A. 1998. Cited In S. Haneklaus, E. Bloem, and E. Schnug. 2007. In M.J. Hawkesford (ed.) *Sulfur in Plants: An ecological perspective*. Springer, pp.17-59.
- National Land and Water Resources Audit. 2001. *Commonwealth of Australia, Canberra*. p.290.
- Schnug, E. and S. Haneklaus 2005. In L.J. de Kok and E. Schnug (eds.) *Proc. First Sino-German workshop on aspects of sulfur nutrition of plants*.
- Braunschweig, Federal Agricultural Research Centre (FAL), p.131.
- Sharma, M.J. and P. Kumar. 2011. IPNI, Norcross, GA, USA and CIMMYT, El Batan, Mexico. p. 50.

Перевод с английского и пояснения: В.В. Носов.

⁴ Яровые культуры (припосевное внесение S-удобрений).