

# Сера в почвах и серосодержащие удобрения

Р. Миккельсен и Р. Нортон

Постоянное поступление серы (S) в растения очень важно для их нормального роста и развития. Органическое вещество – основной источник серы в почве. Сера, входящая в состав органических соединений, сначала должна быть окислена до сульфатной – водорастворимой формы, и после этого становится доступной растениям. Основная часть серосодержащих удобрений (элементарная сера) получается в процессе очистки разных видов ископаемого топлива. Существует большое количество хороших водорастворимых и медленнодействующих серосодержащих удобрений, которые при оптимальных дозах, сроках и способах внесения способны удовлетворить потребности растений в сере.

Сера – широко распространенный в природе элемент, который имеет важное значение для функционирования как растительных, так и животных организмов. Она аккумулируется в вулканически активных областях, и в мире имеются крупные месторождения элементарной серы. До сравнительно недавнего времени серным сырьем служили вулканическая сера и пирит ( $\text{Fe}_2\text{S}_3$ ). В 20-м веке Г. Фраш разработал способ добычи серы путем плавления ее подземных залежей, что расширило использование серы в сельском хозяйстве и промышленности.

Углеводородные полезные ископаемые содержат серу, поскольку сера входила в состав органических соединений, из которых сформировались данные ископаемые. Серу извлекают в качестве побочного продукта из таких ископаемых видов топлива, как нефть, газ, битуминозные пески и уголь. Очистка ископаемых видов топлива от серы снижает выбросы серы в атмосферу при их сжигании. В настоящее время

элементарная сера получается при переработке и очистке нефти и газа. Сера поставляется на мировой рынок в твердом или расплавленном виде.

Сера – важный продукт для химической промышленности, особенно в форме серной кислоты. Промышленность по производству фосфорных удобрений – крупнейший потребитель серы. Мировые поставки и цены на серу тесно связаны с рынком фосфорных удобрений.

## Сера в почве

### Органические соединения серы

В почве сера в основном находится в составе органических соединений, представленных растительными остатками и гумусом (до 98% от валового содержания серы в почве). Существует целый ряд комплексных органических соединений серы (например, сульфатэфиры и соединения с C-S-связями), однако корни растений не могут поглощать серу в данной форме. Сера становится доступной растениям только в сульфатной форме – в процессе минерализации органических соединений, протекающем с участием микроорганизмов.

В результате деятельности микроорганизмов в почве постоянно протекают процессы трансформации серы – превращения между органическими и неорганическими соединениями серы. Сульфатная форма серы образуется в качестве побочного продукта в процессе минерализации органического вещества почвы, протекающем с участием микроорганизмов. Процесс иммобилизации представляет собой включение сульфатной формы серы в микробную биомассу почвы.

Наиболее простым способом для определения того, протекает ли в почве чистая (нетто) минерализация или чистая иммобилизация серы, служит анализ соотношения углерода к сере. Процесс



высвобождения серы – перехода в сульфатную форму в основном протекает при соотношении C:S в органическом веществе менее, чем 200:1; а иммобилизация серы обычно происходит в тех случаях, когда соотношение C:S превышает 400:1. Определить направленность процессов мобилизации-иммобилизации серы в почве гораздо сложнее, если соотношение C:S находится в диапазоне между вышеуказанными значениями.

Процесс минерализации органического вещества почвы и высвобождения серы чаще всего протекает слишком медленно для того, чтобы удовлетворить потребности высокоурожайных сортов сельскохозяйственных культур в сере. Возникающий недостаток серы должен устраняться за счет внесения органических или минеральных удобрений, содержащих серу.

### **Неорганические соединения серы**

Только небольшая часть от валового содержания серы в почве находится в неорганической форме. Сульфатная сера – наиболее распространенная форма среди неорганических соединений серы в почве. Сульфаты входят в состав почвенного раствора, удерживаются поверхностью минеральных частиц почвы, а также находятся в составе таких минералов, как гипс. В затопляемых и слабодренированных почвах могут образовываться минералы группы сульфидов (например, пирит).

Большинство сульфатов хорошо растворимо в воде и передвигается с током почвенной влаги. Они слабо удерживаются (адсорбируются) глинистыми и другими почвенными минералами, особенно при низких значениях pH почвенного раствора. Адсорбированные почвой сульфаты представляют собой важный резерв серы для питания растений, особенно в нижних горизонтах почвенного профиля (глубже 30 см), имеющих кислую реакцию среды. Специфическая адсорбция сульфат-ионов характерна для некоторых типов почв, особенно имеющих высокое содержание свободных оксидов и гидроксидов железа и алюминия. Неспецифическая адсорбция сульфат-ионов почвой ослабляется при известковании и внесении фосфорных удобрений.

### **Вымывание сульфатов из почвы**

Потери серы из почвы в основном происходят за счет вымывания сульфат-ионов из корнеобитаемой зоны при выпадении большого количества осадков и при орошении. Размеры потерь серы от вымывания зависят от почвенно-климатических условий – ежегодные потери обычно составляют от 5 до 60 кг S/га (4-54 фунтов/акр). По сравнению с незасеянной почвой под хорошо развитыми посевами сельскохозяйственных культур вымывание сульфат-ионов, как правило, идет менее интенсивно. Для снижения потерь азота из почвы, связанных с вымыванием нитратов, обычно выращиваются почвопокровные культуры. Возделывание таких культур также помогает снизить и риск вымывания серы, поскольку она поглощается из почвы растениями и затем возвращается с растительными остатками.

### **Газообразные потери серы из почвы**

В анаэробных условиях сульфаты восстанавливаются

почвенными бактериями до целого ряда соединений, которые по большей части не могут поглощаться растениями. Указанные соединения включают сероуглерод, карбонилсульфид, диметилдисульфид, метилмеркаптан и сероводород – летучий газ. Обычно образуются сульфиды двухвалентного железа – минералы группы пирита.

### **Сера в атмосфере**

Диоксид серы (SO<sub>2</sub>) входит в группу газов, обладающих высокой химической активностью. Они выделяются в атмосферу при сгорании ископаемых видов топлива. Выбросы SO<sub>2</sub> регулируются правительственными постановлениями, поскольку загрязнение атмосферы диоксидом серы приводит к повреждению органов дыхания и вызывает кислотные осадки. Большая часть серы, содержащейся в ископаемых видах топлива (особенно в форме сероводорода), удаляется до их сжигания. Это основной источник получения элементарной серы.

### **Экологические аспекты**

Содержание сульфат-ионов в питьевой воде не регулируется правительственными постановлениями, однако, согласно рекомендациям Агентства по охране окружающей среды США, данный показатель не должен превышать 250 мг/л из-за ухудшения вкуса и запаха питьевой воды при более высоких концентрациях сульфат-ионов. Содержание сероводорода в воде из артезианских скважин в количестве лишь нескольких мг/л ухудшает вкус и запах воды. Концентрация сульфат-ионов в природных поверхностных водах редко служит лимитирующим фактором, ограничивающим развитие водных организмов. В данном случае возможно косвенное влияние<sup>1</sup>.

## **Сера – элемент питания растений**

Отчуждение серы с урожаями сельскохозяйственных культур без соответствующего возмещения за счет внесения удобрений постепенно ведет к истощению почвенных запасов серы. Применение серосодержащих удобрений может не требоваться на почвах с высокими запасами органического вещества, однако отзывчивость сельскохозяйственных культур на систематическое внесение серосодержащих удобрений наблюдается на многих типах почв.

### **Листовая и почвенная диагностика**

Для определения обеспеченности почвы доступной для растений серой разработан целый блок аналитических методов. В ряде регионов мира почвенная диагностика оказалась более успешной, в остальных случаях – менее успешной. Определение степени доступности почвенной серы растениям частично зависит от оценки скорости минерализации органического вещества почвы, поэтому применение методов почвенной диагностики имело разный успех. Отзывчивость растений на применение серосодержащих удобрений чаще всего наблюдается на почвах легкого гранулометрического состава с низким содержанием гумуса. Тем не менее, отзывчи-

<sup>1</sup> В результате восстановления сульфатов до сульфидов





Тиосульфат калия



Кизерит



Гипс



Простой суперфосфат

лоты с фосфатной рудой. При этом получается смесь дигидрофосфата кальция и гипса. Использование данного удобрения снизилось, так как экономически выгоднее транспортировать и вносить в почву более концентрированные формы фосфорных удобрений.

**Сульфат аммония (24% S).** Сульфат аммония  $[(NH_4)_2SO_4]$  – часто используемое удобрение, которое служит источником как азота, так и серы. Это, главным образом, побочный продукт различных промышленных производств, хотя иногда сульфат аммония получают за счет химической реакции между аммиаком и серной кислотой. Сульфат аммония хорошо растворим в воде, и часто используется при производстве жидких комплексных удобрений. Подкисление почвы, наблюдаемое при применении  $(NH_4)_2SO_4$ , происходит, главным образом, в результате процесса нитрификации – окисления аммонийного азота до нитратной формы, а не за счет сульфат-ионов.

**Сульфат калия (17-18% S).** Данное удобрение  $[K_2SO_4]$  используется достаточно часто. Сульфат калия может извлекаться непосредственно из природных рассолов. Также его получают посредством химических реакций с участием различных солей и кислот<sup>2</sup>. Сульфат калия хорошо растворим в воде. Это хороший источник сульфатной серы для растений.

**Калимагнезия (лангбейнит) (20-22% S).** Лангбейнит  $(K_2SO_4 \cdot 2MgSO_4)$  извлекается из соляных месторождений. Это хорошо растворимое в воде удобрение, которое служит источником сразу трех важнейших элементов питания растений.

**Сульфонитрат аммония (6-14% S).** Данное соединение получается при нейтрализации азотной и серной кислот газообразным аммиаком. Содержание серы может варьировать в зависимости от получаемых в результате данной химической реакции продуктов. Совсем недавно стало выпускаться новое гранулированное удобрение, получаемое из плава нитрата и сульфата аммония (14% S).

**Обогащенные серой удобрения.** Некоторые виды удобрений (например, аммофос и диаммофос) иногда обогащаются смесью тонкодисперсной элементарной серы и сульфатных солей для получения

продуктов, содержащих серу как в доступной растениям форме, так и обладающих пролонгированным действием. Подкисление почвы в зоне контакта с частицами элементарной серы повышает растворимость соединений фосфора и цинка в почве.

**Тиосульфаты (10-26% S).** Тиосульфатные формы удобрений – это прозрачные жидкости, содержащие серу в виде  $S_2O_3^{2-}$ . Их часто смешивают с другими жидкими удобрениями. В достаточно прогретой почве тиосульфат-ион переходит в сульфат-ион в течение одной-двух недель.

**Сульфаты магния (14-22% S).** Сульфаты магния представлены двумя минералами – кизеритом  $(MgSO_4 \cdot H_2O)$  и эпсомитом  $(MgSO_4 \cdot 7H_2O)$ . Эти соединения хорошо растворимы в воде, и содержат серу в доступной растениям сульфатной форме.

**Навоз и компосты.** Содержание серы в навозе и компостах зависит от вида сельскохозяйственных животных, типов кормов, а также способов содержания животных. Содержание серы в навозе и компостах обычно находится в диапазоне от 0.3 до 1.0% в расчете на абсолютно сухое вещество. В процессе минерализации происходит превращение органических серосодержащих соединений в доступную растениям сульфатную форму.

Выбор наиболее подходящей формы серосодержащих удобрений зависит от физико-химических свойств почвы – величины pH, содержания гумуса, а также от размера потерь серы за счет вымывания. Необходимо учитывать и потребность растений в других элементах питания, которые могут входить в состав серосодержащих удобрений. Выбор той или иной формы серосодержащих удобрений также зависит от того, требуется ли в конкретные сроки внесение серы в непосредственно доступной растениям форме или нет.

*Д-р Миккелсен – Региональный директор МИПР по Западу Северной Америки, г. Мерсед, штат Калифорния, США; e-mail: rmikkelsen@ipni.net.*

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

*Перевод с английского и примечания: В.В. Носов.*

<sup>2</sup> В основном хлористого калия и серной кислоты, либо хлористого калия и сульфата натрия.