

ИЗМЕНЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ФОРМ СЕРЫ В ПОЧВАХ ПОЛЕВЫХ ОПЫТОВ В ЗАПАДНОЙ СИБИРИ¹

© 2022 г. В. Н. Якименко^{1,*}, В. С. Бойко²

¹Институт почвоведения и агрохимии СО РАН
630090 Новосибирск, просп. Лаврентьева, 8/2, Россия

²Омский аграрный научный центр
644012 Омск, просп. Королева, 26, Россия

*E-mail: yakimenko@issa-siberia.ru

Поступила в редакцию 03.04.2022 г.

После доработки 11.05.2022 г.

Принята к публикации 12.08.2022 г.

В стационарных длительных полевых опытах в лесостепи Западной Сибири показано, что многолетний дефицитный баланс серы в агроценозах приводил к истощению почвенного фонда этого элемента. Содержание подвижной серы (экстрагируемой 1 М КСl) в почвах при дефицитном ее балансе могло снижаться, не изменяться или повышаться – в зависимости от выращиваемой культуры и уровня агротехники. Почвенное содержание минеральной серы (экстрагируемой 0.2 М НСl) в условиях перманентного дефицита баланса существенно снижалось в пахотном и подпахотном слоях почв, независимо от агротехнических факторов. При положительном балансе серы в агроценозе содержание ее форм в почве значительно возрастало. Снижение почвенного содержания серы не лимитировало урожайность выращиваемых культур при ее уровне в опытах, но могло негативно отражаться на качестве товарной продукции.

Ключевые слова: почва, агроценоз, баланс серы, подвижная сера, минеральная сера, Западная Сибирь.

DOI: 10.31857/S0002188122110114

ВВЕДЕНИЕ

Сера относится к необходимым и незаменимым элементам минерального питания растений, играя важную роль в физиологических процессах, прежде всего синтезе и регуляции количества и качества белка, продуцируемого растительным организмом [1]. Д.Н. Прянишников отмечал [2], что сера по своему физиологическому и агрохимическому значению стоит в одном ряду с основными макроэлементами – азотом, фосфором и калием, однако внимание ей уделяется гораздо меньше. Очевидно, что изучение цикла серы, наряду с другими элементами-биофилами, в естественных и антропогенно преобразованных экосистемах является обоснованным и целесообразным [3–5].

Содержание общей серы в почвах, обусловленное составом почвообразующих пород, типом почвообразования и др. факторами, варьирует в очень широких пределах; в верхних горизонтах

минеральных незасоленных почв оно меняется от менее 20 мг до 2000 мг/кг и более. В большинстве сельскохозяйственных земель валовое содержание серы находится в пределах 50–1000 мг/кг в пахотном слое почвы [5–8]. В ряду зональных почв содержание серы, как правило, увеличивается от дерново-подзолистых к черноземам и красноземам. Следует сказать, что наиболее доступная растениям сульфатная форма серы чаще всего составляет лишь 10–20% от ее общего содержания; вниз по профилю почвы доля минеральной серы обычно возрастает. В проведенных исследованиях показана тесная связь содержания серы с рядом почвенных свойств – количеством гумуса, гранулометрическим составом, величиной рН и др., а также существенная сезонная и многолетняя динамичность содержания ее минеральных форм [6–11].

При сельскохозяйственном освоении и распашке целинных почв происходят значительные потери серы вследствие интенсификации процессов минерализации органического вещества. По данным [5], потери серы из верхних горизон-

¹ Работа выполнена в рамках государственного задания ИПА СО РАН и Омского аграрного научного центра.

тов почвы в результате ее окультуривания происходят независимо от того, применялись ли серные удобрения или нет; установлено, что снижение содержания серы в почве постоянного пара происходит быстрее, чем при выращивании сельскохозяйственных культур, что связано с усиленной минерализацией органической серы в сульфаты, мигрирующие в нижние почвенные горизонты.

В то же время, в ряде исследований [10–19], выполненных в различных российских регионах, содержание серы в почвах агроценозов – с внесением удобрений или без них – изменялось неоднозначно, увеличиваясь, снижаясь или оставаясь без изменений как в пахотном слое, так и в нижележащих почвенных горизонтах. Противоречивость литературных данных по трансформации почвенного фонда серы в агроценозах обусловлена, вероятно, различиями почвенно-климатических и агротехнических условий проведения опытов. Отметим, что имеющиеся сведения о валовом содержании серы в почвах Западной Сибири представлены в основном в работах географогенетической направленности [7], а данные по изменению почвенного уровня форм серы в условиях агроценозов очень немногочисленны [20, 21]. Проведенные мониторинговые агрохимические исследования [8, 22, 23] как в целом в стране, так и в отдельных ее регионах показали нарастающий дефицит сульфатной серы на значительных площадях сельскохозяйственных угодий, что может существенно ограничивать урожайность выращиваемых культур и снижать качество растительной продукции. Учитывая важность оптимизации режима серы в агроценозах, проведение дальнейших исследований по этой проблематике с учетом региональной специфики представляется весьма актуальным.

Цель работы – в многолетних стационарных полевых опытах оценить влияние сельскохозяйственного использования почв на изменение почвенного фонда серы в агроценозах лесостепи Западной Сибири.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектами исследования послужили почвы лесостепной зоны Западной Сибири – лугово-черноземная (южная лесостепь) и серая лесная (северная лесостепь).

Полевой опыт на исходно целинной лугово-черноземной тяжелосуглинистой почве был заложен в 1978 г. на научно-исследовательском стационаре СибНИИСХоза (Омская обл., Омский р-н). На одном участке почвы выращивали преимуще-

ственно многолетние травы, параллельно на другом, в севообороте – зерновые и зернобобовые культуры [24]. В данном сообщении рассмотрены 2 наиболее контрастных варианта опытов – без удобрений и NP; в связи с очень высоким содержанием калия в исследованной почве (обменного – 60 мг/100 г) калийные удобрения не применяли. Азотные и фосфорные удобрения вносили в форме N_{aa} и P_{cd} ежегодно, с учетом потребности конкретной выращиваемой культуры. Побочную продукцию зерновых и зернобобовых культур – солому при уборке разбрасывали по полю с последующим запахиванием.

Полевой опыт на исходно целинной серой лесной среднесуглинистой почве был заложен в 1988 г. на научно-исследовательском стационаре ИПА СО РАН (Новосибирская обл., Искитимский р-н). Выращивали овощные культуры в севообороте до 2000 г., а затем картофель в монокультуре. В опыте изучали влияние интенсивности калийного баланса на эколого-агрохимическое состояние агроценозов [25, 26]. В настоящем сообщении рассмотрены наиболее контрастные варианты данного опыта: без удобрений, NP и NPK. Минеральные удобрения вносили ежегодно в форме N_{aa} , P_{cd} и K_x под планируемую урожайность культуры [25]; с 2013 г. в части опыта калийные удобрения стали использовать в форме сульфата калия (K_s). В опытах учитывали и отчуждали с делянок как основную, так и побочную продукцию выращенных культур.

Закладку и проведение опытов осуществляли по общепринятой методике [27], повторность в опытах четырехкратная. Почвенные образцы вариантов опытов и расположенных рядом целинных участков отобрали осенью 2021 г., после уборки урожая. Агрохимические анализы почвы проводили общепринятыми, стандартными методами [28, 29]: гумус определяли по Тюрину, содержание физической глины – по Качинскому, рН – потенциометрическим методом, подвижный фосфор – по Чирикову. Почвенные формы серы определяли: водорастворимую – в водной вытяжке, подвижную – в вытяжке 1 М раствора KCl, минеральную – в вытяжке 0.2 М HCl.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Оптимизация минерального питания культур в вариантах опытов способствовала существенно-му росту их продуктивности (табл. 1). На лугово-черноземной почве, обладающей достаточно высоким уровнем естественного плодородия, среднегодовая урожайность выращенных культур в контрольных вариантах (без удобрений) состави-

Таблица 1. Общая урожайность культур, поступление макроэлементов с минеральными удобрениями и хозяйственный баланс серы в длительных полевых опытах в лесостепи Западной Сибири

| Вариант | Общая урожайность, ц к.е./га | Внесено с удобрениями, кг д.в./га | | | **Сера, кг/га | | |
|--|------------------------------|-----------------------------------|--------|-------|---------------|-------|--------|
| | | азот | фосфор | калий | внесено | вынос | баланс |
| Лугово-черноземная почва | | | | | | | |
| Многолетние травы (1978–2021 гг.) | | | | | | | |
| Без удобрений | 1610 | – | – | – | – | 2.5 | –2.5 |
| NP | 2200 | 2830 | 3390 | – | 0.9 | 3.3 | –2.4 |
| Зерновые и зернобобовые культуры (1978–2021 гг.) | | | | | | | |
| Без удобрений | 1470 | – | – | – | – | 1.8 | –1.8 |
| NP | 2210 | 3230 | 2900 | – | 0.8 | 2.6 | –1.8 |
| Серая лесная почва | | | | | | | |
| Овощные культуры и картофель (1988–2021 гг.) | | | | | | | |
| Без удобрений | 2030 | – | – | – | – | 5.3 | –5.3 |
| NP | 2370 | 4020 | 2300 | – | 0.7 | 7.7 | –7.0 |
| NPК _х | 3630 | 4020 | 2300 | 6300 | 0.7 | 10.1 | –9.4 |
| *NPК _с | 649 | 900 | 540 | 1080 | 49.9 | 13.4 | 36.5 |

*Опыт проводят с 2013 г.

**Для лугово-черноземной почвы среднегодовые данные за 1978–2021 гг., для серой лесной – за 2013–2021 гг.

ла 34–37 ц к.е./га, тогда как при внесении научно обоснованных доз азотно-фосфорных удобрений – 53–55 ц к.е./га.

Одностороннее внесение NP-удобрений в опыте на серой лесной почве слабо отражалось на продуктивности овощных культур и картофеля (среднегодовая урожайность в вариантах опыта контроль и NP – 65 и 76 ц к.е./га соответственно), очевидно, в связи с перманентным нарастающим дефицитом калия. Сбалансированное применение минеральных удобрений в варианте NPK обеспечивало значительное увеличение урожая – до 115 ц к.е./га. Следует отметить, что ранее проведенные в данном опыте исследования эффективности разных форм калийных удобрений показали [30] более высокую прибавку урожая картофеля от внесения хлористого калия по сравнению с его сульфатом, особенно в относительно засушливые годы; в то же время, качество клубней (содержание сухого вещества, крахмала, кулинарные свойства) было выше при использовании сернокислого калия.

Очевидно, что результаты проведенных длительных полевых опытов подтвердили безальтернативность научно обоснованного применения минеральных удобрений в агроценозах для оптимизации как продуктивности культур, так и агрохимических свойств почвы.

Интенсивность использования удобрений в агроценозах существенным образом влияет на ба-

ланс элементов минерального питания растений, в т.ч. и серы [8, 11, 15, 18, 19]. Расчет баланса элементов-биофилов имеет важное значение для определения текущего состояния и тренда трансформации составляющих почвенного плодородия.

В приходную часть полного (экологического или биологического) баланса серы входит ее поступление в агроэкосистему с удобрениями и мелиорантами, посадочным материалом (семенами, клубнями, рассадой) и из атмосферы (с осадками, непосредственное поглощение почвой и растениями из воздуха). Расходная часть включает вынос элемента отчуждаемой растительной продукцией, потери с поверхностным стоком, инфильтрацией и испарением. Например, по данным [31], атмосферные осадки в лесостепи Западной Сибири (вне промышленных территорий) содержат 4–6 мг сульфат-ионов/л, а в испаряющейся с поверхности почвы влаге их концентрация составляет 4 мг/л. Учитывая, что среднегодовая сумма осадков в регионе равна 400–500 мм, испаряемость – 500–600 мм [25], можно полагать, что ежегодный приход серы находится в пределах 16–30 кг/га, а расход – 20–24 кг, т.е. данные статьи баланса примерно уравнивают друг друга. В случае выпадения обильных осадков, определенная часть сульфатов может мигрировать в нижнюю часть почвенного профиля и за его пределы. Следует сказать, что из указанных статей

полного баланса не все могут быть адекватно учтены с помощью современных методов и оборудования. Поэтому в большинстве случаев – и в научных исследованиях, и в практическом земледелии – используют хозяйственный баланс, предусматривающий учет поступления элемента в почву с удобрениями в сопоставлении с его выносом урожаем.

Хозяйственный баланс серы, сформировавшийся в многолетних опытах, представлен в табл. 1. Приходную часть баланса обеспечивала сера, содержащаяся во внесенных минеральных удобрениях (двойной суперфосфат – 0.5%, сульфат калия – 18%), а расходную – в отчуждаемой растительной продукции. Во всех вариантах опытов (кроме варианта с K_2) складывался перманентно отрицательный баланс серы с ежегодным дефицитом в пределах от 2 до 10 кг/га. Многолетние травы по величине выноса серы несколько превосходили зерновые культуры. Относительно повышенный вынос серы в опыте на серой лесной почве был связан с учетом и удалением с участка не только основной продукции выращиваемых культур, но и побочной (ботвы). При ежегодном внесении калийного удобрения в форме сульфата 120 кг д.в./га баланс серы формировался с большим профицитом.

На интенсивность и направленность трансформации фонда серы в почвах агроценозов, помимо ее баланса, оказывают влияние в той или иной степени и изменения физико-химических почвенных свойств, неизбежно происходящие при длительном сельскохозяйственном использовании. В ряде проведенных исследований [3, 6, 8, 15] показана тесная положительная корреляционная зависимость между почвенным содержанием серы и гумуса, а также, хотя и в меньшей степени, с гранулометрическим составом. Сера является важным компонентом почвенного органического вещества, пропорции в котором $C : N : S$ для почв сельскохозяйственных угодий в среднем составляют 130 : 10 : 1.3 (для естественных биоценозов – 200 : 10 : 1) [3], в таком же соотношении изменяется содержание этих элементов в почвах при минерализации органической компоненты. Сорбционная способность почвы по отношению к сульфатам зависит как от ее минералогического состава, так и от величины рН – с уменьшением рН поглощение серы обычно возрастает. Адсорбированные сульфаты могут достаточно интенсивно замещаться фосфатами, в связи с чем внесение фосфорных удобрений зачастую сопровождается вытеснением серы из верхнего почвенного слоя.

Изменение ряда почвенных свойств в вариантах рассмотренных длительных опытов относительно исходной целины показано в табл. 2. Сельскохозяйственное использование почв привело к некоторому утяжелению их гранулометрического состава, особенно заметному в пахотном слое удобренных вариантов. Увеличение содержания физической глины в почвах интенсивных агроценозов происходило в основном за счет интенсификации процессов дробления мелкопесчаной фракции [25].

Почвенное содержание гумуса, равно как и азота, в результате многолетнего сельскохозяйственного использования лугово-черноземной почвы изменилось мало, что связано, вероятно, со значительной долей орошаемых трав и бобовых культур в структуре посевов и соответственно поступлением в почву большого количества корневых и пожнивных остатков. В то же время содержание гумуса и общего азота в вариантах опыта на серой лесной почве резко снизилось по сравнению с целиной, что, вероятно, было обусловлено перманентной минерализацией почвенного органического вещества при небольшом поступлении растительного материала. При этом, в варианте NPK содержание гумуса и азота было существенно больше, чем в контроле, что связано, очевидно, с более высокой урожайностью (табл. 1) при оптимизированном питании культур и соответственно относительно повышенным поступлением в почву растительных остатков.

Величина рН в лугово-черноземной почве в результате ее сельскохозяйственного использования несколько повысилась (табл. 2), вероятно, из-за влияния оросительной воды, содержащей в своем составе определенное количество соединений Са и Mg. В серой лесной почве, напротив, произошло небольшое подкисление реакции среды, очевидно в результате длительного внесения аммонийной селитры. Изменение содержания подвижного фосфора в обеих почвах было подчинено общей закономерности: без использования фосфорных удобрений этот показатель заметно снижался, а при систематическом их внесении – существенно возрастал. Выявленные изменения почвенных свойств, произошедшие при длительном сельскохозяйственном использовании почв, наряду с балансом серы, сложившемся в вариантах опытов, были способны повлиять на трансформацию ее соединений.

Следует сказать, что валовое содержание серы в зональных почвах Западной Сибири отличается высокой вариабельностью; в аккумулятивном горизонте черноземов и серых лесных почв оно меняется от 0.10 до 0.24% [7]. Установлено, что этот

Таблица 2. Изменение свойств почв при сельскохозяйственном использовании

| Вариант | Слой почвы, см | Почвенные свойства | | | | |
|--|----------------|---------------------|----------|---------------|---------------------------------------|----------------------------|
| | | физическая глина, % | гумус, % | общий азот, % | pH _{H₂O} , ед. pH | подвижный фосфор, мг/100 г |
| Лугово-черноземная почва | | | | | | |
| Целина (исходное) | 0–20 | 43.8 | 6.5 | 0.32 | 6.8 | 14.3 |
| | 20–40 | 42.2 | 5.4 | 0.26 | 6.8 | 11.9 |
| Многолетние травы (1978–2021 гг.) | | | | | | |
| Без удобрений | 0–20 | 42.5 | 6.2 | 0.31 | 7.1 | 13.7 |
| | 20–40 | 44.2 | 5.6 | 0.27 | 7.1 | 11.4 |
| NP | 0–20 | 46.3 | 6.6 | 0.32 | 7.0 | 19.3 |
| | 20–40 | 43.4 | 5.2 | 0.26 | 6.9 | 12.9 |
| Зерновые культуры (1978–2021 гг.) | | | | | | |
| Без удобрений | 0–20 | 42.1 | 6.4 | 0.32 | 7.0 | 13.2 |
| | 20–40 | 43.2 | 5.5 | 0.28 | 6.8 | 12.7 |
| NP | 0–20 | 45.3 | 6.7 | 0.33 | 7.2 | 27.1 |
| | 20–40 | 44.1 | 5.6 | 0.28 | 7.0 | 22.5 |
| HCP ₀₅ | | 3.4 | 0.3 | 0.06 | 0.2 | 2.1 |
| Серая лесная почва | | | | | | |
| Целина (исходное) | 0–20 | 30.8 | 4.9 | 0.21 | 7.3 | 18.3 |
| | 20–40 | 31.4 | 2.4 | 0.08 | 7.2 | 16.0 |
| Овощные культуры и картофель (1988–2021 гг.) | | | | | | |
| Без удобрений | 0–20 | 32.5 | 3.0 | 0.11 | 7.1 | 9.6 |
| | 20–40 | 31.7 | 1.7 | 0.05 | 7.1 | 11.6 |
| NP | 0–20 | 33.6 | 3.1 | 0.13 | 6.7 | 47.6 |
| | 20–40 | 32.8 | 1.3 | 0.06 | 7.0 | 33.8 |
| NPK _x | 0–20 | 33.7 | 3.4 | 0.12 | 6.8 | 49.3 |
| | 20–40 | 32.7 | 1.6 | 0.06 | 6.9 | 29.2 |
| HCP ₀₅ | | 2.7 | 0.4 | 0.03 | 0.2 | 2.4 |

показатель в большей степени определялся особенностями почвообразующей породы, чем типом почвообразования. Исследования изменений содержания валовой серы в почвах при их сельскохозяйственном использовании очень немногочисленны. Например, в опытах на выщелоченном черноземе [14] за 3 ротации 11-польного зернотравянопропашного севооборота почвенное содержание общей серы в пахотном слое снизилось на 6–8, в подпахотном – на 2–6%. В то же время показано [7, 14], что основная часть серы в изученных почвах (до 94–96%) не извлекается солевыми и слабокислотными растворами, т.е. сосредоточена в так называемой резервной форме – прочно закреплена в составе органического вещества или нерастворимых сульфатов. В этой связи основное внимание должно быть уделено изучению и оценке почвенного фонда мобильных

соединений серы, определяющего главным образом условия питания выращиваемых культур этим элементом.

Основной формой неорганической серы в аэробных почвах являются сульфаты, которые встречаются в виде: 1 – водорастворимых солей, 2 – ионов, адсорбированных с различной прочностью связи на почвенных коллоидах, и 3 – в составе нерастворимых соединений [3].

Уровень содержания водорастворимых сульфатов в почвах вообще и в пахотных, в частности, существенно варьировал в зависимости от сезона в связи с поглощением растениями, интенсивностью мобилизационных и миграционных процессов. В верхнем 0–20 см слое целинной серой лесной почвы содержание водорастворимых сульфатов менялось в среднем в пределах 1–2, в лугово-черноземной – ≈3 мг/кг (табл. 3). При длитель-

Таблица 3. Изменение содержания форм серы в почве длительных полевых опытов

| Вариант | Слой почвы, см | Содержание серы, мг/кг почвы | | |
|--|----------------|------------------------------|-----------|-------------|
| | | водорастворимая | подвижная | минеральная |
| Лугово-черноземная почва | | | | |
| Целина (исходное) | 0–20 | 3.17 | 4.2 | 12.8 |
| | 20–40 | 1.93 | 2.9 | 8.1 |
| Многолетние травы (1978–2021 гг.) | | | | |
| Без удобрений | 0–20 | 2.16 | 3.8 | 8.1 |
| | 20–40 | 2.05 | 3.5 | 6.8 |
| NP | 0–20 | 1.85 | 2.1 | 7.2 |
| | 20–40 | 1.64 | 2.0 | 6.1 |
| Зерновые и зернобобовые культуры (1978–2021 гг.) | | | | |
| Без удобрений | 0–20 | 2.46 | 5.6 | 9.0 |
| | 20–40 | 1.95 | 5.1 | 6.7 |
| NP | 0–20 | 2.06 | 2.9 | 8.0 |
| | 20–40 | 1.94 | 2.6 | 6.1 |
| <i>HCP</i> ₀₅ | | 0.33 | 0.4 | 1.3 |
| Серая лесная почва | | | | |
| Целина (исходное) | 0–20 | 1.23 | 2.7 | 15.2 |
| | 20–40 | 0.44 | 1.3 | 10.5 |
| Овощные культуры и картофель (1988–2021 гг.) | | | | |
| Без удобрений | 0–20 | 0.83 | 1.6 | 12.3 |
| | 20–40 | 0.43 | 1.3 | 8.0 |
| NP | 0–20 | 0.85 | 1.4 | 14.0 |
| | 20–40 | 0.41 | 1.2 | 9.8 |
| NPK _x | 0–20 | 0.82 | 1.5 | 11.8 |
| | 20–40 | 0.41 | 1.3 | 9.3 |
| NPK _c | 0–20 | 4.93 | 13.7 | 24.6 |
| | 20–40 | 1.64 | 3.3 | 11.5 |
| <i>HCP</i> ₀₅ | | 0.23 | 0.4 | 1.4 |

ном сельскохозяйственном использовании серой лесной почвы без применения серосодержащих удобрений содержание сульфатов в почвенном растворе пахотного горизонта существенно снизилось, тогда как в подпахотном слое – осталось без изменений. Очевидно, что основное потребление серы растениями происходило из верхнего, наиболее корнеобитаемого слоя почвы. Систематическое применение сернокислого калия способствовало значительному повышению содержания почвенных водорастворимых сульфатов. В пахотном слое лугово-черноземной почвы содержание водорастворимой серы также заметно снизилось, причем под многолетними травами в большей степени, чем под зерновыми культурами. Интенсификация продукционного процесса выращиваемых культур (варианты NP) способ-

ствовала снижению содержания мобильной серы в почве.

Значительное уменьшение запасов наиболее подвижной фракции серы в почвах интенсивных агроценозов свидетельствовало о снижении способности данных агропочв поддерживать оптимальный уровень сульфат-иона в почвенном растворе, что могло негативно отразиться на продукционном процессе выращиваемых культур. Это обстоятельство обуславливало очевидную необходимость контроля за серным состоянием почв при их интенсивном сельскохозяйственном использовании.

Оценка обеспеченности пахотных почв доступной для растений серой производится, как правило, по содержанию ее так называемой подвижной (сульфатной) формы – почвенной

фракции серы, экстрагируемой 1М раствором КС1. Для дерново-подзолистых и серых лесных почв содержание подвижной серы <6, а для черноземов – <12 мг/кг свидетельствует о низкой обеспеченности выращиваемых культур этим элементом [32]. В работе [20] выявлено, что содержание сульфатной серы в разных типах зональных почв Новосибирского Приобья не превышает 7 мг/кг. По результатам агрохимического обследования почв 1990 г. установлено, что 41% пахотных почв Западной Сибири имеют низкое содержание серы, к 2004 г. дефицит элемента существенно возрос – 87% западносибирских агропочв остро нуждались во внесении серосодержащих удобрений [8]. В исследовании [18] показано, что на юге Восточной Сибири (Минусинская лесостепь) преобладают почвы (88.8%) с низкой обеспеченностью подвижной серой при среднем ее содержании 2.8 мг/кг, за период наблюдений (1999–2016 гг.) содержание сульфатной серы в пахотном слое почв снизилось в 2.3 раза.

Содержание подвижной серы в исследованных целинных почвах по имеющимся стандартным грациям [8, 32] можно охарактеризовать как низкое – 2.7–4.2 мг/кг (табл. 3). Обеспеченность этим элементом более тяжелой и гумусированной лугово-черноземной почвы была закономерно больше, чем серой лесной.

Длительное сельскохозяйственное использование почв по-разному отразилось на почвенных запасах подвижной серы (табл. 3), в зависимости от агротехники и выращиваемых культур. Отчуждение надземной биомассы выращиваемых трав с 2–3-мя укосами способствовало некоторому снижению содержания подвижной серы (с 4.2 до 3.8 мг/кг) в пахотном слое лугово-черноземной почвы в контрольном варианте опыта, хотя значительное количество корневых остатков и нивелировало в определенной степени этот процесс. Систематическое внесение NP-удобрений существенно повлияло на почвенный фонд подвижной серы: значительно возросшая урожайность культур обуславливала и повышенный вынос серы, а заметное увеличение содержания в почве подвижного фосфора способствовало, вероятно, вытеснению адсорбированной серы из верхних горизонтов почвы и ее миграции вниз по профилю; как результат – содержание подвижной серы в пахотном и подпахотном слоях лугово-черноземной почвы при выращивании удобряемых трав достоверно снизилось примерно до 2 мг/кг.

Многолетнее выращивание зерновых и зернобобовых культур без использования удобрений привело к заметному увеличению содержания подвижной серы в верхних слоях лугово-чернозем-

ной почвы – с 3–4 до 5–6 мг/кг. Вероятно, это было обусловлено биогенной аккумуляцией серы, в связи с ежегодным запахиванием всей побочной продукции (соломы) культур; с урожаем основной продукции отчуждалось лишь небольшое количество серы, потребленное растениями за вегетационный период. В то же время систематическое применение минеральных удобрений под зерновые культуры, как и в случае с травами, привело к существенному снижению почвенного содержания подвижной серы.

В длительном опыте на серой лесной почве содержание подвижной серы во всех вариантах (кроме NPK_c) изменилось одинаково: в пахотном слое существенно снизилось (с 2.7 до 1.5 мг/кг), в подпахотном – осталось на уровне целины. В данном опыте основное влияние на фонд сульфатной серы оказало, очевидно, ежегодное отчуждение основной и побочной продукции выращиваемых культур (и соответственно серы), что нивелировало действие других возможных факторов (содержание в почве гумуса, фосфора и т.п.).

Отметим, что содержание подвижной серы в почве вариантов опытов с дефицитным ее балансом, снизившись за ряд лет до определенного уровня (2–3 мг/кг в лугово-черноземной и 1.5–2.0 – в серой лесной), в дальнейшем с годами практически не изменялось. Достигнутый стабильно низкий уровень содержания сульфатной серы был, вероятно, характерным для конкретной почвы в сформировавшихся условиях агроценоза и поддерживался как за счет ее мобилизации из прочносвязанных минеральных резервов и почвенного органического вещества, так и процессов влаго- и солепереноса.

Использование в качестве калийного удобрения сернокислого калия существенно интенсифицировало баланс серы в варианте NPK_c опыта на серой лесной почве и способствовало значительному увеличению содержания подвижной серы в почве с 2.7 до 13.7 мг/кг. Поступившая с удобрениями сера аккумулировалась в основном в пахотном слое почвы, оставаясь доступной для выращиваемых культур даже с относительно слабо развитой корневой системой, например, картофеля; однако часть внесенных сульфатов мигрировала и накапливалась в подпахотных почвенных горизонтах.

Следует сказать, что сформировавшийся уровень содержания подвижной серы в почве вариантов опытов с дефицитным балансом этого элемента, видимо, не являлся фактором, лимитирующим продукционный процесс различных выращенных культур (табл. 1, 3), по крайней мере

при полученной в опытах урожайности. Например, при одинаковом содержании подвижной серы в почве вариантов опыта на серой лесной почве (без удобрений — $NP - NPK_x$), продуктивность картофеля между этими вариантами различалась очень существенно, в то же время, при значительной разнице уровней содержания сульфатной серы в почве вариантов NPK_x и NPK_c урожайность клубней была практически одинаковой. По мнению [20], дефицит серы в питании сельскохозяйственных культур носит относительный характер, т.е. он полностью зависит от того, насколько культура обеспечена азотом. Заметим, что в ранее проведенных исследованиях [11], внесенные за 15 лет в составе суперфосфата 300 кг серы/га не оказали влияние на урожайность полевых культур.

Тем не менее, можно полагать, что снижение запасов подвижной серы в почвах интенсивных агроценозов будет негативно отражаться не только на урожайности выращиваемых культур, но и прежде всего на качестве продукции (в т.ч. кулинарных свойствах [30]), особенно нормируемой по содержанию белка.

Фракция почвенной серы, экстрагируемая 0.2 М раствором HC_1 , классифицируется как минеральная сера, более прочно адсорбированная почвенным поглощающим комплексом, по сравнению с подвижной формой этого элемента. Адсорбционная способность почв в отношении минеральной серы и соответственно ее почвенное содержание определяется гранулометрическим и минералогическим составом почв, количеством полоторных окислов и другими факторами [3].

По данным ряда авторов [11, 12, 14, 17], содержание минеральной серы в почвах сельхозугодий разных регионов России варьирует от 10–11 до 21–26 мг/кг. Установленное снижение содержания этой формы серы в почвах при их сельскохозяйственном использовании может свидетельствовать об определенном ее участии в питании растений [14, 17]. Например, длительное выращивание культур на выщелоченном черноземе привело к снижению содержания минеральной серы в почве с 20.8–22.8 до 17.1–18.0 мг/кг [14]; при возделывании культур на каштановых почвах в условиях орошения и применения удобрений содержание минеральной серы снизилось с 26.3 до 21.3–22.5 мг/кг даже при внесении серных удобрений в дозах 15–30 кг д.в./га [17].

Содержание минеральной серы в исследованных целинных почвах составляло 13–15 мг/кг (табл. 3). В результате многолетнего сельскохозяйственного использования лугово-черноземной почвы уровень содержания минеральной се-

ры в ней достоверно снизился в пахотном (с 13 до 7–9 мг/кг), и в подпахотном (с 8 до 6–7 мг/кг) слоях, независимо от выращиваемых культур и применения удобрений. Можно полагать, что изменение этой почвенной формы элемента лучше отражало влияние длительного дефицитного баланса серы в агроценозе на ее фонд по сравнению с подвижной фракцией. Вероятно, снижение уровня содержания ионов минеральной серы обусловлено как их потреблением (в определенной степени) растениями непосредственно с занимаемых специфических почвенных позиций, так и участием (в результате различных мобилизационных процессов) в восполнении уменьшающихся запасов в почве наиболее подвижных соединений этого элемента.

В опыте на серой лесной почве при общем снижении содержания минеральной серы в вариантах с дефицитным ее балансом характер этих изменений различался. В варианте без внесения удобрений (и соответственно с невысокой урожайностью) уровень содержания минеральной серы в почве существенно снизился в пахотном и подпахотном слоях (с 10–15 до 8–12 мг/кг). В то же время при сопоставимой продуктивности культур в варианте NP , но в условиях систематического поступления некоторого количества серы с внесенным P_{cd} уменьшение почвенного фонда ее минеральной формы проявлялось лишь в виде тенденции (с 15 до 14 мг/кг). Резкий рост продуктивности культур в варианте NPK_x способствовал достоверному снижению содержания минеральной серы в пахотном слое почвы (с 15 до 12 мг/кг) и в меньшей степени — в подпахотном. Заметим, что выращивание культур с относительно слабо развитой корневой системой (например, картофеля) обуславливало и слабое их влияние на подпахотные слои почвы агроценоза в сравнении с мятликовыми культурами. При многолетнем профиците баланса серы в варианте NPK_c произошло значительное повышение почвенного содержания минеральной формы серы в пахотном слое (т.е. непосредственно в зоне внесения удобрений) и некоторое увеличение — в подпахотном.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования, проведенные в длительных стационарных полевых опытах в лесостепи Западной Сибири, выявили специфику изменения фонда серы в почвах при их сельскохозяйственном использовании. В агроценозах без внесения серных удобрений формировался дефицитный баланс серы, независимо от выращиваемых культур, уровня их урожайности и применения других

видов удобрений. При отчуждении из агроценоза только товарной части урожая выращиваемых культур, наличии большого количества пожнивных и корневых остатков, ежегодный дефицит баланса серы составлял $\approx 2-3$ кг/га. В условиях уборки с участка и основной, и побочной растительной продукции дефицит баланса серы мог достигать 7–10 кг/га в год. Использование в агроценозах удобрений, содержащих значительное количество серы (например, сульфат калия – 18% серы), обуславливало профицитный баланс этого элемента, зависящий от внесенных доз.

Дефицитный баланс серы приводил в целом к истощению ее почвенного фонда, но изменение содержания разных форм серы подчас неодинаково отражало этот процесс. Содержание подвижной серы в верхних слоях почв экстенсивных агроценозов могло и увеличиваться при дефицитном балансе, вероятно, в результате биогенной аккумуляции. Однако систематическое внесение минеральных удобрений, сопровождавшееся ростом урожайности, приводило к существенному снижению почвенного содержания этой формы как за счет возрастающего выноса элемента, так и вытеснения сульфатов из почвенного поглощающего комплекса фосфатами.

Изменения содержания минеральной серы в почвах безальтернативно отражали влияние ее дефицитного баланса в агроценозах – почвенный фонд этой фракции серы значительно истощался, независимо от выращиваемой культуры, уровня урожайности и агротехники. Полагаем, что ионы серы, входящие в минеральную фракцию, могли как непосредственно поглощаться растениями в условиях ее дефицита, так и расходоваться на восполнение снижающегося почвенного уровня содержания более мобильных соединений этого элемента. Очевидно, что диагностика серного состояния почв должна основываться на комплексном использовании показателей, отражающих как содержание наиболее мобильных фракций серы, так и более прочносвязанных ее форм – потенциальных источников питания растений этим элементом.

Обеспечение положительного баланса серы в агроценозе посредством систематического внесения серосодержащих удобрений обуславливало существенное накопление в почве всех форм этого элемента. Почвенный уровень доступных для растений форм серы, снизившийся за годы сельскохозяйственного использования почв, не являлся фактором, лимитирующим урожайность культур в наших опытах. Тем не менее, перманентное истощение фонда серы в агропочвах может иметь негативные последствия, и, вероятнее

всего, не столько для величины урожая, сколько для его качества (содержания белка, аминокислотного состава, кулинарных свойств и др.). В этой связи мониторинг изменения фонда серы пахотных почв представляется весьма целесообразным, а учет выявленных в представленном исследовании особенностей его трансформации будет способствовать уточнению оценок серного состояния почв и научно обоснованному его регулированию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алехина Н.Д., Балконин Ю.В., Гавриленко В.Ф.* Физиология растений. М.: Академия, 2005. 640 с.
2. *Прянишников Д.Н.* Избранные труды. М.: Наука, 1976. 591 с.
3. Глобальный биогеохимический цикл серы и влияние на него деятельности человека. М.: Наука, 1984. 424 с.
4. *Ковда В.А.* Биогеохимические циклы в биосфере. М.: Наука, 1976. 357 с.
5. *Кудяров В.Н., Семенов В.М.* Оценка современного вклада удобрений в агрогеохимический цикл азота, фосфора и калия // Почвоведение. 2004. № 12. С. 1440–1446.
6. *Айдинян Р.Х.* Содержание и формы соединений серы в различных почвах СССР и ее значение в обмене веществ между почвой и растением // Агрохимия. 1964. № 10. С. 3–16.
7. *Маслова И.Я., Изерская Л.А.* Сера // Агрохимические свойства почв и эффективность удобрений. Новосибирск: Наука, 1989. С. 71–82.
8. *Аристархов А.Н.* Агрохимия серы. М.: ВНИИА, 2007. 272 с.
9. *Панников В.Д., Минеев В.Г.* Почва, климат, удобрение и урожай. М.: Агропромиздат, 1987. 512 с.
10. *Алексеева Е.Н.* Миграция подвижной серы по профилю чернозема при внесении удобрений // Агрохимия. 1975. № 6. С. 93–95.
11. *Янишевский Ф.В., Фомина О.Г., Фомин П.И., Безуглая Ю.М.* Формы серы в почве и баланс в многолетнем полевом опыте при внесении двойного и простого суперфосфатов // Агрохимия. 1976. № 7. С. 24–31.
12. *Вальников И.У.* Действие серосодержащих удобрений на агрохимические свойства серых лесных почв и выщелоченных черноземов // Агрохимия. 1981. № 8. С. 58–63.
13. *Голов В.И., Теплякова С.В.* Сера и основные микроэлементы в почвах Дальнего Востока при многолетнем применении удобрений // Агрохимия. 2000. № 10. С. 20–27.
14. *Шеуджен А.Х., Слюсарев В.Н., Бондарева Т.Н.* Валовое содержание серы и ее формы в черноземе выщелоченном Западного Предкавказья в условиях агроценоза // Плодородие. 2014. № 4. С. 29–30.
15. *Панасин В.И., Новикова С.И., Рымаренко Д.А.* Сера в земледелии Калининградской области // Плодородие. 2016. № 3. С. 6–8.

16. Цховребов В.С., Умаров А.Б., Никифорова А.М., Калугин Д.В. Влияние фосфогипса и серосодержащих удобрений на урожайность и качество зерна озимой пшеницы на черноземе // *Агротехн. вестн.* 2018. № 4. С. 21–23.
17. Убугунов Л.Л., Меркушева М.Г. Удобрение картофеля. Новосибирск: СО РАН, Наука, 2019. 264 с.
18. Волошин Е.И., Сергеев А.П., Юферова Е.В. Сера в почвах Минусинской лесостепи Красноярского края // *Вестник. КрасГАУ.* 2021. № 2. С. 56–64.
19. Новоселов С.И., Иванова А.В., Толмачев Н.И., Ефремов В.В. Влияние минеральных удобрений на баланс серы в севооборотах с различными видами паров // *Агрохимия.* 2016. № 6. С. 16–19.
20. Маслова И.Я. Диагностика и регуляция питания яровой пшеницы серой. Новосибирск: Наука, 1993. 124 с.
21. Маслова И.Я., Якушева Т.Г., Шарков И.Н. Особенности пополнения фонда доступной растениям серы в почвах с разной консервативностью гумуса // *Агрохимия.* 2008. № 3. С. 5–14.
22. Аристархов А.Н. Сера в агроэкосистемах России: мониторинг содержания в почвах и эффективность ее применения // *Международ. сел.-хоз. журн.* 2016. № 5. С. 39–47.
23. Лукин С.М., Жуйков Д.В. Мониторинг содержания серы в почвах, растениях и органических удобрениях // *Земледелие.* 2019. № 2. С. 10–12.
24. Бойко В.С. Полевое кормопроизводство на орошаемых черноземах в лесостепи Западной Сибири. Омск: ИП Макшеевой Е.А., 2019. 312 с.
25. Якименко В.Н. Калий в агроценозах Западной Сибири. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2003. 231 с.
26. Якименко В.Н. Баланс калия, урожайность культур и калийное состояние почвы в длительном полевом опыте в лесостепи Западной Сибири // *Агрохимия.* 2019. № 10. С. 16–24.
27. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта. М.: Агропромиздат, 1985. 351 с.
28. Агрохимические методы исследования почв. М.: Наука, 1975. 656 с.
29. Практикум по агрохимии / Под ред. В.Г. Минеева. М.: Изд-во МГУ, 1989. 304 с.
30. Якименко В.Н. Влияние калийных удобрений на урожайность и качество клубней картофеля в лесостепи Западной Сибири // *Агрохимия.* 2017. № 9. С. 39–48.
31. Казанцев В.А. Проблемы педогалогенеза. Новосибирск: Наука, 1998. 280 с.
32. Методические указания по применению удобрений, содержащих серу. М.: Минсельхоз СССР, 1983. 24 с.

Changes in the Content of Sulfur Forms in Soils of Field Experiments in Western Siberia

V. N. Yakimenko^{a,*} and V. S. Boyko^b

^a*Institute of Soil Science and Agrochemistry, Siberian Division, RAS
prosp. Lavrentyeva 8/2, Novosibirsk 630090, Russia*

^b*Omsk Agricultural Scientific Center
prosp. Koroleva 26, Omsk 644012, Russia*

^{*}*E-mail: yakimenko@issa-siberia.ru*

In stationary long-term field experiments in the forest–steppe of Western Siberia, it was shown that the long-term deficit balance of sulfur in agrocenoses leads to the depletion of the soil fund of this element. The content of mobile sulfur (extracted by 1 M KCl) in soils with a deficient balance could decrease, remain unchanged, or increase, depending on the cultivated crop and the level of agricultural technology. The soil content of mineral sulfur (extracted by 0.2 M HCl) under conditions of permanent balance deficit significantly decreased both in the plow and subplow soil layers, regardless of agrotechnical factors. With a positive balance of sulfur in the agrocenosis, the content of sulfur forms in the soil increased significantly. The decrease in the soil sulfur content did not limit the yield of cultivated crops at its level in the experiments, but could adversely affect the quality of marketable products.

Key words: soil, agrocenosis, sulfur balance, mobile sulfur, mineral sulfur, Western Siberia.