

УДК 631.416:631.828.2:631.67:635.21

СЕРА В НЕОРОШАЕМЫХ И ОРОШАЕМЫХ КАШТАНОВЫХ ПОЧВАХ И ОЦЕНКА ПРИМЕНЕНИЯ ВОЗРАСТАЮЩИХ ДОЗ СЕРНЫХ УДОБРЕНИЙ (НА ФОНЕ NPK) ПОД КАРТОФЕЛЬ[§]

© 2023 г. М. Г. Меркушева^{1,*}, Л. Л. Убугунов¹, Л. Н. Болонева¹, И. Н. Лаврентьева¹¹Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН
670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6, Россия

*E-mail: merkusheva48@mail.ru

Поступила в редакцию 22.11.2022 г.

После доработки 07.12.2022 г.

Принята к публикации 15.12.2022 г.

Установлено, что в связи с низким содержанием гумуса и малой биологической активностью целинных каштановых почв Западного Забайкалья валовое количество серы невысокое. Распределение серы по профилю – постепенно убывающее с некоторой аккумуляцией ее в карбонатном горизонте. Длительное орошение из-за увеличения содержания гумуса и биологической активности способствовало повышению количества серы, практически нарастающего с глубиной профиля. При орошении в слое 0–20 см запас подвижных сульфатов был больше в 3 раза, чем на целине (7.3 и 2.4 кг/га соответственно); в слое 0–50 см – в 1.3 раза, в слое 0–100 см – в 2.9 раза. По содержанию и запасам подвижной серы каштановые почвы в слое 0–20 см отнесены к низкообеспеченным. После 3-х лет применения возрастающих доз серных удобрений (на фоне NPK) под орошаемый картофель содержание всех форм серы в почве повысилось в зависимости от размера дозы. Выявлена следующая закономерность: с увеличением дозы возрастали количество $S_{\text{орг}}$ в почве и обогащенность ею гумуса, сужалось соотношение $C : S_{\text{орг}}$. Установлен отрицательный баланс серы в контроле и в фоновом варианте. Внесение наименьшей дозы S15 уже сформировало положительный баланс, но учитывая, что каштановые почвы обеднены подвижной серой, необходимо применение дозы S30 (на фоне NPK) с соблюдением норм полива.

Ключевые слова: каштановые почвы, орошение, сера, миграция, удобрение, картофель, формы и баланс серы

DOI: 10.31857/S0002188123030080, EDN: KNZHKJ

ВВЕДЕНИЕ

Поступление серы в почву происходит из 3-х основных источников: выветривание минералов, атмосферное осаждение и разложение органических веществ (растительных остатков и гумуса) [1, 2]. В почве сера находится в 2-х формах – органической и неорганической. Большая часть серы в почве состоит из органических фракций (до 98%). Органическую серу можно разделить на восстановленную, серу эфиров серной кислоты, а также связанную с углеродом и не идентифицированные органические соединения. Часть органической серы в виде серосодержащих аминокислот входит в состав гуминовых веществ. Массовая доля аминокислот в гуминовых веществах составляет 6–10% [3].

Соотношения $C : N : P$ или $C : N : S$ связаны не только со структурой растительных и микробных сообществ, но и с экофизиологическими факторами в соответствующих экосистемах [4, 5]. Установлено, что $S_{\text{орг}}$ входит в состав органического вещества почв со средним соотношением $C : N : S$ равным примерно 130 : 10 : 1.3 [6]. Содержание серы в фульвокислотах и гуминовых кислотах в сумме составляет ~1/2 общего ее количества в слое 0–20 см [7]. В гумусе пропорции соотношения $N : S$ равны (8–12) : 1 [3]. Минерализация $S_{\text{орг}}$ осуществляется биологическим и биохимическим путем и наиболее интенсивно проходит при оптимальной для микроорганизмов влажности и температуре, скорость ее зависит от реакции и характера использования почв и примерно такая же, как и общая минерализация органического вещества почвы [3]. В то же время согласно концепции [8], минерализация $S_{\text{орг}}$ может проходить

[§]Работа выполнена по теме НИР (Госзадание 121030100228-4, 121030900138-8).

независимо от минерализации углерода, азота и фосфора.

Неорганическая сера в почве представлена сульфатами почвенного раствора, адсорбированными сульфатами и серой минералов. При выветривании серосодержащих минералов в почву поступают сульфаты и сульфиды. Наиболее доступная растениям сульфатная форма составляет 10–25% от общего содержания серы [9]. Почвенный сульфат может происходить из атмосферного осаждения, добавления удобрений или минерализации почвенной органической серы [10, 11]. Основная часть сульфатов, поступивших на поверхность почвы, в течение года способна оставаться в исходной форме, что свидетельствует о сорбционном механизме удержания серы в верхнем профиле почвы [12].

Скорость круговорота серы зависит от микробного сообщества и его метаболической активности [13], при котором происходят основные преобразования: иммобилизация, мобилизация и минерализация. Иммобилизация или ассимиляция S в микробных клетках полностью зависит от микробной популяции. Однако короткие жизненные циклы микроорганизмов приводят к быстрому обороту и рециркуляции S в почве. Сама микробная биомасса является наиболее активной и легкодоступной формой почвенной органической серы. Иммобилизация происходит в органических и минеральных слоях почвы, и иммобилизованная сера обычно включается в органическое вещество посредством ковалентной связи. Сульфат, добавленный в почву, быстро адсорбируется или трансформируется в низкомолекулярные органические соединения S, особенно в сложные эфиры, такие как фульвовая кислота, что приводит к удержанию его в почве. Органическая сера имеет положительную связь почти со всеми фракциями серы, за исключением адсорбированной и доступной S [14]. Мобилизация контролирует минерализацию S после того, как растворимая органическая S преобразуется в неорганическую. Доступность серы зависит от сочетания многих физико-химических свойств почвы и динамики ее почвенных форм [15]. Установлена линейная корреляция между содержанием доступной серы и карбонатами в почвах [16].

Современные химические и спектроскопические исследования [13] показали, что в сельскохозяйственных почвах большая часть почвенной серы (>95%) присутствует в виде сульфатных эфиров или серы с углеродной связью (сульфонаты или серосодержащие аминокислоты), которые могут являться биодоступными для растений, вероятно, из-за взаимного превращения углеродно-связанной серы и сульфатного эфира серы в неорганический сульфат почвенными микробами. В дополнение к этой минерализации связанных

форм серы почвенные микробы также ответственны за быструю иммобилизацию сульфата, сначала сульфатных эфиров, а затем связанной с углеродом серы.

В естественных условиях пополнение запасов серы в почвах происходит очень медленно, особенно в аридных условиях с дефицитом влаги. Однако применение серных удобрений (на фоне NPK) может повышать скорость образования органической серы, что связано с увеличением накопления серных соединений в корневой фитомассе, а также с возрастанием их содержания в микробной биомассе [17–20]. Содержание серы в микробной биомассе разных типов почв Забайкалья также характеризовалось зависимостью от этих факторов и варьировало от 0.7 до 3.6 г/м² [21].

При оценке способности почв обеспечивать растения серным питанием пользуются понятием “критический уровень”, обозначающим такое количество серы в почве, ниже которого снижается продуктивность растений из-за ее дефицита. Например, пороговая концентрация сульфатной серы в почвах составляет для злаков 0.8 мг/100 г и для люцерны – 1.2 мг/100 г почвы [22]. В настоящее время в России пахотные почвы недостаточно обеспечены подвижными формами серы [23]. Ее содержание в почвах близко к критическому уровню – 6.3–6.4 мг/кг, а в целом ряде регионов – 1.5–2.0 мг/кг.

Для почвенно-климатических условий сухостепной зоны Западного Забайкалья сера в системе почва–растение изучена фрагментарно. Определен аминокислотный состав растительных остатков, поступающих в каштановые почвы, а также содержание и распределение свободных аминокислот в неорошаемых и орошаемых каштановых почвах Забайкалья, в т.ч. метионина [24]. Изучены содержание и фракционный состав серы, ее запасы и распределение в основных типах аллювиальных почв бассейна р. Селенги на территории Монголии, дана агрохимическая оценка ресурсов серы и эффективность серных удобрений на пойменных лугах [25].

Дефицит серы в почвах или недостаточное применение серосодержащих удобрений под картофель являются одними из основных причин его вырождения. Механизм повышения урожая клубней и их качества состоит в том, что этот элемент способствует лучшему поступлению из почвы и удобрений N, P, K и других элементов [26]. Такие исследования для картофеля в условиях Западного Забайкалья отсутствуют. Поэтому цель работы – изучение влияния орошения и возрастающих доз серных удобрений под орошаемый картофель на содержание, распределение и запасы серы в каштановых почвах, а также на ее фракционный состав.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Изучение влияния возрастающих доз серных удобрений на фоне НРК под картофель сорта Волжанин проводили на орошаемых каштановых супесчаных почвах в Иволгинском р-не Республики Бурятия (с. Иволгинск, N 51°44.6158'0", E 107°16.813'0", h – 544 м н. ур. м.) в 1986–2006 гг. Некоторые характеристики их свойств приведены ранее [27]. Установлено, что длительное орошение вызвало некоторое перераспределение гранулометрических фракций, снижение содержания обменных катионов и увеличение количества карбонатов, гумуса и азота. Каштановая почва опытного участка слабо обеспечена подвижной формой азота, калия, серы и многих микроэлементов. Система обработки почвы и технология возделывания культуры – общепринятые для региона. Схема опыта, варианты: 1 – контроль (без удобрений), 2 – N120P60K120 (фон), 3 – фон + S15, 4 – фон + S30, 5 – фон + S60, 6 – фон + S120. Площадь опытной деланки 12.5 м², повторность четырехкратная.

Посадку картофеля производили во 2-й половине мая по схеме 27×70 см, уборку осуществляли в конце 1-й–начале 2-й декады сентября. Макроудобрения вносили ежегодно: азотные – в виде аммиачной селитры, фосфорные – двойного суперфосфата, калийные – хлористого калия и серные – сульфата аммония (с обязательным учетом содержащегося в нем азота) под глубокую предпосадочную культивацию. Фоновые дефицитные микроудобрения в виде сульфатов цинка, меди и кобальта также применяли под культивацию, но вносили однократно в расчете на 3 года. Орошение проводили поливной нормой 300 м³/га 5–7 раз за вегетационный период в зависимости от погодных условий сезона.

Влияние норм полива на устойчивость орошаемых почв Забайкалья к вымыванию питательных веществ из удобрений ограничено единичными исследованиями [28]. В этой связи нами были проведены модельные опыты в полевых условиях. Испытывали 2 уровня минеральных удобрений: средний – N120P60K120S30 и высокий – N240P120K240S60 при норме полива 350 и 700 м³/га на каштановой супесчаной почве с большим коэффициентом фильтрации (2.6 м/сут). Определение фракционного состава серы осуществляли по методике Айдиняна [29] в слое 0–20 см каштановой почвы в четырехкратной повторности после 3-х лет внесения возрастающих доз серных удобрений. Содержание валовой (общей) серы определяли весовым методом после разложения почвы смесью кислот. Подвижная сера, вытесняемая 0.2 М KCl, является наиболее легкоусвояемой растениями формой. Именно ее содержание используется агрохимслужбой нашей

страны для диагностики потребности растений в серных удобрениях. Минеральная форма (экстракт – 0.2 М HCl) характеризует содержание в почвах всей минеральной серы, включая подвижную. Резервная форма показывает количество элемента, находящегося в органической части почвы, и обычно определяется по разности между валовым содержанием и минеральной формой.

Полученные данные статистически обработаны в среде электронной таблицы Microsoft Excel.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Валовое (общее) количество серы в каштановых супесчаных почвах невысокое, что связано с малой концентрацией органических веществ (1.5–2% гумуса). Распределение серы по профилю – постепенно убывающее на целине (рис. 1а) и практически нарастающее с глубиной профиля на орошаемой пашне с некоторым снижением в слое 100–120 см. Согласно градации почв по содержанию и запасам подвижной серы [22], каштановые почвы в слое 0–20 см отнесены к низкообеспеченным, хотя при орошении в нижележащих слоях этот показатель возрастает до среднего и высокого уровня (рис. 1б).

Интенсивность биологических и биохимических процессов в каштановых почвах лимитируется их низкой влагообеспеченностью. Орошение супесчаных каштановых почв в течение длительного времени способствовало изменению запасов S_{общ} по сравнению с целиной за счет усиления микробиологической активности (рис. 2а), особенно это было выражено в карбонатных горизонтах. Например, запасы серы в орошаемой почве в карбонатных слоях 40–60 и 60–80 см превышали ее запасы в 1.9 и 1.7 раза в соответствующих слоях целины. В нижележащих горизонтах орошаемой почвы отмечено возрастание содержания серы и особенно существенно с увеличением глубины горизонта. Запасы S_{общ} в каштановых почвах составили (кг/га): целина: в слое 0–20 см – 660, 0–50 см – 1550, 0–100 см – 2800; орошаемая пашня: соответственно 600, 1780, 2760.

Из-за высокой миграционной способности подвижные сульфаты могут вымываться при орошении почв, особенно в отсутствие растительного покрова, что влияет на величину их запасов. В то же время орошение, повышая микробиологическую активность, может способствовать аккумуляции серы в микробиомассе и корневых остатках. Например, при орошении в слое 0–20 см запас подвижных сульфатов был больше в 3 раза, чем на целине (7.3 и 2.4 кг/га соответственно); в слое 0–50 см – в 1.3 раза, в слое 0–100 см – в 2.9 раза (рис. 2б). Такое превышение связано с наличием карбонатного горизонта с глубины 40 см и до конца профиля, который является био-

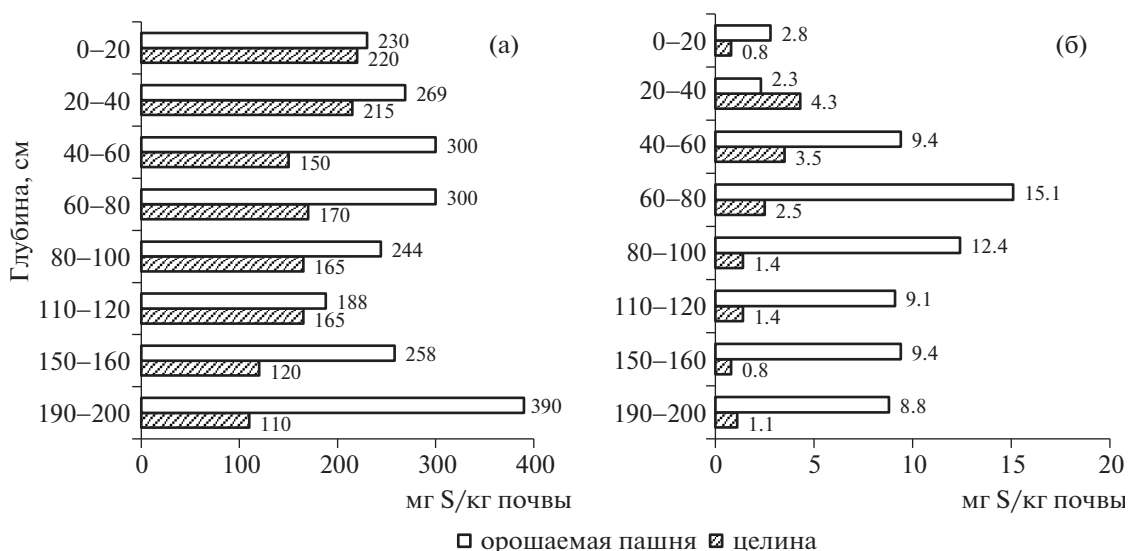


Рис. 1. Содержание и распределение общей (а) и подвижной (б) серы в профиле неорошаемых и орошаемых каштановых почв.

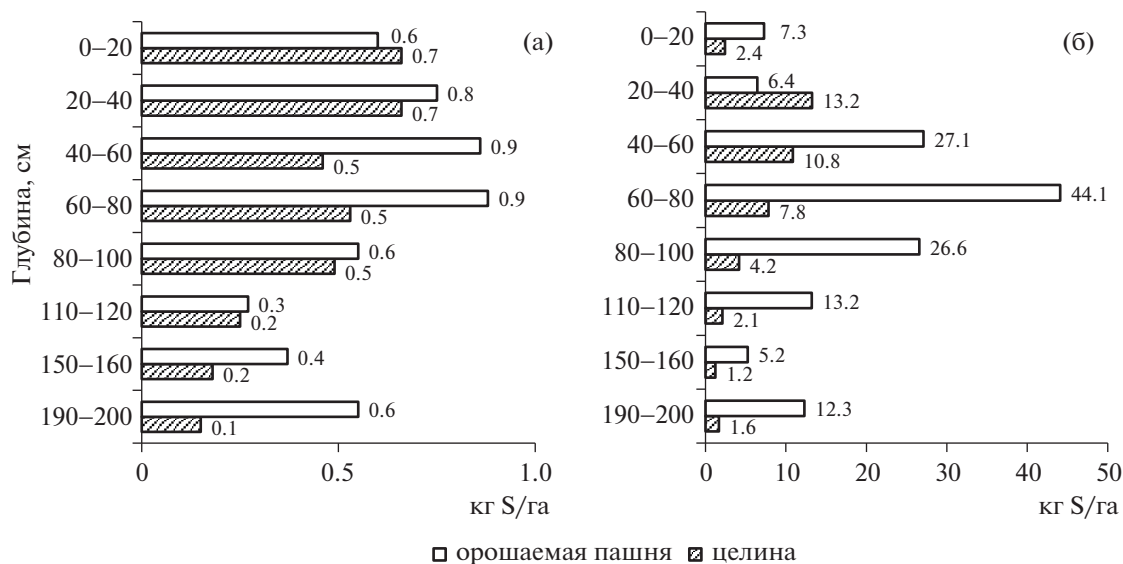


Рис. 2. Запасы общей (а) и подвижной (б) серы в профиле неорошаемых и орошаемых каштановых почв.

геохимическим барьером для мигрирующих легкоподвижных соединений. В целом же запасы подвижных сульфатов в каштановых почвах в слое 0–20 см, согласно градации [22], отнесены к низким.

Большинство сульфатов хорошо растворимы в воде и передвигаются с током почвенной влаги. Они слабо удерживаются (адсорбируются) глинистыми и другими почвенными минералами, особенно при низких показателях рН. Адсорбированные почвой сульфаты представляют собой важный резерв серы для питания растений, особенно в нижних горизонтах почвенного профиля (глубже 30 см), имеющих кислую реакцию среды.

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. По сравнению с незасеянной почвой под хорошо развитыми посевами сельскохозяйственных культур вымывание сульфат-ионов, как правило, идет менее интенсивно.

Несоблюдение технологии орошения вызывает не только негативные изменения свойств почв, но и приводит к непродуктивному перерасходу воды и минеральных удобрений. Анализ данных

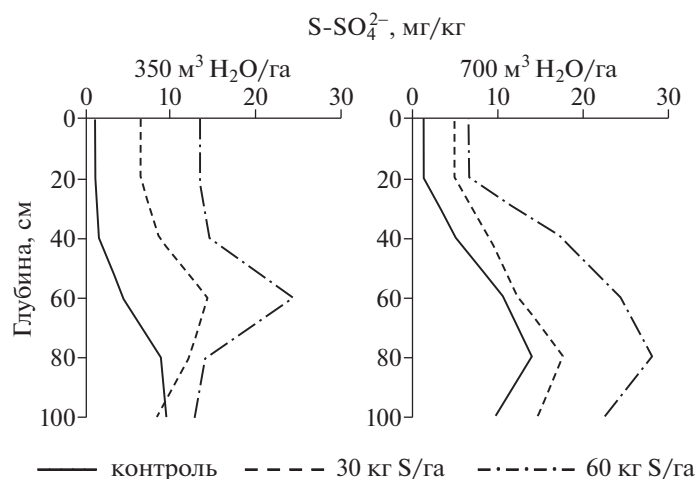


Рис. 3. Влияние норм полива и доз серных удобрений на содержание и распределение S-SO₄ в каштановой почве, мг/кг.

по вымыванию питательных веществ из почвы показал, что факторы, влияющие на интенсивность этого процесса, располагаются в следующем убывающем порядке: орошение и количество выпадающих осадков, гранулометрический состав почвы, в частности поглощательная способность почв в отношении таких анионов, как PO₄⁻³ и SO₄⁻² [30], дозы, формы и сроки внесения удобрений, характер использования угодья, агротехника выращивания культуры, длительность периода вегетации, урожайность.

Согласно полученным данным, внесение серных удобрений увеличивало содержание сульфат-иона в почве в зависимости от размера дозы при норме полива 350 м³/га (рис. 3). Миграция S-SO₄ за пределы как корнеобитаемого слоя, так и карбонатного горизонта практически отсутствовала. Известно, что карбонат кальция служит геохимическим барьером против вымывания важных элементов, в т.ч. и серы [31]. Воздействие же поливной нормы воды (700 м³/га) на каштановую супесчаную почву снижало накопление серы в пахотном горизонте и усиливало ее вымывание за пределы слоя.

Проведенными наблюдениями за динамикой содержания подвижной серы в почве выявлено, что в контроле она присутствовала в незначительном количестве в течение всех вегетационных сезонов. Внесение фоновых удобрений (N120P60K120) способствовало некоторой мобилизации почвенных ресурсов серы, и содержание подвижных форм элемента слабо возрастало, но обеспеченность ими почвы продолжала оставаться на низком уровне (рис. 4).

Применение серных удобрений несколько увеличивало содержание подвижной серы. Например, в мае увлажненного сезона обеспечен-

ность ею орошаемой каштановой почвы в вариантах с S60 и S120 была высокой. Далее, по причинам потребления ее растениями и миграции в нижележащие слои содержание доступной для растений формы данного питательного элемента резко снижалось. К концу вегетации растений при сокращении потребления элемента картофелем отмечено незначительное повышение количества подвижной серы.

Возрастание доз серного удобрения способствовало повышению обеспеченности подвижной серой до среднего уровня (6–12 мг/кг) в первую половину вегетационного периода засушливого сезона. В вариантах S60 и S120 под воздействием поливов отмечена ее небольшая миграция на глубину 20–40 см во 2-й половине вегетации картофеля.

Динамика содержания подвижной серы в слое 0–20 см орошаемой каштановой почвы во влажный сезон была в основном однотипной во всех вариантах опыта: повышение ее количества в весенне-раннелетний период при возрастании доз, снижение к середине вегетации из-за интенсивного потребления серы растениями и некоторое увеличение к концу вегетации.

Таким образом, выявлено, что содержание подвижной серы в орошаемой каштановой почве повышается при внесении возрастающих доз серных удобрений только в начале вегетационного периода, далее оно уменьшается. Избыточное количество внесенной серы мигрирует в нижележащие слои почвы и особенно заметно это проявлялось во влажный год. Поэтому нерационально внесение на орошаемых супесчаных каштановых почвах серы в дозах, превышающих ее вынос урожаем, т.к. она постепенно вымывается из верхней корнеобитаемой части профиля в нижележащие слои.

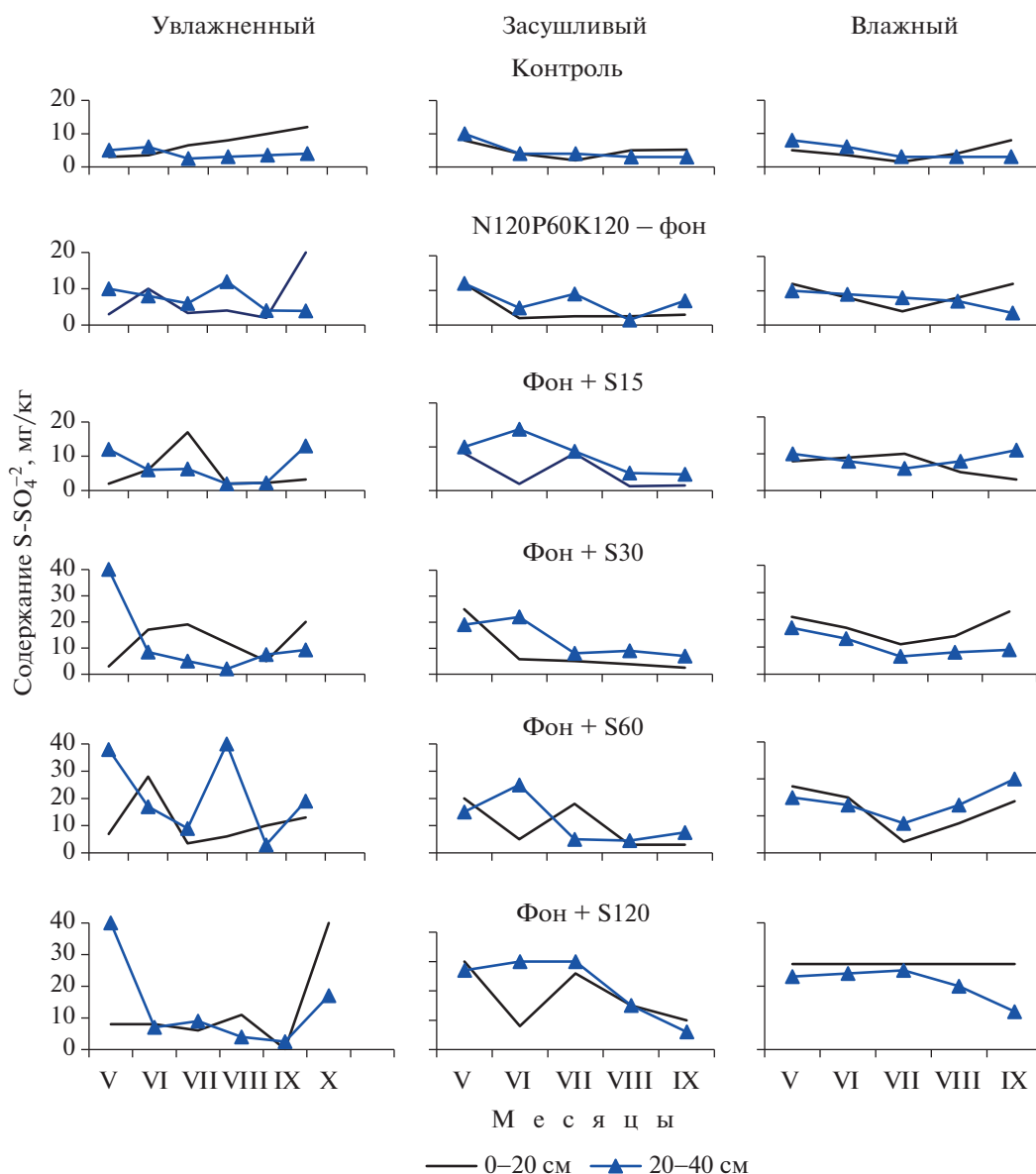


Рис. 4. Динамика содержания подвижной серы в орошаемой каштановой почве под картофелем в зависимости от возрастающих доз серных удобрений.

После 3-х лет внесения возрастающих доз серных удобрений (на фоне NPK) содержание всех форм серы в орошаемой каштановой почве повысилось (табл. 1), но уровень их накопления определялся размером дозы. Использование доз S15 и S30 увеличило концентрацию всех форм серных соединений по сравнению с контролем и фоном, тогда как между собой они не различались. То же самое отмечено и для доз S60 и S120, т.е. достоверное увеличение их количества происходило до определенного предела интервалов, а с существенным повышением дозы снова возрастало. Сера удобрений распределялась по фракциям в зависимости от размера дозы. Содержание ре-

зервной формы серы имело высокую корреляцию с другими формами ($r = 0.91-0.99$), т.е. увеличение дозы серных удобрений способствовало возрастанию содержания всех форм серы.

Поскольку органическая сера является доминирующей в составе серных соединений в почвах, то отдельно рассмотрим ее связь с органическим веществом, гумусом и органическим азотом. Сульфатная форма серы образуется в качестве побочного продукта в процессе минерализации органического вещества почвы с участием микроорганизмов. Процесс иммобилизации представляет собой включение сульфатной формы серы в микробную биомассу почвы. Наиболее простым

Таблица 1. Содержание соединений серы (S) в орошаемой каштановой почве после 3-х лет внесения возрастающих доз серных удобрений под картофель, мг/100 г

Вариант	Общая		Подвижная		Минеральная		Резервная	
	M ± m	V, %	M ± m	V, %	M ± m	V, %	M ± m	V, %
Контроль	17.6 ± 0.5	4.5	0.19 ± 0.01	9.1	1.63 ± 0.06	6.6	15.8 ± 0.5	5.8
N120P60K120 – фон	17.0 ± 0.3	2.9	0.18 ± 0.01	14.7	1.75 ± 0.14	13.4	15.0 ± 0.3	3.3
Фон + S15	19.0 ± 0.6	5.9	0.22 ± 0.01	12.0	1.75 ± 0.13	12.6	17.0 ± 0.8	8.3
Фон + S30	19.5 ± 0.5	4.1	0.24 ± 0.01	8.3	1.84 ± 0.08	7.6	17.4 ± 0.8	1.7
Фон + S60	21.7 ± 1.2	10.0	0.28 ± 0.01	6.2	2.10 ± 0.14	11.4	19.3 ± 0.6	5.0
Фон + S120	22.3 ± 0.9	7.2	0.29 ± 0.01	6.0	2.25 ± 0.20	15.5	19.5 ± 0.6	5.6
HCP ₀₅ , мг/100 г	0.88		0.01		0.13		1.20	

Таблица 2. Содержание S_{орг} в орошаемой каштановой почве (слой 0–20 см) при внесении возрастающих доз серных удобрений (на фоне NPK) под картофель

Вариант	S _{общ}	S _{орг}	C : S _{орг}	N : S _{орг}	Содержание S _{орг} в гумусе, %
	мг/кг				
Контроль	170	152	61	7.5	1.0
N120P60K120 (фон)	166	147	63	7	0.9
Фон + S15	181	161	57	7.5	1.0
Фон + S30	192	171	54	8	1.1
Фон + S60	207	184	50	8.5	1.2
Фон + S120	225	199	46	7.5	1.3
HCP ₀₅	2	1			

способом для определения того, происходит ли в почве чистая (нетто) минерализация или чистая иммобилизация серы, служат показатели соотношения углерода к сере. Процесс высвобождения серы – перехода в сульфатную форму в основном происходит 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 [2]. Применение возрастающих доз серных удобрений (на фоне NPK) под орошаемые агроценозы картофеля выявило следующую направленность в изменении содержания S_{орг} в почве: с увеличением дозы повышалось ее количество в почве, возрастала обогащенность гумуса серой и сужалось соотношение C : S_{орг} (табл. 2).

Следовательно, применение возрастающих доз серных удобрений способствует усилению минерализации S_{орг}. Отношение N : S_{орг} уменьшалось только при не внесении серных удобрений.

Ранее было отмечено, что соотношение C : N : S в почвах составляет (<100–194) : 10 : (1–1.6) или в среднем 130 : 10 : 1.3 [6]. Сделанный нами расчет этого показателя иным способом, в котором содержание серы принимается за единицу, выявил, что соотношение элементов в целине составляло 35.4 : 3.6 : 1, в орошаемой почве – 40.0 : 4.8 : 1. Это характерно для аридных условий каштановой зо-

ны Забайкалья, где даже длительное орошение не способствует быстрому повышению уровня плодородия почв без применения минеральных удобрений.

По нашим данным (табл. 3), баланс серы в зависимости от возрастающих доз серных удобрений (на фоне NPK) существенным образом отличался от азотного, фосфорного и калийного. Отрицательный баланс серы был в контроле и в фоновом варианте. Внесение наименьшей дозы S15 уже сформировало положительный баланс, но учитывая, что каштановые почвы обеднены подвижной серой, рекомендуется применение дозы S30. Высокие дозы снижают рентабельность производства картофеля в орошаемых условиях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, валовое количество серы в каштановых супесчаных почвах Западного Забайкалья невысокое, что связано с низким содержанием гумуса. Распределение серы по профилю – постепенно убывающее на целине и практически нарастающее с глубиной профиля на длительно орошаемой пашне.

Орошение, повышая биологическую активность, способствует аккумуляции серы в микробиомассе и корневых остатках. Например, при

Таблица 3. Баланс серы в зависимости от возрастающих доз серных удобрений (на фоне NPK) под орошаемый картофель (среднее за 3 года)

Вариант	Внесено S	Вынос S	Баланс, +/-	Интенсивность
				баланса, %
		кг/га		
Контроль	0	13.7	-13.7	0
N120P60K120 (фон)	0	16.1	-16.1	0
Фон + S15	15	17.7	+2.7	84.7
Фон + S30	30	19.2	+10.8	156
Фон + S60	60	20.3	+39.7	296
Фон + S120	120	23.0	+97.0	522

орошении в слое 0–20 см запас подвижных сульфатов был больше в 3 раза, чем на целине (7.3 и 2.4 кг/га соответственно); в слое 0–50 см – в 1.3 раза, в слое 0–100 см – в 2.9 раза. Это превышение связано с наличием карбонатного горизонта с глубины 40 см и до конца профиля, который является биогеохимическим барьером для мигрирующих сульфатов.

По содержанию и запасам подвижной серы каштановые почвы в слое 0–20 см отнесены к низкообеспеченным, хотя при орошении в нижележащих слоях эти показатели возрастали до среднего и высокого уровня. Запасы серы в орошаемой почве в карбонатных слоях 40–60 и 60–80 см превышали в 1.9 и 1.7 раза соответствующие показатели целины.

Внесение серных удобрений увеличивало содержание сульфат-иона в почве в зависимости от размера дозы при норме полива 350 м³/га. Миграция S–SO₄ за пределы как корнеобитаемого слоя, так и карбонатного горизонта практически отсутствовала. Воздействие же поливной нормы воды (700 м³/га) снижало накопление серы в пахотном горизонте и усиливало ее вымывание за пределы слоя.

Показано, что содержание подвижной серы в орошаемой каштановой почве повышалось при внесении возрастающих доз серных удобрений под картофель только в начале вегетационного периода. После 3-х лет применения возрастающих доз серных удобрений (на фоне NPK) под орошаемый картофель содержание всех форм серы в почве повысилось, однако уровень их накопления определялся размером дозы. Выявлена следующая направленность в изменении содержания S_{орг} в почве: с увеличением дозы повышалось ее количество в почве, возрастала обогащенность гумуса серой и сужалось соотношение C : S_{орг}.

Установлен отрицательный баланс серы в контроле и в фоновом варианте. Внесение наименьшей дозы S15 уже сформировало положительный баланс, но учитывая, что каштановые почвы обеднены подвижной серой, необходимо применение дозы S30 с соблюдением норм полива.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rai A., Singh A.K., Misra R., Shahi B., Rai V., Kumari N., Kumar V., Gangwar A., Sharma R.B., Rajput J., Kumari N., Kumar S., Kumar A., Anal A.K.D.A., Rai S., Sharma S., Bahuguna A., Arvind, Kumar A., Singh S. Sulphur in soils and plants: An overview // Inter. Res. J. Pure Appl. Chem. 2020. V. 21. Is. 10. P. 66–70.
2. Миккельсен Р., Нортон Р. Сера в почвах и серосодержащие удобрения // Вестн. Международ. ин-та питания раст. 2014. № 3. С. 6–9.
3. Орлов Д.С. Химия почв. М.: Изд-во МГУ, 1985. 376 с.
4. Sterner R.W., Elser J.J. Ecological stoichiometry: the biology of elements from molecules to the biosphere. Princeton, New Jersey, USA: Princeton University Press, 2002. 439 p.
5. Sasaki T., Yoshihara Y., Jamsran U., Ohkuro T. Ecological stoichiometry explains larger-scale facilitation processes by shrubs on species coexistence among understory plants // Ecol. Engin. 2010. V. 36. P. 1070–1075.
6. Freney F.R., Williams C.H. The sulphur cycle in soil // The Global Biogeochemical Sulphur Cycle. Scope Report No. 19. J. Chichester, England: Wiley and Sons, 1983. P. 129–202.
7. Возбуцкая А.Е. Химия почвы. М.: Высш. шк., 1968. 428 с.
8. McGill W.B., Cole C.V. Comparative aspects of cycling of organic C, N, S and P through soil organic matter // Geoderma. 1981. V. 26. P. 267–286.
9. Орлов Д.С., Садовникова Л.К., Лозановская И.Н. Экология и охрана биосферы при химическом загрязнении. М.: Высш. шк., 2002. 340 с.
10. Degryse F., Ajiboye B., da Silva R.C., Baird R., McLaughlin M.J. Transformations of sulphate and elemental sulphur in soil // Conference: ASA, CSSA, SSSA Annual Meetings – Tampa, USA. 2013.
11. Degryse F., Baird R., Andelcovich I., McLaughlin M.J. Long-term fate of fertilizer sulfate- and elemental S in co-granulated fertilizers // Nutr. Cycl. Agroecosyst. 2021. V. 120. P. 31–48.
12. Фокин А.Д., Гозный С.В. Миграция сульфатов и возможные уровни их накопления в почвах подзолистого типа // Агрохимия. 1982. № 5. С. 72–77.
13. Kertesz M.A., Mirleau P. The role of soil microbes in plant sulphur nutrition // Annual Meeting of the Society-for-Experimental-Biology. Aug 2004. J. Experiment. Bot. 2004. V. 55 (404). P. 1939–1945.

14. *Rai A., Singh S.* Forms of sulphur in some black soils of Varanasi district of Uttar Pradesh // *J. Exp. Biol. Agric. Sci.* 2018. V. 6. P. 983–989.
15. *Uchoa S.C.P., Victor H.A., Freire F.M.* Effect of sulphur rates and incubation time on the dynamics of sulphur forms in soil // *Revista brasileira de ciencia do solo.* 2013. V. 37(3). P. 678–687.
16. *Chen B., Shan X.Q., Shen D.Q., Mou S.F.* Nature of the HCl-soluble sulfate in the sequential extraction for sulfur speciation in soils // *Fresen. J. Analyt. Chem.* 1997. V. 3. Is. 7. P. 941–945.
17. *Слюсарев В.Н.* Сера в почвах Северо-Западного Кавказа (агроэкологические аспекты). Краснодар: КубГАУ, 2007. 230 с.
18. *Dail D.B., Fitzgerald I.W.S.* Cycling in soil and stream sediment: Influence of season and in situ concentrations of carbon, nitrogen and sulfur // *Soil Biol. Biochem.* 1999. V. 31. № 10. P. 1395–1404.
19. *Kozłowska I.* Wpływ nawożenia siarką i wapnowania na zmiany we właściwościach biykochemicznych i chemicznych gleby. I. Siarka w glebie // *Ann. UMCS.E.* 2001. V. 56. P. 115–124.
20. *Копец М., Gondek K.* The effect of long-term fertilization on the sulphur content in soil and in the mountain meadow sward (Gzarny Potok) // *Rostl. Vyroba.* 2002. V. 48. № 12. P. 525–530.
21. *Меркушева М.Г., Убугунов Л.Л., Чимитдоржиева Г.Д., Абашеева Н.Е., Убугунова В.И., Лаврентьева И.Н., Корсунова Ц.Д.-Ц.* Органическое вещество почв Забайкалья. Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 2008. 296 с.
22. *Смирнов Ю.А.* Повышение урожая и качества сельскохозяйственной продукции при использовании серных удобрений. Обзорн. информация. М., 1985. 61 с.
23. *Аристархов А.Н.* Сера в агроэкосистемах России: мониторинг содержания в почвах и эффективность ее применения // *Международ. сел.-хоз. журн.* 2016. № 5. С. 39–47.
24. *Меркушева М.Г., Убугунов Л.Л.* Свободные аминокислоты в неорошаемых и орошаемых каштановых почвах Забайкалья // *Агрохимия.* 1997. № 2. С. 31–36.
25. *Убугунов Л.Л.* Сера в аллювиальных почвах бассейна Селенги // *Почвоведение.* 2000. № 6. С. 716–722.
26. *Аристархов А.Н.* Агрохимия серы. М.: ВНИИА, 2007. 272 с.
27. *Меркушева М.Г., Убугунов Л.Л., Болонева Л.Н., Лаврентьева И.Н.* Содержание, запасы и формы калия в каштановых почвах Забайкалья в зависимости от орошения и возрастающих доз калийных удобрений (на фоне NPS) под картофель // *Агрохимия.* 2020. № 3. С. 3–10.
28. *Меркушева М.Г., Убугунов Л.Л., Корсунов В.М.* Биопродуктивность почв сенокосов и пастбищ сухостепной зоны Забайкалья. Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 2006. 515 с.
29. *Айдинян Р.Х., Иванова М.С., Соловьева Т.Г.* Методы извлечения и определения различных форм серы в почвах и растениях. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 1968. 22 с.
30. *Пейве Я.В.* Биохимия почв. М.: Сельхозгиз, 1961. 422 с.
31. *Крупеников И.А.* Типизация антропогенных процессов деградации черноземов // *Почвоведение.* 2005. № 12. С. 1509–1517.

Sulfur in Non-Irrigated and Irrigated Chestnut Soils and Evaluation of Application of Increasing Doses of Sulfur Fertilizers (with NPK) for Potatoes

M. G. Merkusheva^{a, #}, L. L. Ubugunov^a, L. N. Boloneva^a, and I. N. Lavrentieva^a

^a*Institute of General and Experimental Biology SB RAS
ul. Sakhyanovoy 6, Ulan-Ude 670047, Russia*

[#]*E-mail: merkusheva48@mail.ru*

It was found that due to the low humus content and low biological activity of virgin chestnut soils of Western Transbaikalia, the gross amount of sulfur is low. The distribution of sulfur along the profile is gradually decreasing with some accumulation of it in the carbonate horizon. Prolonged irrigation due to an increase in humus content and biological activity contributed to an increase in the amount of sulfur, which practically increases with the depth of the profile. When irrigated in a layer of 0–20 cm, the stock of mobile sulfates was 3 times larger than in virgin soil (7.3 and 2.4 kg/ha, respectively); in the 0–50 cm layer – 1.3 times, in the 0–100 cm layer – 2.9 times. According to the content and reserves of mobile sulfur, chestnut soils in a layer of 0–20 cm are classified as low-income. After 3 years of using increasing doses of sulfur fertilizers (against the background of NPK) for irrigated potatoes, the content of all forms of sulfur in the soil increased depending on the dose size. The following pattern was revealed: with an increase in the dose, the amount of S_{org} in the soil and the enrichment of humus with it increased, the ratio C : S_{org} narrowed. A negative sulfur balance was established in the control and in the background version. The introduction of the lowest dose of S15 has already formed a positive balance, but given that chestnut soils are depleted of mobile sulfur, it is necessary to apply a dose of S30 (against the background of NPK) in compliance with irrigation standards.

Key words: chestnut soils, irrigation, sulfur, migration, fertilizer, potatoes, sulfur forms and balance.