

ВЛИЯНИЕ РАЗНЫХ ФОРМ И ДОЗ КАЛИЙНЫХ УДОБРЕНИЙ НА БАЛАНС КАЛИЯ, ХЛОРА И СЕРЫ В СЕРОЙ ЛЕСНОЙ ПОЧВЕ ЛЕСОСТЕПИ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

© 2022 г. В. Н. Якименко

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

E-mail: yakimenko@issa-siberia.ru

Поступила в редакцию 04.10.2021 г.

После доработки 27.10.2021 г.

Принята к публикации 15.02.2022 г.

Представлены результаты полевого опыта на серой лесной почве лесостепи Западной Сибири по изучению эффективности внесения возрастающих доз разных форм калийных удобрений (на фоне NP) под картофель. Определено содержание калия, хлора и серы в растительной продукции, установлен вынос этих элементов урожаем, рассчитан их хозяйственный баланс. Показано влияние баланса отдельных компонентов калийных удобрений на содержание и распределение в почвенном профиле подвижных форм соответствующих элементов.

Ключевые слова: калийные удобрения, картофель, серая лесная почва, баланс, калий, хлор, сера, лесостепь, Западная Сибирь.

DOI: 10.31857/S000218812205012X

ВВЕДЕНИЕ

Важным фактором сохранения и приумножения плодородия пахотных почв, повышения количества и качества растениеводческой продукции является научно обоснованное применение удобрений. Рациональное использование удобрений способствует получению не менее 30–50% дополнительного прироста урожая, обеспечивает активный баланс и оптимизирует циклы элементов-биофилов в агроэкосистемах [1–3]. В то же время влияние минеральных удобрений на окружающую среду может быть неоднозначным, поскольку помимо действующего вещества они содержат, как правило, различные дополнительные компоненты и примеси. В этой связи комплексное изучение всех аспектов воздействия средств химизации земледелия на почвы и растения агроценозов представляется весьма актуальным.

Один из основных видов минеральных удобрений – калийные – активно применяют в мировом земледелии; преобладающую часть (до 90%) калийных удобрений выпускают в форме хлорида калия, заметная доля приходится и на сульфат [4]. Следует сказать, что содержащиеся в калийных удобрениях хлор и сера, наряду с калием, входят в число необходимых и незаменимых элементов минерального питания растений: хлор участвует в

физиологических процессах поддержания гомеостаза, сера необходима для регуляции синтеза белка. Недостаток этих элементов в почве способен негативно отразиться на продуктивности культур, однако при избыточном их поступлении и накоплении в агроэкосистемах они могут оказывать негативное воздействие на свойства почвы и качество растительной продукции [5–7]. Отметим, что хлор и сера зачастую активно поступают в агроэкосистемы и с другими видами удобрений, например, аммонийными формами азотных удобрений. Например, в Новосибирской обл. в 2000-х гг. в общей структуре вносимых минеральных удобрений до 20% приходилось на сульфат аммония [8, 9]. Поэтому эколого-агрохимическая оценка воздействия хлора и серы, поступающих с удобрениями в агроценозы, на объекты окружающей среды имеет важное значение.

Влияние главного компонента калийных удобрений – калия – на плодородие почвы и продуктивность культур, установленное в многолетних полевых опытах, довольно подробно рассмотрено в ряде работ [10–13], тогда как процессы изменения в агроценозах фондов серы и хлора остаются относительно малоизученными [14, 15]. Ранее, в связи с оценкой эффективности разных форм калийных удобрений, были проведены до-

вольно многочисленные исследования специфики накопления сульфат- и хлор-ионов в почве и растениях агроценозов, выполненные в различных почвенно-климатических условиях [16–21]. Однако в последние годы количество работ, посвященных режимам серы и особенно хлора в агроэкосистемах, существенно снизилось [22–25].

Анализ опубликованных материалов свидетельствует, что полученные результаты носят зачастую неоднозначный, а иногда противоречивый характер; установленные в одном регионе закономерности поведения компонентов калийных удобрений в агроценозах не подтверждаются в другом. Данное обстоятельство обусловлено, вероятно, различиями почвенно-климатических и агротехнических условий проведения конкретных опытов. В этой связи выявление региональной специфики всех аспектов действия калийных удобрений на плодородие почв, продуктивность культур и их качество представляется целесообразным. В земледельческой зоне Западной Сибири число работ по изучению влияния доз и форм калийных удобрений на накопление и распределение содержащихся в них компонентов в почвах и растениях агроценозов очень ограничено, что обуславливает необходимость проведения подобных исследований.

Цель работы – в условиях стационарного полевого опыта установить влияние различных форм и доз калийных удобрений на накопление их компонентов в почве и растениях картофеля в условиях лесостепи Западной Сибири.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Полевой опыт по изучению влияния форм и доз калийных удобрений на продуктивность картофеля, потребление им элементов питания и агрохимические свойства почвы проводят с 2013 г. на научно-исследовательском стационаре ИПА СО РАН (Новосибирская обл., Искитимский р-н). Почва опытного участка – серая лесная среднесуглинистая, сформированная на лессовидных карбонатных суглинках, является достаточно типичной для лесостепной зоны Западной Сибири; полученные на ней результаты можно с большой долей уверенности экстраполировать и на другие генетически сопряженные почвы региона [12].

Закладку и проведение опытов осуществляли по общепринятой методике [26], повторность четырехкратная. Схема опыта включала следующие варианты: 1 – без удобрений (контроль), 2 – NP (фон N100P60), 3 – NP + K₁, 4 – NP + K₂, 5 – NP + K₃, 6 – NP + K₄, 7 – NP + K₅ (в вариантах с 3 по 7 возрастающие дозы K – соответственно 30,

60, 90, 120 и 150 кг д.в./га). Кроме того, имелся вариант – многолетний пар (без растений и удобрений). Минеральные удобрения вносили ежегодно весной перед посадкой клубней: азот – в форме N_{аа}, фосфор – P_{сд}, калий – K_x и K_c. Выращивали картофель районированного сорта Роко. Почвенные и растительные образцы отбирали во время уборки урожая и анализировали стандартными, общепринятыми методами [27, 28].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Различная интенсивность использования минеральных удобрений в вариантах полевого опыта соответствующим образом отразилась на урожайности выращиваемого картофеля (табл. 1). Очевидно, что в контрольном варианте продукционный процесс растений лимитировался дефицитом всех макроэлементов, в фоновом – калия. Результаты опыта свидетельствовали, что одностороннее внесение NP-удобрений в почву с истощенным калийным фондом совершенно неэффективно, на продуктивности выращиваемого картофеля это практически не отражалось.

Урожайность картофеля в опыте существенно варьировала по годам в зависимости от гидротермического режима вегетационного периода. Однако при любых погодных условиях наивысшая урожайность клубней (а также надземной биомассы – ботвы) была получена при оптимизированном и сбалансированном минеральном питании растений (варианты NPK_{3–5}). Эффективность разных форм калийных удобрений зависела от их доз. При невысоких дозах – 30–60 кг/га – эффективность сульфата калия немного превосходила хлорид или равнялась ему. В случае применения повышенных доз калийных удобрений (90–150 кг/га), хлористый калий был несколько предпочтительней. Возможно, это было связано с физиологической ролью хлора, который влияет на оводненность тканей растений и повышает их водоудерживающую способность [11], что важно в условиях дефицита влаги в засушливые годы.

Отметим, что внесение оптимальных доз минеральных удобрений не только существенно увеличивало урожайность картофеля, но и заметно улучшало качество клубней, прежде всего, “базовые” показатели – содержание сухого вещества и крахмала, а также витамина С и протеина. Сравнительная оценка влияния разных форм калийного удобрения на показатели качества клубней, в т.ч. кулинарные свойства, установила [29], что сульфат калия в целом оказывал на них более благоприятное действие по сравнению с хлори-

Таблица 1. Среднегодовая урожайность картофеля и содержание элементов в биомассе в полевом опыте (2016–2020 гг.)

Вариант	Урожайность, ц/га				Калий				Хлор				Сера			
					% от сухого вещества											
	клубни		ботва		клубни		ботва		клубни		ботва		клубни		ботва	
	K _x	K _c	K _x	K _c	K _x	K _c	K _x	K _c	K _x	K _c	K _x	K _c	K _x	K _c	K _x	K _c
Без удобрений	81		40		1.04		0.44		0.19		0.25		0.16		0.27	
NP (фон)	93		65		0.97		0.37		0.19		0.26		0.17		0.27	
Фон + K ₁	144	155	68	72	1.12	1.15	0.46	0.46	0.20	0.20	0.26	0.25	0.15	0.16	0.27	0.32
Фон + K ₂	190	192	86	83	1.23	1.25	0.59	0.74	0.21	0.20	0.28	0.25	0.14	0.18	0.22	0.37
Фон + K ₃	221	210	90	88	1.37	1.48	1.12	1.63	0.22	0.19	0.29	0.25	0.14	0.19	0.17	0.39
Фон + K ₄	246	225	99	92	1.48	1.60	1.70	2.06	0.24	0.19	0.33	0.24	0.13	0.19	0.16	0.39
Фон + K ₅	253	247	106	102	1.58	1.77	1.98	2.21	0.24	0.18	0.34	0.24	0.13	0.19	0.16	0.39
HCP ₀₅	45		19		0.23		0.61		0.03		0.05		0.03		0.05	

Примечание. K_x – калийные удобрения вносили в форме KCl, K_c – в форме K₂SO₄. То же в табл. 2–4.

дом, однако хлорид калия способствовал увеличению общего урожая клубней.

Уровень минерального питания картофеля повлиял на содержание химических элементов в растительной продукции. Содержание калия в картофеле устойчиво увеличивалось при внесении возрастающих доз калийных удобрений (и хлорида, и сульфата): в клубнях – примерно с 1 до 1.6–1.7%, в ботве – с 0.4 до 2.0–2.2%. Отмечавшийся при этом параллельный рост продуктивности растений свидетельствовал об эффективном использовании внесенных доз калия. Уровень содержания калия в основной и побочной продукции картофеля высоко коррелировал с его урожайностью ($r = 0.7–0.8$).

Обращает на себя внимание довольно широкий диапазон содержания калия в надземной биомассе картофеля при варьировании уровня обеспеченности растений этим элементом. Это связано, вероятно, с менее эффективными механизмами регулирования поступления химических элементов в вегетативные органы растений по сравнению с генеративными и запасующими. Отметим также тенденцию к повышению содержания калия в картофеле при использовании сульфата относительно хлорида. Известно, что калий является основным катионом для генерации осмотического давления в растительных клетках, обеспечивающего тургор. Определенную роль в этом процессе может играть и хлор, повышая водоудерживающую способность растений. Поэтому, вероятно, при внесении хлорсодержащих удобрений потребность растений в ка-

лии может несколько снижаться, а при относительном дефиците хлора, напротив, возрастать.

Содержание хлора в картофеле ожидаемо зависело от формы и дозы внесенного калийного удобрения: в вариантах с использованием хлорида калия оно значительно возрастало, сульфата – оставалось без изменений или даже снижалось, вероятно, из-за эффекта разбавления при увеличивающейся продуктивности. Вместе с тем результаты опыта показали, что поступление хлора в растения достаточно эффективно лимитируется в отличие от макроэлемента калия: даже при использовании высоких доз хлористого калия содержание этого галогена в картофеле увеличилось, в целом не намного относительно вариантов без удобрений. Концентрация хлора в клубнях контрольного и фонового вариантов составляла 0.19%, а при внесении возрастающих доз хлорида калия повышалась до 0.24%, в ботве – соответственно до 0.25 и 0.34%.

Заметим, что достаточно высокое (0.19–0.25%) содержание хлора в биомассе картофеля в вариантах опыта на зональной незасоленной почве, в которую никогда не вносили минеральные удобрения вообще и хлорсодержащие, в частности, свидетельствует о необходимости и важности этого элемента для нормального роста и развития растений. В этой связи встречающаяся активная пропаганда обязательного использования бесхлорных форм удобрений под картофель не вполне корректна. Исследованиями [11] установлено, что нормальный уровень содержания хлора в ботве в период созревания находится в пределах 2.0–3.3 г/кг. Результаты наших опытов показали, что

использование достаточно высоких доз хлористого калия (до 150 кг д.в./га) не привело к чрезмерному накоплению хлора в основной и побочной продукции картофеля. Имеющееся мнение об определенном снижении содержания в клубнях сухого вещества и крахмала при внесении хлористого калия подтверждается далеко не всегда [11, 29, 30]. Поэтому, учитывая в целом бесспорное положительное влияние калийных удобрений на агрономическое, агрохимическое и экологическое состояние агроценоза [10–12], целесообразности использования хлористого калия в земледелии нет альтернативы, по крайней мере экономически обоснованной.

Концентрация серы в картофеле находилась на одном уровне с хлором (табл. 1): в клубнях контрольного варианта содержалось 0.16% серы, в ботве – 0.27%; внесение NP-удобрений в фоновом варианте никак не повлияло на эти показатели. При дополнительном использовании возрастающих доз хлористого калия, по мере роста продуктивности картофеля, содержание серы в растениях закономерно снижалось (в надземной биомассе особенно заметно – до 0.16%), отражая как эффект разбавления, так и, вероятно, определенный дефицит этого элемента. Применение сернокислого калия сопровождалось повышением содержания серы в картофеле; для клубней это проявлялось в виде тенденции, а для ботвы зависимость была достоверной. Отметим, что максимальный уровень содержания серы в растительной продукции (в клубнях – 0.19, в ботве – 0.39%) в нашем опыте достигался при средней дозе сульфата калия (90 кг/га); дальнейшее увеличение дозы вносимого удобрения не привело к дополнительному накоплению серы в картофеле. Как и в случае с хлором, защитные механизмы растения препятствовали поступлению в организм избыточного количества серы.

Определение в картофеле содержания азота и фосфора показало, что в клубнях картофеля в контрольном варианте содержалось азота 1.13, в ботве – 1.63%. Внесение азотных удобрений в фоновом варианте существенно увеличило количество этого элемента в растительной продукции: в клубнях до 1.56, в ботве – до 2.29%. Использование возрастающих доз калийных удобрений привело к постепенному снижению содержания азота в клубнях до 1.0–1.14, в ботве – до 1.62–1.70%; уменьшение содержания азота в растительной продукции при внесении сульфата калия было более выраженным по сравнению с хлоридом. Содержание фосфора в картофеле в контрольном варианте составляло: в клубнях – 0.41, в ботве – 0.36. Внесение фосфорного удобрения достовер-

но увеличило содержание этого элемента в клубнях (до 0.66%), тогда как в ботве оно не изменилось. Возрастающие дозы калийных удобрений, независимо от их формы, не влияли на содержание фосфора в ботве картофеля, однако в клубнях наблюдалось небольшое снижение этого показателя (до 0.60%). Учитывая рост урожайности картофеля при увеличении доз калийных удобрений в опыте, можно полагать, что улучшение калийного питания повышало эффективность использования растениями азота и фосфора на создание единицы биомассы.

Вынос K, Cl и S картофелем определялся содержанием этих элементов в растительной продукции и величиной урожайности культуры (табл. 1, 2). Потребление картофелем калия как из почвенных запасов, так и внесенных калийных удобрений, многократно превосходило потребность этой культуры в хлоре и сере. В зависимости от уровня калийного питания растений в вариантах опыта и их продуктивности вынос калия урожаем основной и побочной продукции варьировал от 26–31 до 120–124 кг/га. Основная часть потребленного культурой калия содержалась в клубнях. Соотношение между выносом калия клубнями и ботвой составляло 7.5 : 1.0 в вариантах с лимитированным калийным питанием и уменьшалось до 3.5 : 1.0 при повышенных дозах калийных удобрений. Следовательно, при дефиците этого элемента относительная интенсивность его депонирования в запасующих органах-клубнях возрастала. Характер и масштабы потребления калия основной и побочной продукцией картофеля в целом не отличались при использовании разных форм калийного удобрения.

Вынос картофелем хлора в вариантах без применения калийных удобрений составлял 6–8 кг/га, при внесении повышенных доз хлористого калия возрастал до 19 кг. В случае использования сульфата калия, по мере увеличения его дозы вынос картофелем хлора практически не изменялся, т.е. больше определенной “нормы” растения не потребляли, даже при возрастающей продуктивности. Соотношение между выносом хлора клубнями и ботвой мало изменялось в вариантах с различной удобренностью и урожайностью, находясь в пределах 2–3 : 1.

Количество серы, отчуждаемое урожаем картофеля, и структура ее выноса были практически аналогичны соответствующим показателям для хлора. В контрольном и фоновом вариантах опыта вынос серы составлял 5.4–7.5 кг/га. По мере увеличения доз внесенных калийных удобрений (на фоне NP) и параллельно урожайности, потребление серы возросло до ≈ 10 кг в вариантах с

Таблица 2. Среднегодовой вынос и хозяйственный баланс К, Cl и S в полевом опыте (2016–2020 гг.), кг/га

Вариант	Калий						Хлор						Серя					
	вынос				баланс		вынос				баланс		вынос				баланс	
	клубни		ботва				клубни		ботва				клубни		ботва			
	K _x	K _c	K _x	K _c	K _x	K _c	K _x	K _c	K _x	K _c	K _x	K _c	K _x	K _c	K _x	K _c		
Без удобрений	22.9		3.1		-26.0		4.2		1.8		-6.0		3.5		1.9		-5.4	
NP (фон)	27.2		3.7		-30.9		5.3		2.6		-7.9		4.8		2.7		-7.5	
Фон + K ₁	40.3	44.9	4.6	5.1	-14.9	-20.0	7.2	7.8	2.6	2.8	17.2	-10.6	5.4	6.2	2.7	3.5	-8.1	2.6
Фон + K ₂	59.0	57.5	7.7	8.1	-6.9	-5.6	10.1	9.2	3.6	2.8	40.3	-12.0	6.7	8.3	2.7	4.1	-9.6	12.2
Фон + K ₃	74.0	69.6	14.6	17.9	1.4	2.5	11.9	9.2	3.8	2.8	65.3	-12.0	7.6	8.9	2.2	4.3	-9.8	23.7
Фон + K ₄	88.8	78.4	23.8	24.7	7.4	16.9	14.4	9.3	4.6	2.9	89.0	-12.2	7.8	9.3	2.2	4.7	-10.0	39.2
Фон + K ₅	96.4	93.8	27.7	26.5	25.9	29.7	14.6	9.5	4.8	2.9	115	-12.4	7.9	10.1	2.2	4.7	-10.1	51.4

хлоридом калия и 15 кг/га – с сульфатом. Соотношение между выносом серы клубнями и ботвой в вариантах без внесения калийных удобрений и с использованием сульфата калия было очень стабильным – $\approx 2 : 1$, в то же время в вариантах с применением хлорида калия данное соотношение возросло до $3.6 : 1.0$, отражая, вероятно, нарастающий дефицит серы при интенсификации производственного процесса.

Удельное потребление калия картофелем при дефицитном калийном питании (контрольный и фоновый варианты) составляло 3.2–3.3 кг/т клубней с учетом ботвы. Оптимизация минерального питания выращиваемой культуры, сопровождавшаяся соответствующим ростом урожайности, способствовала и значительному увеличению потребности в калии. В вариантах NPK_{3–5} удельное потребление калия прогрессивно увеличивалось (4.1, 4.6, 4.9 кг/т соответственно) и было одинаковым при использовании разных форм калийных удобрений.

Потребление хлора картофелем в варианте с неудобреной почвой (контроле) равнялось 0.74 кг/т клубней. При внесении возрастающих доз хлористого калия (на фоне NP) удельное потребление этого галогена практически не изменилось и находилось в пределах 0.71–0.77 кг/т основной продукции с учетом побочной. Вероятно, такое количество хлора было достаточным для удовлетворения физиологических потребностей растений и обеспечения полноценного производственного процесса. Использование возрастающих доз сульфата калия привело к заметному постепенному уменьшению удельного потребления хлора картофелем до 0.50 кг/т; снижение величины данного показателя в этих вариантах во многом было связано с эффектом разбавления (при

значительном росте урожайности), однако, возможно, имел место и некоторый дефицит хлора.

В контрольном варианте картофель потреблял 0.67 кг серы/т клубней с учетом соответствующего количества ботвы. Применение возрастающих доз сульфата калия (на фоне NP) практически не повлияло на этот показатель; в вариантах с повышенными дозами сернокислого калия удельное потребление серы картофелем находилось на уровне 0.60–0.63 кг/т, не ограничивающим полноценный рост и развитие растений. В то же время, в соответствующих вариантах с хлоридом калия потребление серы, видимо, лимитировалось и снизилось до 0.40–0.44 кг/т, отражая определенный недостаток этого элемента.

Баланс изученных элементов в различных вариантах опыта складывался неодинаково. Специфика формирования баланса калия в агроценозе определялась интенсивностью использования калийных удобрений и не зависела от их форм (при эквивалентных дозах). В связи со значительным отчуждением калия урожаем картофеля, баланс этого макроэлемента в вариантах без внесения калийных удобрений или с низкими их дозами формировался с большим дефицитом, что обуславливало очевидное лимитирование урожайности культуры (табл. 1). Бездефицитный, практически нулевой баланс калия обеспечивался в варианте NPK₃, при котором этот элемент уже не ограничивал производственный процесс растений. Положительный калийный баланс в опыте складывался в вариантах NPK_{4–5}; преимущества повышенной обеспеченности выращиваемых культур калием особенно очевидны в стрессовых ситуациях, вызванных засухой, избыточным увлажнением и другими неблагоприятными внешними факторами [10–12].

Таблица 3. Влияние возрастающих доз калийных удобрений на содержание их компонентов в почве полевого опыта (слой 0–20 см), 2020 г.

Вариант	К (обменный, мг/100 г)		Сl (водорастворимый, мг/кг)		S (подвижная, мг/кг)	
	K _x	K _c	K _x	K _c	K _x	K _c
Пар	11.0		8.8		2.6	
Без удобрений	6.8		7.8		2.0	
NP (фон)	6.9		8.0		2.2	
Фон + K ₁	9.8	9.0	9.6	7.0	2.2	5.5
Фон + K ₂	13.0	14.4	9.6	7.0	1.9	6.3
Фон + K ₃	16.1	18.6	11.8	7.2	1.9	8.0
Фон + K ₄	23.5	25.8	15.5	7.2	1.7	13.0
Фон + K ₅	26.7	29.6	16.4	7.2	1.7	15.8
HCP ₀₅	3.1		3.0		0.4	

В контрольном и фоновом вариантах опыта отмечен перманентно дефицитный баланс хлора и серы, способствовавший истощению в той или иной степени почвенных запасов этих элементов минерального питания растений. В целом невысокая потребность картофеля в данных элементах обуславливала формирование положительного баланса и хлора, и серы при использовании даже самых низких доз (в опыте – 30 кг/га) соответствующих форм калийных удобрений; при возрастании вносимых доз профицит баланса увеличивался. Отметим, что дефицит баланса хлора или серы по мере увеличения доз калийных удобрений, не содержащих какой-то из этих элементов, практически не изменялся и находился на уровне 10–12 кг/га. Очевидно, что такое количество как хлора, так и серы, необходимо картофелю для формирования урожая клубней порядка 250 ц/га с соответствующей надземной биомассой.

Различный баланс компонентов калийных удобрений, сформировавшийся в вариантах опыта, закономерно отразился на содержании этих элементов в почве (табл. 3).

Почвенный уровень содержания обменного калия ожидаемо изменился в соответствии с поддерживаемым в агроценозе калийным балансом: при его длительном сильном дефиците (контрольный и фоновый варианты) содержание обменного К существенно снизилось (относительно пара), а при росте интенсивности использования калийных удобрений – значительно возросло. Отметим стабильность содержания обменного калия в почве при многолетнем дефицитном балансе – 6.5–7.0 мг/100 г; очевидно, что данный уровень является минимальным для исследованной среднесуглинистой почвы и не изменяется, несмотря на продолжающийся перманентный

некомпенсируемый вынос калия выращиваемыми культурами [12]. Регулярное использование калийных удобрений в дозах, обеспечивающих слабodeфицитный или, тем более, бездефицитный баланс калия в вариантах опыта (NPK₂₋₃), приводило к заметному увеличению почвенного содержания обменного калия по сравнению с паром и целиной (11–12 мг/100 г). Допустимость и оправданность слабodeфицитного баланса калия в севооборотах отмечали и ранее, в целом величина оптимального баланса определяется продуктивностью агроценоза и калийным состоянием почвы [11, 12].

Показано, что все изменения содержания обменного калия в почве, независимо от баланса калия в агроценозе, происходили, прежде всего, в верхних почвенных горизонтах (табл. 4). Истощение запасов почвенного калия при отрицательном его балансе произошло, главным образом, в пахотном, наиболее корнеобитаемом слое почвы и заметно меньше – в подпахотном. При положительном балансе калия увеличение содержания его обменной формы происходило только в пахотном почвенном слое, т.е. непосредственно в зоне внесения калийных удобрений.

Накопление калия в почве принципиально не отличалось при использовании разных форм калийных удобрений. Несколько большее содержание обменного калия при внесении сульфата, относительно соответствующих вариантов с хлоридом, вероятно, связано с различиями в урожайности картофеля (табл. 1). Кроме того, имеются данные [20] об увеличении подвижности калия и содержания его легкорастворимых форм в почве под влиянием серосодержащих удобрений.

Содержание хлора в почвах определяется, как правило, химическим составом почвообразую-

Таблица 4. Изменение содержания К, Cl и S в профиле почвы полевого опыта

Вариант	Слой почвы, см					НСП ₀₅
	0–20	20–40	40–60	60–80	80–100	
Обменный К, мг/100 г						
Пар	11.0	9.9	11.6	11.5	9.8	1.4
Без удобрений	6.8	6.9	8.9	10.5	9.8	1.6
NP (фон)	6.9	7.7	8.4	10.4	9.7	1.5
Фон + К _{х4}	23.5	9.3	11.3	11.0	9.8	2.2
Фон + К _{с4}	25.8	9.9	11.8	11.4	9.6	2.4
Водорастворимый Cl, мг/кг						
Пар	8.8	12.1	13.8	14.1	14.2	3.2
Без удобрений	7.8	9.5	12.1	14.5	14.6	3.0
NP (фон)	8.0	10.5	11.5	14.2	14.5	3.2
Фон + К _{х4}	15.5	21.2	20.3	22.0	21.4	4.0
Фон + К _{с4}	7.2	10.9	11.3	14.4	14.8	3.2
Подвижная S, мг/кг						
Пар	2.6	2.2	1.8	1.7	1.9	0.3
Без удобрений	2.0	2.1	1.6	1.5	1.8	0.2
NP (фон)	2.2	2.2	1.7	1.6	1.8	0.2
Фон + К _{х4}	1.7	1.9	1.6	1.7	1.8	0.2
Фон + К _{с4}	13.0	8.4	3.0	2.9	5.7	0.7

щих пород, а также интенсивностью процессов влаго- и солепереноса. По данным [31], для исследованной зоны Западной Сибири среднее содержание хлора в выпадающих атмосферных осадках равно 2–3 мг/л, а во влаге, испаряющейся с поверхности незасоленных почв, – 1.5 мг/л. Большинство хлоридов обладает высокой растворимостью и миграционной способностью, эффективных геохимических барьеров для них практически не существует. Способность хлора к интенсивной миграции по профилю почвы с нисходящими и восходящими потоками влаги приводит к определенному выравниванию концентрации этого аниона в почвенной толще.

Этими причинами, а также невысоким, в целом, потреблением хлора картофелем, и возможно объяснить как сохранение относительно стабильного содержания этого элемента в верхнем слое почвы (табл. 3), так и его распределения по почвенному профилю в вариантах опыта без внесения хлорсодержащих удобрений (табл. 4). Следует лишь отметить некоторую тенденцию к уменьшению содержания водорастворимого хлора в верхних слоях почвы вариантов с растениями (контроль, NP, NPК_с) относительно почвы пара, подтверждающую определенную потребность выращиваемых культур, в т.ч. картофеля, в этом

элементе. Однако содержание хлора в верхнем слое почвы всех вариантов опыта (в пару и с растениями, с удобрениями и без них) не опустилось меньше 7–8 мг/кг, оставаясь на уровне естественной (целинной) почвы.

Содержание хлора в исследованной почве имело тренд на возрастание вниз по профилю, при относительной в целом выравненности, исключая верхний 0–20 см слой (табл. 4). Это могло быть связано с постепенным утяжелением гранулометрического состава почвы с глубиной (с ≈30% физической глины в 0–20 см слое до 35–36% в нижней части профиля), а также воздействием внешних факторов прежде всего и в наибольшей степени на верхний почвенный горизонт.

Длительное применение хлористого калия привело к существенному возрастанию концентрации хлора по всему почвенному профилю, пропорционально вносимой дозе (табл. 3, 4). Заметим, что увеличение содержания этого галогена в каждом почвенном слое было примерно одинаковым по сравнению с почвой пара. Следовательно, поступавший с удобрениями хлор относительно равномерно распределялся по профилю почвы, а меньшее его содержание в верхнем 0–20 см слое почвы обусловлено активным

совокупным влиянием растений, осадков, испарения и других факторов. Таким образом, при любом содержании водорастворимого хлора в профиле почвы вариантов опыта, его содержание было наименьшим и наиболее динамичным в верхнем пахотном слое.

Следует сказать, что ПДК и ОДК хлора в почвах до настоящего времени не разработаны (СанПиН 1.2.3685-21). Однако, судя по состоянию растений в нашем опыте, их росту, развитию и продуктивности, длительное ежегодное внесение повышенных доз хлористого калия не привело к накоплению в почве токсичных концентраций этого галогена. Вероятно, избыток хлора вымывался за пределы почвенного профиля с нисходящими потоками влаги, а также терялся в составе воды, испаряемой с поверхности почвы. Аналогичные результаты были получены и в исследованиях других авторов [11, 21].

Содержание подвижной серы в исследованной целинной серой лесной почве по имеющимся градациям [15, 32] можно охарактеризовать как низкое (≈ 3 мг/кг). Длительное сельскохозяйственное использование почвы без применения серосодержащих удобрений способствовало дальнейшему истощению почвенных запасов подвижной серы (табл. 3, 4); ее содержание в почве закономерно снизилось по мере роста урожайности культур в вариантах опыта, свидетельствуя о заметном потреблении этого элемента выращиваемым картофелем. Отметим, что уменьшение содержания подвижной серы произошло главным образом в пахотном слое почвы и было значительно меньше в подпахотном; ниже по профилю видимых изменений не наблюдали (табл. 4). Тем не менее, можно полагать, что нарастающий дефицит фонда серы в почвах интенсивных агроценозов негативно отразится на урожае и его качестве, особенно для культур, нормируемых по содержанию белка [15].

Следует сказать, что содержание подвижной серы в пахотном слое почвы вариантов с дефицитным ее балансом, довольно быстро (за 2–3 вегетации), снизившись до примерно 2 мг/кг, в дальнейшем практически не изменялось. Достигнутый стабильно низкий уровень является, вероятно, характерным для данной почвы в сформировавшихся условиях агроценоза и поддерживается за счет как перманентной минерализации почвенного органического вещества, так и процессов влаго- и солепереноса. Атмосферные осадки в исследованном регионе (вне промышленных территорий) содержат 4–6 мг сульфат-иона/л, а в составе испаряемой с поверхности почвы влаги присутствует ≈ 4 мг/л этого аниона [31].

Использование в качестве калийного удобрения сернокислого калия даже в невысоких дозах существенно интенсифицировало баланс серы в опыте и способствовало значительному увеличению содержания подвижной серы в почве соответствующих вариантов в прямой зависимости от доз внесенного сульфата калия (табл. 3). Систематическое применение сульфата калия в вариантах опыта привело к достоверному увеличению содержания подвижной серы в профиле почвы (табл. 4), демонстрируя как повышенную миграционную способность сульфат-ионов, так и их способность накапливаться по всему почвенному профилю, в т.ч. в нижней его части. В то же время очевидно, что внесенная с удобрениями сера в основном аккумулировалась в верхней корнеобитаемой части почвенного профиля, оставаясь недоступной для выращиваемых культур даже с относительно слабо развитой корневой системой, например, картофеля.

ВЫВОДЫ

1. Результаты исследования подтвердили важность оптимизации калийного режима в агроценозах. Наивысшая урожайность картофеля в проведенном опыте (порядка 250 ц/га) была получена при сбалансированном внесении калийных удобрений (на фоне NP), эффективность эквивалентных доз различных форм калийных удобрений – хлорида и сульфата – находилась примерно на одном уровне.

2. При оптимальной обеспеченности калием содержание этого элемента в клубнях в период уборки составляло 1.5–1.8, в ботве – 1.7–2.2%, накопление калия в растительной продукции при использовании сульфата было заметно больше по сравнению с хлоридом. Внесение хлористого калия обуславливало достоверное повышение содержания хлора в картофеле – с 0.19–0.24 до 0.25–0.34%, при применении сульфата этот показатель оставался без изменений. Использование возрастающих доз сернокислого калия сопровождалось увеличением содержания серы в картофеле с 0.16–0.27 до 0.19–0.39%, тогда как при применении хлорида калия этот показатель снижался, отражая, вероятно, определенный дефицит серы.

3. Вынос калия урожаем картофеля при использовании повышенных доз калийных удобрений достигал 120–124 кг/га, основная часть выноса приходилась на клубни. В вариантах без внесения калийных удобрений вынос картофелем хлора составлял 6–8 кг/га, применение возрастающих доз сульфата калия не отразилось на выно-

се хлора, а хлорида – увеличило до 19 кг/га. Вынос серы в контрольном и фоновом вариантах опыта составлял 5–7 кг/га, по мере увеличения доз внесенных калийных удобрений (и соответственно урожайности картофеля) потребление серы возрастало до 10 кг/га в вариантах с хлоридом калия и до 15 кг/га – с сульфатом.

4. Бездефицитный баланс калия в вариантах опыта формировался при систематическом внесении калийных удобрений в дозах не менее 90 кг/га, независимо от их формы. Положительный баланс хлора и серы складывался при любых использованных в опыте дозах хлорида и сульфата калия.

5. При перманентном сильно дефицитном балансе калия существенное снижение в почве содержания его обменной формы происходило в пахотном и подпахотном слоях, а накопление при положительном балансе – только в верхнем пахотном слое. Положительный баланс хлора и серы обуславливал достоверное накопление этих элементов по всему почвенному профилю. Дефицитный баланс хлора или серы слабо отражался на содержании подвижных форм соответствующего элемента в профиле почвы.

6. Установленные закономерности накопления в растениях и почве агроценоза компонентов калийных удобрений будут способствовать повышению эффективности их использования и научно обоснованному регулированию почвенного плодородия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Паников В.Д., Минеев В.Г. Почва, климат, удобрение и урожай. М.: Агропромиздат, 1987. 512 с.
2. Минеев В.Г., Бычкова Л.А. Состояние и перспективы применения минеральных удобрений в мировом и отечественном земледелии // Агрохимия. 2003. № 8. С. 5–12.
3. Кудяров В.Н., Семенов В.М. Оценка современного вклада удобрений в агрогеохимический цикл азота, фосфора и калия // Почвоведение. 2004. № 12. С. 1440–1446.
4. Этурно Ф. Основные принципы пропагандирования калийных удобрений // Агрохимия. 1993. № 11. С. 76–81.
5. Алехина Н.Д., Балконин Ю.В., Гавриленко В.Ф. Физиология растений. М.: Академия, 2005. 640 с.
6. Орлов Д.С., Садовникова Л.К., Лозановская И.Н. Экология и охрана биосферы при химическом загрязнении. М.: Высш. шк., 2002. 334 с.
7. Шеуджен А.Х. Биогеохимия. Майкоп: Адыгея, 2003. 1028 с.
8. Шипилова М.А. Некоторые итоги поставок минеральных удобрений в 2004 году по Новосибирской области // Сел. новости. 2004. № 12. С. 15–16.
9. Сведения о внесении удобрений в сельскохозяйственных предприятиях Новосибирской области: Стат. бюл. Новосибирск: Новосибоблкомстат, 2001. 30 с.
10. Минеев В.Г. Агрохимия и экологические функции калия. М.: Изд-во МГУ, 1999. 332 с.
11. Прокошев В.В., Дерюгин И.П. Калий и калийные удобрения. М.: Ледум, 2000. 185 с.
12. Якименко В.Н. Калий в агроценозах Западной Сибири. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2003. 231 с.
13. Беляев Г.Н. Калийные удобрения из калийных солей Верхнекамского месторождения и их эффективность. Пермь: Перм. кн. изд-во, 2005. 304 с.
14. Фрумина Н.С., Лисенко Н.Ф., Чернова М.А. Хлор. М.: Наука, 1983. 200 с.
15. Аристархов А.Н. Агрохимия серы. М.: ВНИИА, 2007. 272 с.
16. Харьков Д.В. Результаты многолетних полевых опытов с формами калийных удобрений // Калийные удобрения. М.: Колос, 1964. С. 57–92.
17. Танин К.А. Перемещение сульфат- и хлор-ионов по профилю почвы // Там же. С. 196–207.
18. Алексеева Е.Н. Миграция подвижной серы по профилю чернозема при внесении удобрений // Агрохимия. 1975. № 6. С. 93–95.
19. Мочалова А.Д., Забавская К.М. Баланс хлора при длительном внесении калийных удобрений на дерново-подзолистой почве // Агрохимия. 1976. № 8. С. 48–52.
20. Вальников И.У. Действие серосодержащих удобрений на агрохимические свойства серых лесных почв и выщелоченных черноземов // Агрохимия. 1981. № 8. С. 58–63.
21. Назарюк В.М., Маслова И.Я. Изучение возможности систематического использования хлорсодержащих калийных удобрений в овощеводстве Западной Сибири // Агрохимия. 1990. № 7. С. 45–52.
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. Панасин В.И., Новикова С.И., Рымаренко Д.А. Сера в земледелии Калининградской области // Плодородие. 2016. № 3. С. 6–8.
24. Лукин С.М., Жуйков Д.В. Мониторинг содержания серы в почвах, растениях и органических удобрениях // Земледелие. 2019. № 2. С. 10–12.
25. Убугунов Л.Л., Меркушева М.Г. Удобрение картофеля. Новосибирск: СО РАН: Наука, 2019. 264 с.
26. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта. М.: Агропромиздат, 1985. 351 с.

27. Агрохимические методы исследования почв. М.: Наука, 1975. 656 с.
28. Практикум по агрохимии / Под ред. В.Г. Минеева. М.: Изд-во МГУ, 1989. 304 с.
29. Якименко В.Н. Влияние калийных удобрений на урожайность и качество клубней картофеля в лесостепи Западной Сибири // Агрохимия. 2017. № 9. С. 39–48.
30. Забавская К.М., Пименов Е.А. Влияние доз калийных удобрений на урожай и качество культур // Агрохимия. 1980. № 10. С. 152–164.
31. Казанцев В.А. Проблемы педогалогенеза. Новосибирск: Наука, 1998. 280 с.
32. Методические указания по применению удобрений, содержащих серу. М.: МСХ СССР, 1983. 24 с.

Influence of Different Forms and Doses of Potash Fertilizers on the Balance of Potassium, Chlorine and Sulfur in the Gray Forest Soil of the Forest-Steppe of Western Siberia

V. N. Yakimenko

Institute of Soil Science and Agrochemistry

Siberian Division, Russian Academy of Science, prosp. Lavrentyeva, 8/2, Novosibirsk 630090, Russia

E-mail: yakimenko@issa-siberia.ru

The results of a field experiment on the gray forest soil of the forest-steppe of Western Siberia to study the effectiveness of applying increasing doses of various forms of potash fertilizers (against the background of NP) for potatoes are presented. The content of potassium, chlorine and sulfur in plant products was determined, the removal of these elements by the harvest was established, their economic balance was calculated. The influence of the balance of individual components of potash fertilizers on the content and distribution of mobile forms of the corresponding elements in the soil profile is shown.

Key words: potash fertilizers, potatoes, gray forest soil, balance, potassium, chlorine, sulfur, forest-steppe, Western Siberia.