

631.416.4/.8:633.491:631.445.25

ВЗАИМОВЛИЯНИЕ КАЛИЯ И МАГНИЯ ПРИ ВЫРАЩИВАНИИ КАРТОФЕЛЯ НА СЕРОЙ ЛЕСНОЙ ПОЧВЕ

© 2021 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 26.11.2020 г.

После доработки 09.12.2020 г.

Принята к публикации 11.02.2021 г.

На серой лесной среднесуглинистой почве показаны изменения продуктивности картофеля, особенности потребления им калия и магния при совместном использовании различных доз калийных и магниевых удобрений (на фоне NP); рассчитан вынос и баланс этих элементов. Установлена специфика взаимодействия калия и магния при совместном внесении в почву на почвенное содержание их легкообменной и обменной форм.

Ключевые слова: агроценоз, почва, картофель, удобрения, калий, магний.

DOI: 10.31857/S0002188121050136

ВВЕДЕНИЕ

Калий и магний выполняют ряд существенных физиологических функций в растительном организме и являются важными и незаменимыми элементами минерального питания растений. Общие запасы калия и магния в большинстве минеральных почв довольно значительны, и зависят прежде всего от их минералогического и гранулометрического состава, а также типа почвообразования. По обобщенным литературным данным, валовое содержание калия в почвах земледельческой зоны умеренного пояса в среднем составляет 1.5–2.5% [1–3], магния – 0.5–1.5% [4, 5]. Относительно высокое валовое содержание калия и магния в основных пахотных почвах при достаточно равномерном распределении по почвенному профилю служит зачастую обоснованием для невнимания к регулированию режима этих элементов в агроценозах. Однако уже достаточно давно в научной печати сообщается о нарастающем истощении фонда калия и магния в агропочвах не только легкого, но и более тяжелого гранулометрического состава [1, 2, 6–14]; эти процессы значительно усиливаются в интенсивных агроценозах. В этой связи исследования по изучению трансформации калийного и магниевых состояний почв при их сельскохозяйственном использовании представляются достаточно актуальными.

Для эффективного регулирования минерального питания выращиваемых культур необходимо знать и учитывать специфику взаимодействия

отдельных элементов, в т.ч. калия и магния, в системе почва–растение. В ряде проведенных ранее научных работ [5–7, 9, 12–18] установлено антагонистическое в целом взаимодействие между одновалентными катионами H^+ , NH_4^+ , K^+ , с одной стороны, и Ca^{2+} и Mg^{2+} , с другой, в почвенных процессах адсорбции–десорбции и при поглощении этих элементов растениями из почв и удобрений. В то же время показано, что в зависимости от абсолютного количества определенных ионов в почвенном растворе и их соотношения между ними могут возникать как явления антагонизма, так и синергизма [19]. В опытах, по мере увеличения концентрации калия в питательном растворе при невысоком исходном его содержании, поглощение растениями кальция сначала значительно ускорялось (синергизм), затем замедлялось и далее резко уменьшалось (антагонизм) [19].

Особенности взаимодействия отдельных элементов могут кардинально меняться в зависимости от действия различных факторов. Установлено, что на характер взаимодействия K и Mg, их эффективность, существенное влияние оказывают условия внешней среды, вид и даже сорт выращиваемой культуры [5–9, 12–14, 19–21].

В целом можно сказать, что имеющиеся литературные данные по взаимодействию калия и магния в процессе выращивания сельскохозяйственных растений не всегда однозначны. Вероятно, это связано с различиями почвенно-климатиче-

Таблица 1. Урожайность картофеля в микрополевом опыте на серой лесной почве, кг/делянку

Вариант	Клубни				Ботва			
	2018 г.	2019 г.	2020 г.	среднее	2018 г.	2019 г.	2020 г.	среднее
1. Без удобрений	0.53	0.44	0.37	0.45	0.18	0.13	0.14	0.15
2. NP	0.75	0.57	0.49	0.60	0.29	0.29	0.33	0.30
3. NP + K-1	0.87	0.81	0.72	0.81	0.32	0.34	0.47	0.38
4. NP + K-1 + Mg-1	1.01	0.89	0.81	0.90	0.44	0.32	0.48	0.41
5. NP + K-1 + Mg-2	0.78	0.78	0.70	0.75	0.28	0.38	0.52	0.39
6. NP + K-2	0.92	0.83	0.76	0.84	0.37	0.33	0.52	0.41
7. NP + K-2 + Mg-1	0.94	0.82	0.76	0.84	0.35	0.34	0.47	0.39
8. NP + K-2 + Mg-2	0.76	0.73	0.73	0.74	0.34	0.33	0.46	0.38
<i>HCP</i> ₀₅	0.11	0.13	0.12	0.11	0.10	0.06	0.07	0.08

Примечание. Нумерация вариантов та же в табл. 2, 3.

ских условий проведения исследований, варьированием вносимых доз удобрений, биологическими особенностями возделываемых культур. Учитывая важность оптимизации режима калия и магния в агроценозах, проведение дальнейших исследований по этой проблематике с учетом региональной специфики является целесообразным.

Цель работы – в полевом опыте на серой лесной почве оценить эффективность совместного внесения калия и магния на урожайность картофеля, содержание этих элементов в растительной продукции и почве.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Микрополевой опыт на серой лесной средне-суглинистой старопашотной почве проводили в 2018–2020 гг. на научно-исследовательском стационаре ИПА СО РАН (Новосибирская обл., Искитимский р-н). В опыте использовали почву с однородными агрохимическими свойствами: содержание обменного калия (1 М $\text{CH}_3\text{COONH}_4$) перед закладкой опыта составляло 10,2, обменного магния – 7,3 мг/100 г почвы. Каждая делянка размером 0,5 × 0,5 м для максимального снижения влияния соседних вариантов и окружающей почвы была изолирована по периметру полиэтиленовой пленкой до глубины 0,4 м (до горизонта В). На каждой делянке выращивали одно растение картофеля сорта Джелли, клубни перед посадкой тщательно калибровали.

Схема опыта показана в табл. 1, повторность пятикратная. Дозы макроэлементов составляли (г д.в./делянку): N – 2,5, P – 1,5, K-1 – 2,5, K-2 – 3,8, Mg-1 – 1,25, Mg-2 – 2,5. Удобрения в форме аммонийной селитры, двойного суперфосфата, хлористого калия и окиси магния вносили ежегодно перед посадкой клубней. В пересчете на кг д.в./га использованные в опыте дозы примерно были

равны: N – 100, P – 60, K-1 – 100, K-2 – 150, Mg-1 – 50, Mg-2 – 100. В ранее проведенных исследованиях [2, 22] в расположенном рядом полевом опыте с картофелем на аналогичной почве доза NPK-1 была установлена как оптимальная.

Почвенные и растительные образцы на анализ отбирали во время уборки урожая и анализировали стандартными, общепринятыми методами [23, 24]. Содержание элементов в растительной продукции определяли после мокрого озоления по Гинзбург. Почвенные формы калия и магния экстрагировали: легкообменную – вытяжками 0,0025 М и 0,025 М раствора CaCl_2 , обменную – 1 М $\text{CH}_3\text{COONH}_4$, подвижный Mg – 1 М KCl и определяли их содержание в вытяжках на атомно-абсорбционном спектрометре “Квант-2А”.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Различная интенсивность применения минеральных удобрений в вариантах опыта соответствующим образом отразилась на продуктивности картофеля (табл. 1). В контрольном варианте продуктивность растений лимитировалась дефицитом всех макроэлементов, в фоновом – калия и магния. Очевидно, что почвенные запасы этих элементов не обеспечивали полноценный рост и развитие картофеля. Наивысшая в опыте урожайность была получена в варианте с оптимизированным минеральным питанием (NP + K-1 + Mg-1), особенно отчетливо это проявилось в первый год проведения опыта в условиях отсутствия какого-либо последствия ранее внесенных удобрений. Совместное применение калия и магния в таких дозах и соотношении (на фоне NP) обеспечивало полноценный продукционный процесс картофеля, повышая эффективность использования NP.

Таблица 2. Содержание сухого вещества и макроэлементов в картофеле в зависимости от уровня минерального питания, % (средние за 3 года)

Вариант, №	Клубни					Ботва				
	сухое вещество	К	Mg	N	P	сухое вещество	К	Mg	N	P
1	24.5	1.45	0.032	0.79	0.46	15.8	0.66	0.17	0.94	0.31
2	23.3	1.16	0.036	1.15	0.54	15.8	0.42	0.17	1.12	0.39
3	23.5	1.57	0.046	1.33	0.45	14.2	0.78	0.17	1.20	0.39
4	23.5	1.56	0.046	1.36	0.42	14.3	0.82	0.18	1.22	0.38
5	23.0	1.50	0.050	1.35	0.47	14.0	0.96	0.20	1.14	0.37
6	23.0	1.68	0.050	1.35	0.43	14.2	0.86	0.16	1.26	0.35
7	23.3	1.64	0.052	1.36	0.46	13.9	1.12	0.16	1.34	0.33
8	23.2	1.60	0.058	1.28	0.47	13.7	1.40	0.16	1.24	0.32
<i>HCP</i> ₀₅	1.4	0.12	0.009	0.26	0.08	0.9	0.37	0.02	0.23	0.06

Внесение повышенной дозы магния (Mg-2) дополнительно к NP + K-1 обесценивало действие и калия, и самого магния – урожайность клубней снижалась практически до уровня варианта NP. При относительном увеличении концентрации магния в почвенном растворе его взаимодействие с калием стало носить явно антагонистический характер.

Повышение дозы внесенного калия в варианте NP + K-2 сопровождалось тенденцией к росту урожайности картофеля по сравнению с вариантом NP + K-1, т.е. увеличение уровня калийного питания (в данном интервале) в целом положительно влияло на растения. Однако дополнительное внесение магния на повышенном калийном фоне не оказывало видимого воздействия на продуктивность картофеля – урожайность клубней в вариантах NP + K-2 и NP + K-2 + Mg-1 была одинаковой. Очевидно, что повышенный фон калия затруднял магниевое питание картофеля. При этом дальнейшее увеличение дозы магния в варианте NP + K-2 + Mg-2 привело лишь к снижению эффективности продукционного процесса растений.

Биомасса ботвы картофеля, в отличие от клубней, мало зависела от уровня калийно-магниевое питания (табл. 1); во всех вариантах NPK и NPK-Mg она была примерно одинаковой и по продуктивности, и по внешнему виду. Следовательно, все особенности влияния калия и магния на рост и развитие растений отражались главным образом на запасующих и репродуктивных органах и в значительно меньшей степени – на вегетативных органах.

Уровень минерального питания картофеля оказывал влияние на поступление макроэлементов в растительную продукцию (табл. 2). Содержание калия в картофеле хорошо отражало уро-

вень его калийного питания, устойчиво возрастая и в ботве, и в клубнях в ряду вариантов NP → NP + K-1 → NP + K-2. Дополнительное внесение магния несколько тормозило поступление калия в клубни, оказывая определенное антагонистическое воздействие. В то же время усиление магниевое питания заметно повышало накопление калия в ботве, вызывая некоторый синергетический эффект. Тем самым подтверждена возможность противоположного взаимодействия между элементами при их поглощении различными органами растений [19].

По мере оптимизации калийного питания картофеля (NP → NP + K-1 → NP + K-2) отметили очевидную тенденцию к увеличению поступления почвенного магния в клубни. Дополнительное внесение магниевых удобрений способствовало дальнейшему росту его концентрации в запасующих органах. Иной характер поглощения магния наблюдали в вегетативных органах. Умеренное калийное питание картофеля в варианте NP + K-1 не изменило содержание магния в ботве по сравнению с вариантом NP, а дополнительное внесение магниевых удобрений заметно увеличило его накопление. Высокие дозы калия (K-2) в значительной степени блокировали поступление магния в вегетативные органы при всех использованных в опыте его дозах, демонстрируя явное антагонистическое воздействие. Очевидно, что характер и эффективность взаимовлияния калия и магния в процессе потребления растениями в значительной степени зависели от их концентрации и соотношения в почвенном растворе.

Содержание азота и фосфора в растительной продукции было примерно одинаковым во всех вариантах с их внесением и слабо зависело от уровня калийно-магниевое питания картофеля. Количество сухого вещества в клубнях было

Таблица 3. Среднегодовой баланс калия и магния в опыте, г/делянку

Вариант, №	Калий					Магний				
	вынос			приход	баланс	вынос			приход	баланс
	клубни	ботва	общий			клубни	ботва	общий		
1	1.6	0.2	1.8	—	–1.8	0.04	0.04	0.08	—	–0.08
2	1.6	0.2	1.8	—	–1.8	0.05	0.08	0.13	—	–0.13
3	3.0	0.4	3.4	2.5	–0.9	0.09	0.09	0.18	—	–0.18
4	3.3	0.5	3.8	2.5	–1.3	0.10	0.11	0.21	1.25	+1.04
5	2.6	0.5	3.1	2.5	–0.6	0.09	0.11	0.20	2.50	+2.30
6	3.3	0.5	3.8	3.8	0	0.10	0.09	0.20	—	–0.20
7	3.2	0.6	3.8	3.8	0	0.10	0.09	0.19	1.25	+1.06
8	2.8	0.7	3.5	3.8	+0.3	0.10	0.08	0.18	2.50	+2.32

близким во всех удобренных вариантах, а в ботве заметно снижалось по мере увеличения дозы внесенных удобрений.

В общей структуре выноса калия картофелем подавляющая часть приходилась на клубни (табл. 3); соотношение выноса калия между клубнями и ботвой в вариантах опыта варьировало в пределах (4–8) : 1, при соотношении 6.6 : 1 в оптимальном варианте NP + K-1 + Mg-1. В этой связи можно полагать, что способ использования ботвы картофеля в агропроизводстве (остается на поле или ее вывозят) мало отразится на общем выносе и балансе калия в агроценозе. Удельное потребление калия при сбалансированном минеральном питании (вариант NP + K-1 + Mg-1) составляло 4.2 г/кг клубней с учетом ботвы.

Внесение NP-удобрений в фоновом варианте не способствовало дополнительной мобилизации почвенного калия по сравнению с контрольным вариантом; вынос калия возрастал с увеличением дозы калийного удобрения. Наибольший продуктивный вынос калия отмечен в варианте NP + K-1 + Mg-1. Вероятно, совместное внесение умеренных доз калия и магния сопровождалось определенным синергетическим эффектом, оптимизируя минеральное питание картофеля. Внесение повышенных доз магния (Mg-2) на всех фонах калийного питания снижало потребление калия растениями, оказывая очевидное антагонистическое воздействие.

Вынос картофелем магния был в 15–20 раз меньше, чем калия. При всех уровнях минерального питания растений в опыте соотношение выноса магния клубнями и ботвой примерно равнялось 1. Удельное потребление магния при сбалансированном питании составляло 0.23 г/кг клубней с учетом побочной продукции.

По мере оптимизации питания картофеля в ряду вариантов контроль → фон → NP + K-1 →

→ NP + K-1 + Mg-1 вынос магния заметно увеличился как из почвенных запасов, так и, вероятно, из удобрений. Несмотря на относительно малое потребление магния картофелем, дополнительное внесение умеренных, сбалансированных доз магниевого удобрения (на фоне NPK) существенно увеличивало продуктивность культуры (табл. 1). Высокие дозы калия (K-2) оказывали антагонистическое воздействие на потребление магния. При дополнительном внесении магния, особенно в повышенной дозе (Mg-2), отрицательное воздействие на растения лишь усиливалось.

В контрольном и фоновом вариантах опыта в условиях отсутствия дополнительного поступления калия закономерно формировался дефицитный его баланс. Однако и при внесении калийных удобрений в дозе K-1 в вариантах опыта баланс калия продолжал оставаться дефицитным; дополнительное использование магниевого удобрения (Mg-1) увеличивало дефицит калийного баланса в связи с интенсификацией продукционного процесса картофеля. Отметим, что допустимость и оправданность слабдефицитного баланса калия в агроценозе была показана в ранее проведенных исследованиях [1, 2]. Бездефицитный баланс калия в опыте складывался в вариантах с применением повышенной дозы калийного удобрения (K-2) как отдельно, так и совместно с магнием.

В вариантах опыта без внесения магния дефицит его баланса, несмотря на небольшую абсолютную величину, устойчиво нарастал по мере увеличения урожайности картофеля (табл. 1, 3). Очевидно, что при перманентном истощении почвенных запасов магния в интенсивных агроценозах, продуктивность выращиваемых культур может быть существенно лимитирована. Использование магниевых удобрений в опыте обеспечи-

Таблица 4. Содержание обменного калия и магния (вытяжка 1 М раствора $\text{CH}_3\text{COONH}_4$) в почве опыта, мг/100 г почвы

Вариант	Калий			Магний		
	2018 г.	2019 г.	2020 г.	2018 г.	2019 г.	2020 г.
Без удобрений	10.7	10.6	10.7	7.7	8.0	8.0
NP	10.6	9.6	9.3	7.5	7.7	7.5
NP + K-1	14.2	13.4	14.2	7.7	8.0	7.2
NP + K-1 + Mg-1	14.8	13.5	13.7	11.1	18.0	18.7
NP + K-1 + Mg-2	15.0	13.7	13.3	13.3	24.0	26.7
NP + K-2	16.6	18.5	18.4	7.3	7.8	7.5
NP + K-2 + Mg-1	17.4	18.0	18.0	11.2	18.8	19.0
NP + K-2 + Mg-2	18.0	18.1	18.2	13.2	24.2	27.3
<i>HCP</i> ₀₅	1.4	1.2	2.1	1.3	1.8	2.5

вало выраженный положительный баланс этого элемента. При увеличении дозы (Mg-2) профицит баланса значительно возрастал, что, вероятно, было избыточным и нецелесообразным.

Баланс калия и магния, складывающийся в вариантах опыта, отражался в той или иной степени на содержании форм этих элементов в почве. Содержание обменного калия в почве вариантов без его внесения практически не изменилось за годы проведения опыта (табл. 4). Очевидно, что концентрация обменного калия в исходной старопашотной почве приблизилась к своему минимальному уровню, который уже не снижается при перманентном выносе элемента урожаями. Этот минимальный уровень обменного калия в почве, вероятно, составляют катионы, интрамицеллярно поглощенные почвенным комплексом и межслоевым пространством глинистых минералов, селективность этих катионов к обменным позициям почвенной матрицы выше, чем усваивающая способность выращиваемых культур. Данное количество обменного калия может быть извлечено из почвы соответствующими химическими экстрагентами, но в питании растений оно, по видимому, не участвует. О наличии в почвах минимального уровня обменного калия ранее сообщали в печати [2, 25, 26]. Аналогичная ситуация складывалась и с обменным магнием – во всех вариантах без применения магниевых удобрений уровень обменной формы этого катиона в почве был стабильным, независимо от урожайности картофеля и внесения или невнесения NPK-удобрений.

В вариантах опыта с применением калийных удобрений содержание обменного калия в почве заметно возрастало, пропорционально внесенной дозе: при применении K-2 оно было существенно больше, чем при дозе K-1. Примечательно, что рост содержания калия в почве отмечали и при

отрицательном его балансе. В ранее проведенных исследованиях [1, 2, 26–28] также была показана возможность повышения почвенного содержания обменного калия при систематическом использовании в агроценозах калийных удобрений со слабо дефицитным балансом.

Следует отметить, что в условиях примерно одинакового ежегодного поступления и выноса калия в конкретных вариантах опыта, содержание обменной формы этого катиона в почве стабилизировалось на определенном уровне, в т.ч. минимальном. Очевидно, это было связано с наличием в почве специфического соотношения между формами (обменной и необменной) калия, обусловленного качественным и количественным составом почвенных калийсодержащих компонентов, и регулируемого посредством процессов трансформации (фиксации и мобилизации) [2].

Дополнительное внесение магния очень слабо влияло на почвенный уровень содержания обменной формы калия. При разных внесенных дозах магния на одном том же калийном фоне содержание обменного калия в почве практически не изменялось. Вероятно, это было связано с тем, что поглотительная способность почвы по отношению к калию больше, чем к магнию, поступающие с удобрениями катионы магния не могли эффективно вытеснять калий с интрамицеллярных позиций, составляющих основу почвенного фонда обменных катионов.

Содержание обменного магния в почве вариантов опыта существенно возросло при внесении магниевых удобрений, по мере роста профицита его баланса почвенный уровень обменного магния стабильно увеличивался. Характер накопления магния в почве не изменялся в зависимости от имеющегося калийного фона – и при дозе K-1, и при K-2 магний депонировался одинаково. Воз-

Таблица 5. Изменение содержания форм калия и магния в почве при различной интенсивности использования удобрений, мг/100 г почвы (2020 г.)

Вариант	Экстрагент				
	0.0025 М CaCl ₂		0.025 М CaCl ₂		1 М KCl
	К	Mg	К	Mg	Mg
Без удобрений	0.37	0.57	4.4	4.5	6.2
NP	0.23	0.57	4.0	3.9	5.7
NP + K-1	1.17	0.47	6.6	3.7	4.9
NP + K-1 + Mg-1	1.02	1.20	6.0	7.4	14.0
NP + K-1 + Mg-2	0.85	1.67	5.7	8.8	22.7
NP + K-2	1.77	0.30	8.2	3.9	5.0
NP + K-2 + Mg-1	1.62	1.37	7.8	8.1	14.0
NP + K-2 + Mg-2	1.53	1.83	7.3	8.3	22.7
HCP ₀₅	0.17	0.16	1.5	0.8	2.5

можно, поступающие в почву катионы магния занимали “свободные” обменные позиции в почвенной матрице, либо вытесняли другие катионы, например, Ca.

Таким образом, результаты опыта свидетельствовали об индифферентном взаимовлиянии калия и магния на почвенное содержание их обменных форм; складывающийся в почве уровень содержания обменного калия и магния зависел только от применения или неприменения соответствующих удобрений и величины их доз.

Вытяжка 1 М уксуснокислого аммония (по методу Масловой) отражает общее содержание калия и магния на всех типах обменных почвенных позиций – и экстра-, и интрамицеллярных (главным образом), тогда как слабый раствор хлористого кальция вытесняет данные катионы только с наименее специфичных к ним позиций на планарных поверхностях глинистых минералов (экстрамицеллярно поглощенные) и в органическом веществе [2]. Эти легкообменные катионы составляют наиболее подвижную фракцию обменного пула и, соответственно, в наибольшей степени вовлечены в различные миграционные процессы, в т.ч. поглощение растениями. Уровень легкообменной фракции катиона дает представление о степени истощенности почвы, ее способности десорбировать данные ионы в почвенный раствор.

Результаты исследования показали, что внесенные в почву калий и магний оказывали заметное взаимовлияние на содержание легкообменных (вытяжка 0.0025 М CaCl₂) форм этих элементов (табл. 5). По нашим данным [2], при снижении уровня легкообменного калия <1 мг/100 г почвы

отмечали нарастающее лимитирование калийного питания растений, что и наблюдали в контрольном и фоновом вариантах рассматриваемого опыта. Использование калийных удобрений способствовало существенному повышению концентрации легкообменного калия (с 0.23–0.37 до 1.17–1.77 мг/100 г) пропорционально внесенной дозе. Однако при дополнительном применении магниевых удобрений отмечали явную тенденцию к снижению в почве содержания наиболее мобильной фракции калия; ионы магния активно конкурировали с калием за экстрамицеллярные позиции в ППК. При повышенных дозах магния, сопоставимых с калийными (K-1 и Mg-2, K-2 и Mg-2), происходило антагонистическое взаимодействие между этими ионами – содержание легкообменного калия в почве (фактически в почвенном растворе) достоверно снижалось, ухудшая соответственно условия калийного питания растений.

Одностороннее внесение калийных удобрений – дозы K-1 и особенно дозы K-2 – существенно снижало почвенное содержание легкообменного магния (с 0.57 до 0.47 и 0.30 мг/100 г соответственно), ограничивая обеспеченность картофеля этим элементом. Использование магниевых удобрений закономерно повышало концентрацию в почве наиболее мобильного магния (до 1.67–1.83 мг/100 г), причем, чем выше был калийный фон, тем значительно увеличивалось содержание этой формы магния, вероятно, из-за большей заполненности ионами калия специфических позиций в почвенном поглощающем комплексе.

При использовании в качестве экстрагента более сильного раствора хлористого кальция (0.025 М) количество калия и магния, извлекаемое из почвы, заметно возросло. Очевидно, эта вытяжка вытесняла данные катионы не только с неспецифических (планарных) позиций, но и с позиций с большей энергией связи. Экстрагируемое из почвы количество калия и магния было промежуточным между почвенным содержанием соответствующих легкообменных и обменных форм этих элементов. Содержание этой фракции почвенного калия в почве опыта закономерно увеличивалось при использовании калийных удобрений, однако дополнительное внесение возрастающих доз магния сопровождалось некоторым уменьшением содержания легкообменного калия. Количество магния, переходящего в вытяжку 0.025 М CaCl₂, было одинаковым при разных дозах совместно внесенных магниевых и калийных удобрений. Это свидетельствовало о том, что почвенные обменные позиции, на которых могли бы адсорбироваться катионы магния, преимущественно занимали ионы калия уже при дозе K-1. Таким об-

разом, можно полагать, что калий в определенной степени ингибировал накопление в почве легкообменного магния (вытяжка CaCl_2) и его поглощение растениями.

Вытяжка 1 М KCl по своим экстрагирующим возможностям была близка к раствору 1 М ацетата аммония, соответственно количество извлекаемого этими экстрагентами подвижного и обменного магния было примерно равным (табл. 4, 5). Можно полагать, что катионы калия и аммония при сопоставимой концентрации оказывали примерно одинаковое вытесняющее воздействие на магний почвенного поглощающего комплекса. Характер накопления в почве магния, извлекаемого 2-мя этими вытяжками, был одинаковым и зависел только от использованной дозы магниевого удобрения и не зависел от калийного фона.

В ранее проведенных нами исследованиях на зональных почвах Западной Сибири [2] разработаны градации обеспеченности почв калием на основании почвенного содержания его различных форм. В ряде научных работ [8, 9, 20], выполненных в разных почвенно-климатических регионах, предлагают или приводят различные уровни и градации обеспеченности почв доступным для растений магнием. Результаты рассматриваемого опыта свидетельствуют, что в исследованной среднесуглинистой почве содержание магния, при котором отмечают лимитирование продуктивности картофеля и достоверную прибавку от внесения магниевого удобрения (на фоне NPK) составляет: в вытяжке 0.0025 М CaCl_2 — <0.6 мг/100 г, 0.025 М CaCl_2 — <4–5, 1 М KCl — <6–7, 1 М $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ — <7–8 мг/100 г почвы. Оптимальный продукционный процесс картофеля при выращивании на данной почве будет происходить при содержании в ней магния, извлекаемого указанными выше экстрагентами, в следующем ряду: >1.1, 7.5–8.0, 10–12, 11–15 мг/100 г почвы соответственно.

Экстраполируя результаты проведенного опыта на полевые производственные условия, можно предположить, что при выращивании картофеля на почвах, близких по свойствам исследованной, оптимальной дозой магния будет 20–30 кг/га с совместным внесением 90–120 кг K_2O /га (на фоне N90–120P60). Применяемые в таком соотношении калийные и магниевые удобрения обеспечат взаимное благоприятное воздействие на поступление этих элементов в растения и продуктивность культуры, а также на их содержание в почве.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование показало эффективность сбалансированного внесения калийных и магниевых удобрений при выращивании карто-

феля на серой лесной среднесуглинистой почве, а также специфику взаимовлияния калия и магния при потреблении их растениями и в почвенных процессах.

Внесение калийных удобрений на фоне применения NP устойчиво повышало продуктивность картофеля, дополнительное использование умеренных доз магния (в соотношении $\text{K} : \text{Mg} \geq 2 : 1$) оптимизировало минеральное питание растений и обеспечивало дальнейший рост урожайности клубней. Однако совместное применение повышенных доз калия и магния в соотношении, близком к 1 : 1, оказывало существенное отрицательное воздействие на продуктивность картофеля, снижая ее до уровня варианта применения NP -удобрений, обесценивая тем самым действие и калия, и магния. Все особенности взаимовлияния калия и магния на рост и развитие картофеля отражались главным образом на запасающих органах (клубнях) и в значительно меньшей степени на вегетативных органах (ботве).

Взаимовлияние внесенных в почву с удобрениями калия и магния проявлялось прежде всего на почвенном содержании их легкообменных форм (фактически, почвенного раствора). Одностороннее внесение калийных удобрений существенно снижало содержание в почве легкообменного магния, ухудшая условия питания растений этим элементом. В то же время дополнительное внесение магния, особенно в повышенных дозах, сопровождалось заметным уменьшением содержания в почве наиболее мобильной фракции калия. Изменение почвенного содержания обменного калия и обменного магния зависело только от внесения (или невнесения) соответствующих удобрений и их доз. Накопление в почве обменной формы каждого из этих элементов не зависело от почвенного содержания другого элемента.

Результаты исследования свидетельствуют, что контроль за калийным и магниевым состоянием почв, оптимизация режимов этих элементов в интенсивных агроценозах заслуживают повышенного внимания. Для эффективного использования удобрений необходим учет особенностей взаимодействия калия и магния в питании растений и почвенных процессах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Прокошев В.В., Дерюгин И.П. Калий и калийные удобрения. М.: Ледум, 2000. 185 с.
2. Якименко В.Н. Калий в агроценозах Западной Сибири. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2003. 231 с.
3. Середина В.П. Калий и почвообразование. Томск: Изд-во Томск. ун-та, 2012. 354 с.

4. Панныков В.Д., Минеев В.Г. Почва, климат, удобрение и урожай. М.: Агропромиздат, 1987. 512 с.
5. Барбер С.А. Биологическая доступность питательных веществ в почве. М.: Агропромиздат, 1988. 376 с.
6. Мазаева М.М. Магниевое питание растений и магниевые удобрения: Автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук. М., 1967. 42 с.
7. Мазаева М.М. Об обеднении дерново-подзолистой почвы магнием и возможности проявления не-обеспеченности им растений при длительном применении НРК-удобрений // Агрохимия. 1977. № 9. С. 97–101.
8. Прокошев В.В., Неугодова О.В., Смирнов Ю.А., Государева З.И. Магниевые удобрения в интенсивном земледелии. М.: ВНИИТЭИ-агропром, 1987. 52 с.
9. Аристархов А.Н. Оптимизация питания растений и применение удобрений в агроэкосистемах. М.: ЦИНАО, 2000. 524 с.
10. Беляев Г.Н. Калийные удобрения из калийных солей Верхнекамского месторождения и их эффективность. Пермь: Перм. кн. Изд-во, 2005. 304 с.
11. Афанасьев Р.А. Магний в системе почва–растение–животное // Плодородие. 2005. № 5. С. 19–21.
12. Шильников И.А., Сычев В.Г., Зеленов Н.А. Известкование как фактор урожайности и почвенного плодородия. М.: ВНИИА, 2008. 340 с.
13. Богдевич И.М., Ломонос О.Л. Магниевые удобрения на дерново-подзолистых почвах: аналит. обзор. Минск: ИПА, 2009. 40 с.
14. Якименко В.Н. Изменение содержания калия и магния в профиле почвы длительного полевого опыта // Агрохимия. 2019. № 3. С. 19–29.
15. Барбер С.А., Хамберт Р.П. Достижения в познании связей калия в почве и растениях // Удобрения. М.: Колос, 1965. С. 249–281.
16. The role of potassium in agriculture. Madison, Wisc.: Amer. Soc. Agronomy, 1968. 508 p.
17. Nemeth K., Mengel K., Grimme H. The concentration of K, Ca and Mg in the saturation extracts in relation to exchangeable K, Ca and Mg // Soil Sci. 1970. V. 109. № 3. P. 179–185.
18. Potassium in agriculture. Madison. Wis.: Amer. Soc. Agronomy, 1985. 1223 p.
19. Магницкий К.П. Взаимосвязи в питании растений // Агрохимия. 1967. № 10. С. 32–46.
20. Тихомирова В.Я. Влияние свойств почв, удобрений, извести и погодных условий на обеспеченность магнием сельскохозяйственных растений // Агрохимия. 2011. № 5. С. 84–89.
21. Таврыкина О.М., Богдевич И.М., Пуятин Ю.В. Влияние возрастающих уровней обеспеченности дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы обменным магнием и удобрений на урожайность и качество зеленой массы кукурузы // Агрохимия. 2013. № 10. С. 39–45.
22. Якименко В.Н. Влияние калийных удобрений на урожайность и качество клубней картофеля в лесостепи Западной Сибири // Агрохимия. 2017. № 9. С. 39–48.
23. Практикум по агрохимии / Под ред. Минеева В.Г. М.: Изд-во МГУ, 1989. 304 с.
24. Муравин Э.А., Обуховская Л.В., Ромодина Л.В. Практикум по агрохимии. М.: КолосС, 2005. 288 с.
25. Никитина Л.В., Володарская И.В. Динамика обменного калия и его минимальные уровни в агроценозах на дерново-подзолистых почвах // Агрохимия. 2007. № 2. С. 14–18.
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. Носов В.В., Соколова Т.А., Прокошев В.В., Исаенко М.А. Изменение некоторых показателей калийного состояния дерново-подзолистых почв под влиянием применения калийных удобрений в длительных полевых опытах // Агрохимия. 1997. № 5. С. 13–19.
28. Якименко В.Н., Бойко В.С. Диагностика калийного состояния почв лесостепи Западной Сибири // Почвы и окружающая среда. 2019. Т. 2. № 2. С. 74.

Interaction of Potassium and Magnesium in Cultivation of Potatoes on Gray Forest Soil

V. N. Yakimenko

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

E-mail: yakimenko@issa-siberia.ru

In the studies carried out on gray forest medium loamy soil, changes in the productivity of potatoes, the peculiarities of their consumption of potassium and magnesium with the combined use of various doses of potash and magnesium fertilizers (against the background of NP) are shown, the removal and balance of these elements are calculated. The specificity of the mutual influence of potassium and magnesium was established when their readily exchangeable and exchangeable forms are introduced into the soil on the soil content.

Key words: agrocenoses, soil, potatoes, fertilizers, potassium, magnesium.