

ФИКСАЦИЯ КАЛИЯ И МАГНИЯ ПОЧВОЙ АГРОЦЕНОЗА[§]

© 2023 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 07.11.2022 г.

После доработки 29.11.2022 г.

Принята к публикации 15.12.2022 г.

Установлено, что почва агроценоза с длительным дефицитным балансом калия и магния фиксировала 60–70% калия, внесенного с удобрением, и 20–30% магния. При положительном балансе этих элементов в агроценозе фиксация почвой калия снижалась до 40, а магния – до 6–10%. Внесение возрастающих доз калийного удобрения не отражалось на почвенном уровне содержания обменного магния, использование магниевых удобрений не изменяло содержание в почве обменного калия. Совместное использование умеренных доз калийных и магниевых удобрений способствовало снижению фиксации калия на 10–16% по сравнению с раздельным его внесением, интенсивность фиксации магния при этом не изменялась. При повышенных дозах калия его фиксация почвой не зависела от дополнительного внесения магния, а фиксация магния существенно снижалась.

Ключевые слова: агроценоз, почва, калий, магний, фиксация.

DOI: 10.31857/S0002188123030134, **EDN:** KOHSQV

ВВЕДЕНИЕ

Эффективность минерального питания растений в агроценозах зависит не только от соотношения приходной и расходной статей баланса элементов-биофилов, но и во многом от интенсивности и направленности процессов трансформации почвенных форм этих элементов. Эти трансформации заключаются в возможности некоторых ионов, в т.ч. катионов калия и магния, занимать различные по прочности связи почвенные позиции и относятся к 2-м противоположно направленным, обратимым процессам – фиксации и мобилизации.

Под фиксацией почвой, например, калия или магния, обычно понимают переход катионов, находящихся в почвенном растворе или в обменной форме, в необменное, более прочно связанное с почвой состояние, в основе механизма данного процесса могут быть как явления физико-химического характера, так и изменения минералогического состава кристаллитов [1–5]. В ранее проведенных исследованиях показано, что фиксирующая способность почв в отношении калия зависит от их минералогического и гранулометрического состава, величины рН, содержания органического вещества, внесенной дозы удобрений, гидротермического режима и других факторов [6–11].

На эффективность минерального питания выращиваемых культур существенное влияние может оказывать характер взаимодействия вносимых элементов – антагонистический или синергетический, которое проявляется как в почвенных процессах адсорбции–десорбции, так и при поглощении ионов растениями [3, 12, 13]. Например, в ряде исследований отмечено антагонистическое в целом взаимодействие между одновалентными катионами H^+ , NH_4^+ , K^+ с одной стороны, и Ca^{2+} , Mg^{2+} с другой, при усвоении этих элементов растениями из почв и удобрений [14–17]. В то же время было 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 [3, 12, 18, 19]. Кроме того, специфика взаимовлияния отдельных элементов может значительно изменяться в зависимости от действия различных факторов. Установлено, что на характер взаимодействия К и Mg при поглощении растениями, эффективность их использования существенное влияние оказывают условия внешней среды и биологические особенности отдельных культур [3, 12, 14–17, 20, 21].

[§]Работа выполнена в рамках государственного задания ИПА СО РАН.

В целом проведенный анализ литературных данных показал, что основное внимание в исследованиях было уделено эффективности питания культур калием и магнием и их взаимовлиянию при различных уровнях содержания этих элементов в почвах агроценозов. Взаимодействие калия и магния в почвенных процессах, в т.ч. адсорбции–десорбции, изучено в значительно меньшей степени, что обуславливает целесообразность и актуальность проведения дальнейших исследований по этой проблематике.

Цель работы – установить специфику фиксации калия и магния при раздельном и совместном их внесении в почвы агроценозов с различной обеспеченностью этими элементами.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Определение фиксирующей способности почвы в отношении К и Mg проводили в лабораторном опыте при компостировании почвенных образцов с калийными и магниевыми удобрениями в режиме попеременного намачивания до наименьшей влагоемкости и высушивания при комнатной температуре: тем самым в определенной степени воспроизводили процесс, которому подвергается пахотный слой почв агроценозов в полевых условиях.

Почвенные образцы (слой 0–20 см) для компостирования были отобраны в различных вариантах длительного полевого и микрополевого опытов [19, 22], проводимых на серой лесной среднесуглинистой почве со следующими характеристиками: содержание физической глины – 31%, содержание гумуса – 4%, емкость катионного обмена – 21 мг-экв/100 г. Проведенный ранее [5] анализ минералогического состава почвы показал, что почвенная фракция физического песка состоит из кварца, полевого шпата и амфиболов, а фракция физической глины содержит (в убывающем порядке) гидрослюда мусковитового типа (иллит), хлорит, каолинит, вермикулит и дисперсный смектит.

В вариантах указанных полевых опытов при выращивании картофеля ежегодно применяли следующие дозы удобрений (кг/га): K1 – 100, K2 – 150, Mg1 – 50, Mg2 – 100. Варианты полевых опытов, в которых была отобрана почва для лабораторного эксперимента, дозы используемых в нем К и Mg, сроки компостирования указаны в таблицах. К и Mg в форме KCl и MgO вносили в почву в виде растворов. Сроки компостирования были приближены к продолжительности вегетационного периода. Дозы калия 5 и 10 мг/100 г почвы примерно соответствовали внесению 100 и 200 кг этого элемента/га пашни, а доза магния 2.5 мг – 50 кг/га, подобные дозы удобрений мож-

но реально использовать в практическом земледелии при выращивании овощных и пропашных культур в интенсивных технологиях [5].

Повторность в опытах четырехкратная. Фиксированными считали калий и магний, не переходящие в вытяжку 1 М раствора $\text{CH}_3\text{COONH}_4$, в которой определяли почвенное содержание обменной формы этих элементов [23].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Калий. Основой классификации почвенных форм калия является прочность связи элемента с твердой фазой почвы, что выражается в степени проявления физико-химических процессов (адсорбции, десорбции, замещения в кристаллической решетке) и ассоциированности с носителем (преимущественно, минеральным) той или иной калийной фракции. Весь калийный пул почв подразделяется на формы: обменный К (в т.ч. К почвенного раствора), приуроченный к почвенному органо-минеральному поглощающему комплексу, необменный К, дислоцирующийся в межслоевом пространстве трехслойных глинистых минералов, К минерального скелета, включенный в кристаллическую решетку первичных минералов [2, 3, 5].

В процессе эволюционного формирования почвы в ней складывается определенное соотношение между формами калия (прежде всего, относительно подвижными – обменной и необменной). Основная регуляторная роль процессов трансформации калия в почвах состоит в обеспечении и сохранении естественных пропорций между формами элемента. В этой связи процесс фиксации калия заключается в перераспределении поступающего в почву элемента по фракциям его почвенных форм для оптимизации соотношения между ними [5].

В нашем исследовании основное количество внесенного с удобрениями калия было зафиксировано почвой в первые же сутки опыта (табл. 1), возможно, что процесс фиксации калия (перераспределения между его формами) завершился в ряде случаев уже в первые часы или даже минуты взаимодействия почвы с вновь поступившими катионами. В дальнейшем необменное поглощение калия почвой различных вариантов опыта проходило по-разному. В вариантах с относительно истощенным почвенным калийным фондом (NP и NPMg1) дополнительную адсорбцию калия отмечали (при различной интенсивности) на протяжении всего лабораторного опыта (180 сут), тогда как в вариантах с предшествующим положительным балансом калия (NPK1 и NPK1Mg1) этот процесс практически завершился в начале опыта (1–15 сут), вероятно в связи с заполненно-

стью необменных позиций. В некоторых случаях отмечена дополнительная фиксация собственно калия почвы (исходного), в вариантах без его внесения с удобрениями (особенно в почве вариантов NPK1 и NPK1Mg1). Это было связано, по-видимому, с качественными изменениями, произошедшими с минеральной основой почвы при длительном попеременном намачивании и высушивании (например, агрегация коллоидов и т.п.).

Фиксация калия почвами может происходить, главным образом, двумя способами: 1 – иллитизация части набухающей минеральной фазы и 2 – непосредственное вхождение катионов калия на имеющиеся свободные позиции в кристаллической решетке минералов иллитового типа [1–5]. Учитывая, что основным глинистым минералом исследованной серой лесной среднесуглинистой почвы является гидрослюда, второй путь кажется наиболее вероятным.

Следует сказать, что калий, внесенный с удобрениями в почву в нашем эксперименте, никогда не фиксировался полностью – независимо от степени истощенности почвы в отношении калия и величины внесенной его дозы. Поступивший в почву калий всегда распределялся по его почвенным формам в соотношении более или менее приближенном к естественному (целинному). Однако данный процесс характерен для недеградированных почв и для “нешоковых” доз удобрений [5]. Используемые нами дозы калия, даже самая высокая, были сопоставимы с количеством его обменной формы, и почва вполне могла перераспределить их в рамках существующих природных пропорций между почвенными фракциями элемента. В этой связи заметим, что нередко исследователи в опытах по изучению фиксирующих свойств почв вносят калий в количествах (150–200 мг/100 г), многократно превышающих и реальные дозы удобрений, и подвижный почвенный калийный фонд. Очевидно, что результаты таких опытов трудно сопоставлять и трактовать для практических целей.

Объем необменного поглощения внесенного калия определяется емкостью фиксации почвы, зависящей от содержания глинистой фракции и ее минералогического состава, а также насыщенности калием почвенного поглощающего комплекса [5]. Почвы, имеющие большую емкость фиксации, могут не поглощать калий из-за высокой насыщенности им, а почвы, бедные этим элементом, не фиксируют повышенные дозы из-за низкой емкости поглощения. В разных вариантах нашего лабораторного опыта использовали одну почву – серую лесную, поэтому различия между ними в фиксации калия могли быть обусловлены внесенными его дозами и имеющимся уровнем почвенного содержания подвижных форм (а так-

же возможным влиянием сопутствующего катиона – Mg).

В опубликованных ранее работах [6–11] было показано влияние внесенных доз калия на процесс его фиксации почвами. В целом отмечено, что при внесении в почву возрастающих доз калия его количество, фиксируемое почвой, повышалось, а доля (от дозы) его фиксации – снижалась. Например, в опытах [24] количество калия, фиксируемого одной и той же почвой (черноземом выщелоченным), в зависимости от дозы внесенного калийного удобрения изменялось от 14 до 82%.

В нашем исследовании абсолютная величина калия, необменно поглощенного почвой, также закономерно возрастала при увеличении внесенной дозы (табл. 1). Например, в варианте NP при внесении в почву 5, 10 и 20 мг К/100 г было зафиксировано (перешло в необменную форму), соответственно, 3,4, 6,1 и 12,4 мг К, а в варианте NPK1 – 2,1, 4,1 и 9,0 мг. Однако доля фиксации калия удобрений (%) при этом практически не изменилась, составив в варианте NP 61–68% при разных дозах, а в варианте NPK1 – 41–45%. Таким образом, в варианте NP ≈35% внесенного калия (независимо от дозы) использовалось на пополнение почвенного содержания обменной формы элемента, а 65% – необменной, в варианте NPK1 – соответственно 55 и 45%. Это в очередной раз подтвердило регуляторную эффективность почвенных трансформационных процессов. Еще раз подчеркнем – речь идет о “нормальной” почве и адекватных дозах удобрений.

Фиксация (необменное поглощение) определенных количеств внесенного калия довольно точно подтверждается и прямым методом. Например, содержание необменного калия (вытяжка 1 М раствора HNO₃) в почве варианта NP до начала эксперимента составляло 126 мг/100 г, после внесения 20 мг К/100 г и компостирования в течение 180 сут оно возросло до 139 мг, увеличившись на 13 мг, т.е. соответствовало расчетной (по разности) величине фиксации калия удобрений. В варианте NPK1 в аналогичном случае содержание необменного калия изменилось от 136 до 145 мг/100 г почвы.

Интенсивность фиксации калия почвой существенно зависит от степени истощенности почвенного фонда подвижных калийных форм или, иными словами, степени заполненности специфических селективных для этого катиона позиций в минеральном комплексе. В нашем лабораторном эксперименте почва вариантов NP и NP-Mg1 с относительно истощенными калийными запасами фиксировала до 70% внесенного калия (табл. 1). В то же время почва вариантов NPK1 и NPK1Mg1, в которых в предшествующем поле-

Таблица 1. Изменение содержания обменного калия в почве (мг/100 г) вариантов полевого опыта при ее компостировании с удобрениями

Вариант	Внесено	Срок компостирования, сут					Фиксация К	
		1	15	30	90	180	мг	%
NP	H ₂ O	14.8	14.9	14.4	14.6	14.7	–	–
	5 мг К/100 г	18.0	17.1	17.2	17.0	16.3	3.4	68
	10 мг К/100 г	20.3	19.5	19.3	19.0	18.6	6.1	61
	20 мг К/100 г	22.8	22.0	21.3	21.8	22.3	12.4	62
	2.5 мг Mg/100 г	14.5	14.4	14.5	14.4	14.5	–	–
	5 мг Mg/100 г	14.4	14.8	14.6	14.5	14.6	–	–
	10 мг Mg/100 г	14.8	14.4	14.5	14.6	14.7	–	–
	5 мг К + 2.5 мг Mg	18.0	17.4	17.0	17.2	17.1	2.6	52
	10 мг К + 5 мг Mg	21.0	19.9	20.0	19.8	19.5	5.2	52
	20 мг К + 10 мг Mg	22.5	22.5	21.7	21.8	21.5	13.2	66
NPMg1	H ₂ O	14.0	14.0	13.8	13.7	13.6	–	–
	5 мг К/100 г	16.5	16.0	16.0	15.8	15.3	3.3	66
	10 мг К/100 г	19.3	19.0	18.0	17.8	17.3	6.3	63
	20 мг К/100 г	22.2	22.3	21.7	21.0	20.0	13.6	68
	2.5 мг Mg/100 г	14.0	14.1	13.8	13.9	14.0	–	–
	5 мг Mg/100 г	14.0	14.1	13.7	13.8	13.8	–	–
	10 мг Mg/100 г	14.0	14.1	13.8	13.8	13.8	–	–
	5 мг К + 2.5 мг Mg	17.0	16.1	16.1	16.0	15.6	3.0	60
	10 мг К + 5 мг Mg	19.5	19.0	18.0	18.0	17.6	6.0	60
	20 мг К + 10 мг Mg	22.5	22.0	21.0	20.5	20.0	13.6	68
NPK1	H ₂ O	18.0	18.1	18.2	17.1	16.6	–	–
	5 мг К/100 г	20.8	20.3	20.0	20.0	19.5	2.1	42
	10 мг К/100 г	24.3	24.0	23.8	23.2	22.5	4.1	41
	20 мг К/100 г	27.9	27.5	27.6	27.5	27.6	9.0	45
	2.5 мг Mg/100 г	18.1	18.3	18.2	17.3	16.6	–	–
	5 мг Mg/100 г	18.3	18.1	18.0	17.5	17.0	–	–
	10 мг Mg/100 г	18.5	18.8	18.7	18.0	17.1	–	–
	5 мг К + 2.5 мг Mg	21.3	21.2	20.4	20.2	20.0	1.6	32
	10 мг К + 5 мг Mg	23.9	23.5	23.8	23.6	23.5	3.1	31
	20 мг К + 10 мг Mg	27.9	27.3	27.6	27.5	27.8	8.8	44
NPK1Mg1	H ₂ O	18.3	18.0	17.7	17.0	16.6	–	–
	5 мг К/100 г	20.5	20.5	20.0	20.1	19.5	2.1	42
	10 мг К/100 г	23.5	23.3	23.0	23.0	22.6	4.0	40
	20 мг К/100 г	28.5	28.7	27.8	27.5	27.0	9.6	48
	2.5 мг Mg/100 г	18.1	18.0	18.0	17.0	16.3	–	–
	5 мг Mg/100 г	18.0	18.0	18.1	17.2	16.5	–	–
	10 мг Mg/100 г	18.1	18.0	18.0	17.3	16.1	–	–
	5 мг К + 2.5 мг Mg	21.2	21.2	21.0	20.5	19.8	1.8	36
	10 мг К + 5 мг Mg	23.9	23.3	23.6	23.5	23.6	3.0	30
	20 мг К + 10 мг Mg	28.0	27.7	27.5	27.6	27.6	9.0	45
<i>HCP</i> ₀₅		1.5	1.4	1.6	1.6	1.5		

Таблица 2. Изменение почвенного уровня содержания обменного калия и магния при внесении этих элементов в почву с повышенным их содержанием, мг/100 г почвы

Вариант	Внесено	Срок компостирования, сут					Зафиксировано	
		1	15	30	90	180	мг	%
Калий								
NPK ₂	H ₂ O	13.8	14.2	14.3	14.0	13.8	—	—
	10 мг К/100 г	20.6	19.9	19.6	19.7	19.6	4.2	42
	10 мг К + 5 мг Mg	20.3	20.1	19.6	19.5	19.3	4.5	45
NPK ₂	H ₂ O	20.7	20.5	20.3	20.3	20.3	—	—
	10 мг К/100 г	26.8	26.6	26.5	26.5	26.3	4.0	40
	10 мг К + 5 мг Mg	26.6	26.8	26.0	26.2	26.0	4.3	43
NPK ₂ Mg ₂	H ₂ O	20.8	20.3	20.6	20.5	20.6	—	—
	10 мг К/100 г	25.9	25.6	25.5	25.4	25.5	5.1	51
	10 мг К + 5 мг Mg	26.2	25.6	25.5	25.6	25.5	5.1	51
<i>HCP</i> ₀₅		1.8	1.7	1.9	1.8	1.8	—	—
Магний								
NPK ₂	H ₂ O	7.5	7.2	7.2	7.2	7.2	—	—
	5 мг Mg/100 г	10.9	10.5	10.4	10.4	10.4	1.8	36
	10 мг К + 5 мг Mg	10.5	10.9	10.4	10.4	10.4	1.8	36
NPK ₂ Mg ₂	H ₂ O	19.8	19.5	19.8	19.7	19.8	—	—
	5 мг Mg/100 г	25.1	24.8	24.5	24.4	24.5	0.3	6
	10 мг К + 5 мг Mg	25.3	25.2	24.4	24.3	24.2	0.6	12
NPK ₂ Mg ₂	H ₂ O	22.1	21.5	21.2	21.3	21.2	—	—
	5 мг Mg/100 г	25.5	25.0	24.7	24.6	24.7	1.5	30
	10 мг К + 5 мг Mg	25.2	25.2	24.9	24.8	24.9	1.3	26
<i>HCP</i> ₀₅		1.1	1.4	2.0	1.6	1.5	—	—

вом опыте поддерживался бездефицитный калийный баланс, фиксировала только ≈40% от поступившего калия удобрений, вероятно, в связи с определенной насыщенностью этим катионом адсорбирующих позиций в почвенной матрице. Отметим, что почва варианта NPK₂ (табл. 2), хотя и имела более высокое содержание калия по сравнению с вариантом NPK₁, фиксировала примерно такое же его количество — ≈40%. Очевидно, присущая почве буферность по отношению к калию позволяла сохранять пропорции между калийными формами, как в случае его дополнительного поступления извне, так и выноса. Данные пропорции зависят от сочетания почвенных позиций с различной селективностью к калию и

определяются качественным составом минеральной основы почв.

Магний. Формы магния в почве аналогичны калийным: он активный компонент катионообменного комплекса и почвенного раствора, входит в состав глинистых и первичных почвенных минералов. В отличие от калия, основным депо необменной формы которого является иллит (содержание К до 7%), магний дислоцируется главным образом в хлорите (до 23% Mg), вермикулите (12–17%) и смектите (до 6%) [3], все перечисленные минералы обладают трехслойной структурой, с некоторыми различиями по способности к набуханию. Учитывая близость природы носителей форм калия и магния в почвах, механизмы

почвенных процессов адсорбции–десорбции этих катионов принципиально не отличаются.

В нашем лабораторном эксперименте процесс фиксации магния почвой всех вариантов и при всех внесенных дозах практически завершился в первые же сутки (табл. 3), возможно это произошло уже на стадии перемешивания почвы с удобрениями. В дальнейшем на протяжении всего срока компостирования почвы (180 сут) содержание в ней обменного магния (а, следовательно, и дополнительная его фиксация) оставалось без изменений.

Дополнительная необменная адсорбция внесенного магния проявлялась в той или иной степени во всех вариантах опыта: полной его фиксации никогда не происходило, как и не наблюдалось отсутствия этого процесса. Исследованная серая лесная почва с ЕКО, равной 21 мг-экв/100 г, фиксировала 0.5–3.0 мг Mg/100 г в зависимости от дозы удобрения или 20–30% от внесенного количества, т.е. в 2–3 раза меньше, чем калия (табл. 1, 3). С увеличением внесенной дозы магния его количество, зафиксированное почвой, возрастало и в абсолютных (мг) и в относительных (%) показателях. Вероятно, при росте концентрации катионов магния в почвенном растворе возрастала и их возможность вытеснять другие катионы (например, Ca) с экстенсивно обменных и необменных позиций в почвенной матрице. При невысоких концентрациях ионы Mg заполняли лишь небольшую часть потенциально доступных необменных (фиксирующих) позиций.

Почва полевых опытов, отобранная в вариантах NP и NPK1 с длительным дефицитным балансом магния, фиксировала такое же его количество (20–30%), как и почва вариантов NPMg1 и NPK1Mg1 с заметно более высоким содержанием обменного Mg и, следовательно, повышенной им обеспеченностью.

В то же время почва варианта NPMg2, в котором ранее применяли завышенные дозы магниевых удобрений, практически перестала фиксировать дополнительно внесенный Mg (лишь 6%) (табл. 2). Очевидно, что фиксирующая способность почвы, в т.ч. и в отношении Mg, не безмерна, по мере заполнения каким-либо ионом селективных почвенных позиций, интенсивность его фиксации ослабевала вплоть до полного прекращения.

Существенно меньшая фиксация почвой магния по сравнению с калием обусловлена, на наш взгляд, следующими обстоятельствами. Во-первых, вынос калия урожаем культур существенно больше, чем магния (у картофеля – в 20 раз [19]). Поэтому, если обеспечение растений калием осуществляется в значительной степени за счет запасов его обменной формы, заметно истощая

этот фонд, то вынос магния может быть обеспечен и за счет его обменной формы, которая впоследствии и восполняется в первую очередь в случае дополнительного поступления магния извне. Отметим, что во всех вариантах опыта и при всех дозах (табл. 3), 70–80% внесенного магния расходовалось на пополнение почвенных запасов его обменной формы и соответственно 20–30% поглощалось необменно. Во-вторых, определенную роль сыграло, возможно, и относительно невысокое содержание в исследованной почве 2:1-глинистых минералов с расширяющимся типом решетки (монтмориллонит, вермикулит), обеспечивающих в основном необменное поглощение магния.

Взаимовлияние калия и магния при их фиксации почвой. В ранее проведенных исследованиях [19] показано индифферентное взаимовлияние раздельного внесения калия и магния на почвенное содержание их обменных форм, складывающийся в почве уровень обменного калия и магния зависел только от применения или неприменения соответствующих удобрений и их доз. При использовании магниевых удобрений характер его накопления в почве не изменялся в зависимости от имеющегося калийного фона, равно как и дополнительное внесение калия слабо влияло на почвенный уровень обменной формы магния. Стабильный уровень обменного калия или магния свидетельствовал, очевидно, и об отсутствии изменения уровня их необменных форм (т.е. дополнительной фиксации или десорбции). Однако при адсорбции почвой калия и магния из смешанных растворов их солей при совместном внесении они, вероятно, могли конкурировать между собой за специфические позиции в почвенной минеральной основе.

Отдельно отметим, что взаимовлияние K и Mg в почвенных процессах фиксации может в значительной степени проявляться в связи с качественными трансформациями калий- и магниесодержащих минералов в почвах интенсивных агроценозов [2–5]. Например, в исследованиях [2] установлено прямое превращение биотита в вермикулит, когда биотит являлся источником калия для растений в течение нескольких сезонов, в наших опытах [5] также отмечена тенденция к снижению содержания гидрослюд и возрастанию содержания вермикулита в почве вариантов с сильнодефицитным калийным балансом. По мнению [25], в почве, по-видимому, существует вся серия постепенных переходов между иллитом, с одной стороны, и вермикулитом и монтмориллонитом (смектитом), с другой. Такой деградированный иллит обладает очень высокой способностью к фиксации как калия, так и магния. Для трансформации иллита в вермикулит необходим гидроксид

Таблица 3. Изменение содержания обменного магния в почве (мг/100 г) вариантов полевого опыта при ее компостировании с удобрениями

Вариант	Внесено	Срок компостирования, сут					Фиксация Mg	
		1	15	30	90	180	мг	%
NP	H ₂ O	7.2	7.3	7.2	7.3	7.3	—	—
	5 мг K/100 г	7.2	7.2	7.3	7.3	7.2	—	—
	10 мг K/100 г	7.1	7.1	7.3	7.2	7.2	—	—
	20 мг K/100 г	7.2	7.0	7.3	7.3	7.2	—	—
	2.5 мг Mg/100 г	9.3	9.3	9.2	9.3	9.3	0.5	20
	5 мг Mg/100 г	11.3	11.2	11.1	11.2	11.2	1.1	22
	10 мг Mg/100 г	14.3	14.3	14.2	14.2	14.3	3.0	30
	5 мг K + 2.5 мг Mg	9.3	9.2	9.3	9.2	9.3	0.5	20
	10 мг K + 5 мг Mg	11.4	11.2	11.3	11.2	11.3	1.0	20
	20 мг K + 10 мг Mg	16.4	16.0	16.3	16.2	16.3	1.0	10
NPK1	H ₂ O	7.3	7.3	7.2	7.3	7.3	—	—
	5 мг K/100 г	7.3	7.3	7.3	7.2	7.3	—	—
	10 мг K/100 г	7.3	7.2	7.2	7.2	7.2	—	—
	20 мг K/100 г	7.3	7.3	7.3	7.2	7.3	—	—
	2.5 мг Mg/100 г	9.3	9.2	9.3	9.2	9.3	0.5	20
	5 мг Mg/100 г	11.0	11.0	10.9	10.8	10.9	1.4	28
	10 мг Mg/100 г	14.4	14.3	14.2	14.3	14.3	3.0	30
	5 мг K + 2.5 мг Mg	9.4	9.2	9.3	9.2	9.3	0.5	20
	10 мг K + 5 мг Mg	11.9	11.9	11.8	11.5	11.3	1.0	20
	20 мг K + 10 мг Mg	16.5	16.3	16.3	16.2	16.3	1.0	10
NPMg1	H ₂ O	11.4	11.4	11.3	11.2	11.3	—	—
	5 мг K/100 г	11.3	11.2	11.3	11.2	11.2	—	—
	10 мг K/100 г	11.3	11.2	11.2	11.2	11.2	—	—
	20 мг K/100 г	11.4	11.3	11.2	11.3	11.3	—	—
	2.5 мг Mg/100 г	13.6	13.6	13.5	13.5	13.3	0.5	20
	5 мг Mg/100 г	15.5	15.3	15.2	15.2	15.0	1.3	26
	10 мг Mg/100 г	18.8	18.8	18.7	18.6	18.6	2.7	27
	5 мг K + 2.5 мг Mg	13.5	13.4	13.3	13.3	13.3	0.5	20
	10 мг K + 5 мг Mg	15.5	15.4	15.3	15.3	15.2	1.1	22
	20 мг K + 10 мг Mg	18.9	18.8	18.7	18.6	18.6	2.7	27
NPK1Mg1	H ₂ O	15.4	15.3	15.2	15.2	15.3	—	—
	5 мг K/100 г	15.4	15.2	15.3	15.2	15.3	—	—
	10 мг K/100 г	15.3	15.3	15.3	15.3	15.2	—	—
	20 мг K/100 г	15.3	15.3	15.3	15.2	15.3	—	—
	2.5 мг Mg/100 г	17.8	17.5	17.5	17.5	17.3	0.5	20
	5 мг Mg/100 г	19.2	19.1	19.0	19.0	18.9	1.4	28
	10 мг Mg/100 г	22.5	22.4	22.4	22.3	22.3	3.0	30
	5 мг K + 2.5 мг Mg	17.7	17.5	17.4	17.4	17.3	0.5	20
	10 мг K + 5 мг Mg	19.5	19.4	19.3	19.2	19.2	1.1	22
	20 мг K + 10 мг Mg	23.5	23.5	23.0	23.0	22.8	2.5	25
<i>HCP</i> ₀₅		1.1	1.3	1.2	1.2	1.3	—	—

магния (брусит), а обратный процесс – иллитизация – превращение смектитовых структур в гидрослюды требует значительного дополнительного количества калия.

В рассматриваемом лабораторном опыте при внесении невысоких и средних доз калия (5 и 10 мг/100 г) совместно с соответствующими дозами магния фиксация калия почвой снижалась во всех вариантах – на 3–16% (табл. 1), особенно заметно в варианте NP с относительно истощенным подвижным фондом и калия, и магния. В то же время при использовании высокой дозы (20 мг) калийного удобрения совместно с магниевым фиксация калия не изменилась по сравнению с отдельным его внесением. Очевидно, что при относительно невысоком содержании калия и магния в почвенном растворе эти катионы могли более или менее активно конкурировать друг с другом за специфические адсорбирующие позиции в краевых зонах межпакетных промежутков кристаллитов и межслоевом пространстве минералов. При повышении концентрации калия он препятствует необменному поглощению катионов магния на “своих” позициях, демонстрируя преимущество катионов калия при поглощении почвой. Вероятно, ионы калия в значительной мере блокируют вход других ионов в межслоевое пространство минералов с расширяющейся решеткой – основное депо необменных катионов. Это подтверждается и взаимовлиянием калия и магния при фиксации почвами с повышенным содержанием этих элементов (табл. 2): то количество необменных позиций, которое может занять калий в почве, он занимает независимо от совместного внесения или не внесения магния.

Фиксация магния почвой с истощенным его фондом (варианты NP и NPK) при невысоких и средних дозах внесенных удобрений не различалась в случаях отдельного внесения магния и совместного с калием (табл. 2, 3). Однако при совместном внесении магния с высокой дозой калия фиксация магния резко снижалась – в 2 раза, с 20 до 10%, т.е. катионы калия при высокой концентрации блокировали необменное поглощение ионов магния. В вариантах опыта NPMg и NPK-Mg с неистощенным фондом подвижного магния его фиксация при всех использованных дозах удобрений не зависела от дополнительного совместного внесения калия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование на серой лесной среднесуглинистой почве выявило закономерности фиксации калия и магния при их отдельном и совместном внесении в почву агроценоза, в раз-

личной степени истощенную в отношении этих элементов.

Показано, что внесенные с удобрениями K и Mg распределяются в почве по формам этих элементов с учетом предшествующей истощенности их почвенных запасов и с соблюдением определенных пропорций между формами. Значительный вынос почвенного K урожаем культур в вариантах полевого опыта с дефицитным его балансом осуществлялся в основном за счет запасов необменной формы элемента, поэтому внесенный с удобрениями K поглощался преимущественно необменно. Многократно меньший вынос Mg обеспечивался, по-видимому, за счет его обменной формы и соответственно поступающий Mg удобрений адсорбировался главным образом обменно.

Количество фиксируемого почвой K в несколько раз превышало фиксацию Mg при сопоставимых дозах внесенных калийных и магниевых удобрений. Почва варианта NP с длительным дефицитным балансом K и Mg фиксировала до 60–70% внесенного калия и 20–30% магния. При длительном положительном калийном балансе и повышенном его содержании в почве (варианты NPK и NPKMg) фиксация калия снижалась до 40% от внесенной дозы, в то время как фиксация магния почвой с высоким его содержанием и невысоким уровнем калия (вариант NPMg) практически прекращалась, составляя 6–10%.

Внесение в почву возрастающих доз калийных удобрений не отражалось на почвенном содержании обменного магния, равно как и внесение магния не изменяло имеющийся почвенный уровень содержания обменного калия.

Совместное внесение калийных и магниевых удобрений в невысоких дозах снижало фиксацию калия на 10–16% по сравнению с отдельным его внесением, независимо от имеющегося в почве уровня подвижных форм этих элементов. При внесении повышенных доз калия его фиксация почвой не изменялась при дополнительном использовании магниевых удобрений.

В почве с невысоким содержанием подвижного магния интенсивность его фиксации не изменялась при совместном внесении с умеренными дозами калийных удобрений, однако дополнительно внесенные высокие дозы калийных удобрений приводили к снижению фиксации магния в 2 раза. При неистощенном, повышенном почвенном фонде магния его фиксация почвой не зависела от дополнительно внесенного в сопоставимых дозах калия.

Специфику фиксации калия и магния почвой и их взаимовлияние в адсорбционных процессах целесообразно учитывать при оптимизации ка-

лийного и магниевого почвенного состояния и регулирования питательного режима этих элементов в агроценозах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горбунов Н.И. Минералогия и физическая химия почв. М.: Наука, 1978. 293 с.
2. Potassium in agriculture. Madison. Wis.: Amer. Soc. Agronomy, 1985. 1223 p.
3. Барбер С.А. Биологическая доступность питательных веществ в почве. М.: Агропромиздат, 1988. 376 с.
4. Prokoshev V.V., Sokolova T.A. Soil properties and potassium behaviour // Proc. 22-nd Coll. IPI. Soligorsk, USSR, 1990. P. 99–115.
5. Якименко В.Н. Калий в агроценозах Западной Сибири. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2003. 231 с.
6. Забавская К.М. Фиксация калия различными почвами, выделенными из них механическими фракциями // Агрохимия. 1974. № 7. С. 38–42.
7. Медведева О.П. Фиксация черноземом калия удобрений в необменной форме и его доступность растениям // Агрохимия. 1976. № 7. С. 51–58.
8. Пивоварова Е.Г. Калийное состояние почв и его моделирование в условиях Алтайского Приобья. Барнаул: Изд-во АлтайГАУ, 2005. 160 с.
9. Шаймухаметов М.Ш., Петрофанов В.Л. Влияние длительного применения удобрений на К-фиксирующую способность почв // Почвоведение. 2008. № 4. С. 494–506.
10. Середина В.П. Калий и почвообразование. Томск: Изд-во Томск. ун-та, 2012. 354 с.
11. Нечаева Т.В., Добрянская С.Л. Калийфиксирующая способность и состав обменных катионов постагрогенного чернозема // Плодородие. 2020. № 4. С. 24–27.
12. Магницкий К.П. Взаимосвязи в питании растений // Агрохимия. 1967. № 10. С. 32–46.
13. Nemetz 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.
14. Мазеева М.М. Об обеднении дерново-подзолистой почвы магнием и возможности проявления не-обеспеченности им растений при длительном применении NPK-удобрений // Агрохимия. 1977. № 9. С. 97–101.
15. Аристархов А.Н. Оптимизация питания растений и применение удобрений в агроэкосистемах. М.: ЦИНАО, 2000. 524 с.
16. Шильников И.А., Сычев В.Г., Зеленев Н.А. Известкование как фактор урожайности и почвенного плодородия. М.: ВНИИА, 2008. 340 с.
17. Тихомирова В.Я. Влияние свойств почв, удобрений, извести и погодных условий на обеспеченность магнием сельскохозяйственных растений // Агрохимия. 2011. № 5. С. 84–89.
18. Yakimenko V., Naumova N. Tuning potassium and magnesium fertilization of potato in the South of West Siberia // Agronomy. 2021. V. 11. № 9. Art. 1877.
19. Якименко В.Н. Взаимовлияние калия и магния при выращивании картофеля на серой лесной почве // Агрохимия. 2021. № 6. С. 8–15.
20. Прокошев В.В., Неугодова О.В., Смирнов Ю.А., Государева З.И. Магниеые удобрения в интенсивном земледелии. М.: ВНИИТЭИ-агропром, 1987. 52 с.
21. Таврыкина О.М., Богдевич И.М., Путятин 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. Баланс калия, урожайность культур и калийное состояние почвы в длительном поле-вом опыте в лесостепи Западной Сибири // Агро-химия. 2019. № 10. С. 16–24.
23. Практикум по агрохимии / Под ред. В.Г. Минеева. М.: Изд-во МГУ, 1989. 304 с.
24. Пчелкин В.У. Почвенный калий и калийные удоб-рения. М.: Колос, 1966. 336 с.
25. Грим П. Минералогия и практическое использо-вание глин. М.: Мир, 1967. 510 с.

Fixation of Potassium and Magnesium by the Soil of Agrocnoses

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

It was found that the soil of the agrocnosis with a long-term deficit balance of potassium and magnesium recorded 60–70% of potassium introduced with fertilizer and 20–30% of magnesium. With a positive balance of these elements in the agrocnosis, the fixation of potassium by the soil decreased to 40, and magnesium – to 6–10%. The introduction of increasing doses of potassium fertilizer did not affect the soil level of the content of exchangeable magnesium, the use of magnesium fertilizers did not change the content of exchangeable potassium in the soil. The combined use of moderate doses of potassium and magnesium fertilizers contributed to a decrease in potassium fixation by 10–16% compared with its separate application, while the intensity of magnesium fixation did not change. With increased doses of potassium, its fixation by the soil did not depend on the additional addition of magnesium, and magnesium fixation significantly decreased.

Key words: agrocnosis, soil, potassium, magnesium, fixation.