

В.Н. Якименко

Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (г. Новосибирск)

ТРАНСФОРМАЦИЯ ФОРМ КАЛИЯ И АММОНИЯ В ПОЧВЕ АГРОЦЕНОЗА

Показаны устойчивость соотношения между формами калия в почве агроценоза и изменчивость соотношения для форм аммония. Трансформация форм аммония в почве во многом определяется ее калийным состоянием: почва с истощенным фондом калия практически не фиксирует аммоний, тогда как при высоком уровне калия в почве необменное поглощение аммония резко возрастает. Трансформация форм калия в почве агроценоза определяется уровнем поступления или выноса калия и не зависит от почвенного содержания аммония.

Ключевые слова: почва; калий; аммоний; трансформация форм элементов, фиксация.

Введение

Эффективное плодородие почвы, в целом, и режим элементов-биофилов в ней, в частности, во многом определяются двумя взаимосвязанными факторами – общим запасом форм элементов в почве и возможностью их перехода из одного почвенного состояния в другое. Эти трансформации заключаются в способности ионов занимать различные по прочности связи с почвенной твердой фазой позиции и относятся к противоположно направленным обратимым процессам – фиксации и мобилизации. Изучение специфики процессов трансформации форм элементов минерального питания растений в различных почвах создает фундамент для научно обоснованной оценки и регулирования почвенного плодородия.

Основную часть почвенного фонда минерального азота составляет аммоний, который, имея близкие ионные размеры с калием, может активно конкурировать с ним в почвенных процессах фиксации-мобилизации [1–3]. Проведенные исследования показали неоднозначный характер взаимодействия калия и аммония при их трансформации в почвах, широкое варьирование емкости фиксации данных катионов в различных почвах и важность учета этих процессов как в агрохимическом, так и в экологическом аспектах.

Процессы трансформации отдельно для форм калия или аммония в почвах Западной Сибири достаточно подробно изучались в ряде работ [4–6]. Однако исследований взаимодействия этих катионов при их фиксации почвами региона практически не проводилось.

Цель исследования – установить специфику трансформации и взаимовлияния калия и аммония при их фиксации почвой агроценоза.

Материалы и методики исследования

Объектом исследования послужила серая лесная среднесуглинистая почва со следующими характеристиками: содержание гумуса – 4,9%, физической глины – 30,8%, емкость катионного обмена – 21,1 мг-экв./100 г; валовое содержание азота – 0,22%, фосфора – 0,15%, калия – 1,5%. Анализ минералогического состава показал, что фракция физического песка состоит из кварца, полевого шпата и амфиболов, фракция физической глины содержит (в убывающем порядке) гидрослюда мусковитового типа, хлорит, каолинит, вермикулит и дисперсный смектит. Почва является типичной для лесостепной зоны, расположена на высокой террасе р. Бердь (Искитимский р-н, Новосибирская обл.); территория хорошо дренирована, высота ее поверхности над урезом реки составляет 35–45 м.

На целинном участке данной почвы в 1988 г. был заложен стационарный полевой опыт по изучению изменения плодородия и физико-химических свойств почвы в условиях агроценоза [5], который продолжается в настоящее время. В 2009 г. были отобраны и проанализированы (табл. 1) образцы почвы из наиболее контрастных вариантов полевого опыта – без удобрений, NP и NPK. За годы проведения опыта в варианте NP сложился бездефицитный баланс азота, а в варианте NPK – слабдефицитный азотный баланс и положительный калийный; во всех остальных случаях баланс данных элементов-биофилов был сильнодефицитным.

Таблица 1

Содержание и соотношение форм калия и аммония в почве целины и длительного полевого опыта (слой 0–20 см)

Содержание (мг/100 г почвы), соотношение	Целина	Варианты опыта			НСП 05
		Без удобрений	NP	NPK	
Необменный калий, мг К	120	100	108	140	6,2
Обменный калий, мг К	11,7	8,9	8,9	18,2	1,5
К необменный : К обменный	10,3	11,2	12,1	7,7	
Фиксированный аммоний, мг N–NH ₄	16,5	15,1	14,5	21,0	1,4
Обменный аммоний, мг N–NH ₄	1,2	0,9	1,4	0,9	0,2
NH ₄ фиксированный : NH ₄ обменный	13,8	16,8	10,4	23,3	

Изучение фиксирующей способности почвы проводили в лабораторном опыте при выдерживании в течение 30 сут почвенных образцов с калийными (KCl) и/или аммонийными (NH₄Cl) солями в режиме попеременного намачивания дистиллированной водой до наименьшей влагоёмкости и высушивания при комнатной температуре. Соли в виде растворов вносили в следующих дозах: 1) K1 (или N1) – 12,5 мг калия (или N–NH₄) на 100 г почвы, 2) K2 (или N2) – 25 мг, 3) K4 (или N4) – 50 мг элемента на 100 г почвы. Первая одинарная доза примерно соответствует 250 кг д.в. удобрения на гектар и вполне может использоваться в практическом земледелии при выращивании овощ-

ных и пропашных культур в интенсивных технологиях [5]. Схема лабораторного опыта показана ниже в табл. 2, повторность 4-кратная; расчет результатов проводили относительно соответствующих контрольных почвенных образцов, смачиваемых только дистиллированной водой и выдерживаемых в аналогичном режиме.

Количество необменно поглощенного почвой калия и аммония определяли прямыми методами: необменный калий – в 1 М растворе HNO_3 с кипячением, фиксированный аммоний – методом прокаливания [7].

Результаты исследования и обсуждение

Результаты агрохимического анализа показали, что в целом уровень обменного и фиксированного аммония в целинной серой лесной почве на порядок меньше, чем уровень соответствующих калийных форм (табл. 1); вероятно, это связано как с более активным вовлечением аммонийного азота в биологический круговорот, так и с особенностями минералогического почвенного состава. Обращает на себя внимание тот факт, что эволюционно сложившиеся в почве пропорции между формами этих катионов (необменная : обменная), несмотря на заметно различающиеся абсолютные их значения, примерно одинаковы и составляют около 10 для калийных форм и 14 – для аммонийных.

В почве агроценоза соотношение между необменным и обменным калием изменялось в целом незначительно – от 8 до 12, несмотря ни на существенный некомпенсируемый вынос этого элемента из почвы в одних вариантах опыта (без удобрений и NP), ни на большое дополнительное поступление калия в почву с удобрениями в других (NPK). Это свидетельствует о высокой буферной способности почвенной системы калийсодержащих позиций, обусловленной взаимосвязью всех форм почвенного калия, их способностью к трансформации.

При потреблении растениями калия почвенного раствора его уровень стремится к восстановлению за счет наиболее подвижных катионов обменной формы; содержание обменного калия, при его снижении, восполняется до исходного катионами, перешедшими из необменного состояния. Процессы внутрипочвенного выветривания, усиливающиеся в условиях агропедогенеза, способствуют высвобождению некоторого количества калия почвенного скелета; эти катионы могут депонироваться в любой из более подвижных форм в зависимости от того, в какой из них относительное снижение уровня элемента (от исходного) было наибольшим, а также непосредственно поглощаться растениями. Указанные процессы наиболее эффективно протекают в неистощенных по калию почвах, обладающих высокой восстановительной способностью. При перманентном снижении почвенного плодородия этот механизм саморегуляции нарушается вплоть до полной деградации.

Вносимый калий удобрений распределяется по почвенным (обменной и необменной) формам элемента в пропорциях, приближающихся к таковым в целинных аналогах почв. В связи с тем что необменная форма калия в почвах количественно значительно превосходит обменную, основная часть внесен-

ного элемента поглощается необменно. На истощенных почвах вносимый калий избирательно распределяется по почвенным позициям начиная с наиболее селективных к элементу: вначале занимают все незаполненные необменные позиции, затем обменные – с меньшей энергией связи. Трансформация калия в почве, как при поступлении элемента с удобрениями, так и при его выносе с урожаем, направлена на сохранение и поддержание первоначального естественного соотношения между почвенными калийными формами.

Соотношение между формами аммония в почве агроценозов варьировало в довольно широких пределах – от 10 до 24 (см. табл. 1). В почве экстенсивного агроценоза (без применения удобрений) отмечалось общее снижение содержания аммонийных форм, а соотношение между ними лишь несколько увеличилось по сравнению с целиной. При возрастании антропогенной нагрузки на почву агроценоза, посредством интенсивного использования минеральных удобрений, пропорции между почвенными формами аммония явно нарушились. В отличие от калия изменение содержания различных форм почвенного аммония могло проходить разнонаправленно: при снижении уровня фиксированного аммония возрастало количество обменного, и наоборот, значительный рост содержания необменной формы аммония сопровождался снижением в почве уровня обменной формы этого катиона. Следовательно, векторы трансформации форм аммония в почве могут иметь одновременно разнонаправленный характер, а вся почвенная аммонийная система является гораздо менее устойчивой, по сравнению с калийной, к воздействию различных внешних факторов.

Таким образом, почвенная калийная система довольно стабильна и «самодостаточна» – в процессе трансформации форм калия в почве определяющими являются лишь масштабы поступления или отчуждения этого катиона, тогда как при трансформации форм аммония в почве решающее значение, как мы полагаем, имеет и почвенный уровень конкурирующего катиона – калия.

Специфика взаимовлияния катионов калия и аммония при их фиксации почвой и некоторые количественные показатели этого процесса были изучены в лабораторном эксперименте (табл. 2). Фиксирующая способность почвы в отношении аммония при его раздельном (от калия), «одностороннем» внесении не зависела от предшествующего азотного баланса в агроценозе; почвенные образцы из вариантов «Без удобрений» и «NP» фиксировали примерно одинаковое количество аммонийного азота. При одинарной, «реальной» дозе вносимых азотных туков почва этих вариантов необменно поглощала около 2,5% поступившего аммонийного азота. Использование завышенных, «ударных» доз вносимого азота привело к заметному росту абсолютного количества зафиксированного почвой аммония (в 4–8 раз), тогда как относительное его количество возросло не столь значительно – до 4–5% от внесенного.

Раздельное внесение азотных удобрений в почву с неистощенным калийным фондом (вариант NPK) показало ее повышенную фиксирующую способность в отношении аммония по сравнению с почвой агроценозов с дефицитным калийным балансом. Количество аммония удобрений, необменно поглощаемого данной почвой, возросло в несколько раз и в абсолютном, и в

относительном выражении, несмотря на то что исходное содержание в ней фиксированного аммония уже намного превышало целинный уровень. При одинарной дозе аммонийного азота в этом случае фиксировалось около 8% внесенного катиона; повышение дозы вело к росту абсолютного количества поглощенного аммония, процент фиксации менялся мало. Совместное внесение сопоставимых доз азотных и калийных удобрений в почвенные образцы из вариантов с предшествующим длительным дефицитным калийным балансом (без удобрений и NP) сопровождалось значительной интенсификацией процесса фиксации аммония; при одинарной дозе поглощалось до 10 мг N-NH₄/кг почвы, или около 8 % внесенного количества (табл. 2).

Таблица 2

Фиксация калия и аммония почвой агроценозов с различным балансом К и N

Вариант лабораторного опыта (внесено)	Почва из варианта полевого опыта					
	Без удобрений		NP		NPK	
	Зафиксировано в лабораторном опыте					
	мг/100г	% от внесенной дозы	мг/100г	% от внесенной дозы	мг/100г	% от внесенной дозы
Аммоний						
N1	0,3	2,6	0,3	2,2	1,1	8,5
N2	1,3	5,3	1,1	4,2	2,0	8,1
N4	2,0	4,1	2,2	4,5	3,6	7,2
N1 + K1	1,0	8,2	1,0	8,1	0,7	5,6
N2 + K2	2,0	7,9	1,9	7,8	1,4	5,4
N4 + K4	3,2	6,5	3,1	6,2	2,1	4,2
НСП 05	0,17		0,17		0,21	
Калий						
K1	8,1	65,2	8,5	68,0	5,3	42,4
K2	16,1	64,4	17,4	69,6	9,3	37,2
K4	32,6	65,2	36,4	72,8	13,7	27,4
K1 + N1	8,4	67,2	8,2	65,6	4,3	34,4
K2 + N2	14,6	58,4	14,9	59,6	7,6	30,4
K4 + N4	16,6	33,2	16,7	33,4	12,0	24,0
НСП 05	1,9		1,8		1,2	

В этой связи можно предположить, что вряд ли ионы калия каким-то образом стимулируют процесс проникновения или внедрения катионов аммония на специфические позиции кристаллитов независимо от степени их заполненности. Вероятнее, калий блокирует выход, препятствует переходу катионов аммония из необменного в обменное состояние, ингибируя, таким образом, его поглощение растениями и нитрификацию. В присутствии достаточного количества ионов калия равновесие в системе «фиксация – десорбция» аммония явно смещено в сторону фиксации.

Отметим, что количество аммония, зафиксированного истощенной по калию почвой (варианты «Без удобрений» и «NP») при одновременном внесении в нее азотных и калийных удобрений в лабораторном опыте (см. табл. 2), практически полностью соответствовало количеству аммонийного азота, не-

обменно поглощаемого почвой с высоким калийным уровнем (NPK) при раздельном «одностороннем» внесении тех же доз азотных удобрений. При этом напомним, что исходные уровни фиксированного аммония в этих почвах – примерно 150 и 210 мг/кг (см. табл. 1) – существенно различались и, следовательно, в первом случае, как представляется, имелись значительные дополнительные возможности для необменного поглощения этого катиона, которые, однако, не были в полной мере реализованы. Очевидно, процесс формирования высокого уровня фиксированного аммония в почве лимитируется временем, так как значительный фонд этого катиона в почве варианта NPK сложился в результате многолетнего применения удобрений в полевом опыте, а при разовом, однократном их внесении поглощение аммония данной почвой во всех случаях не превышало 8–10% от внесенной дозы.

Фиксация аммония почвой варианта NPK при совместном внесении калия и аммонийного азота заметно снизилась по сравнению с отдельным использованием азотного удобрения, что связано с исходно высоким, как уже отмечалось, содержанием этих катионов в почве данного варианта и, соответственно, заполненностью селективных позиций, вероятно, близкой к предельной.

Количество необменно поглощаемого почвой калия удобрений в десятки раз превышало количество фиксируемого аммония при сопоставимых дозах их внесения, что вполне соответствовало естественному природному уровню содержания форм этих катионов в исходной целинной почве (см. табл. 1, 2). При внесении только калийных удобрений в почвы агроценозов с длительным дефицитным балансом калия необменно поглощалось около 70% внесенного количества катиона независимо от дозы (в изучаемом интервале). Абсолютное количество зафиксированного почвой калия при этом закономерно возрастало с повышением вносимых доз удобрений с 8 мг до 32–36 мг/100 г, демонстрируя высокую емкость фиксации почвы в отношении этого катиона. Насыщение почвенного поглощающего комплекса калием при длительном положительном калийном балансе в агроценозе (NPK) приводило к заметному снижению интенсивности процесса фиксации калия, особенно существенного при внесении в почву повышенных доз этого катиона. Почва варианта NP необменно поглощала калия в несколько раз больше, чем почва NPK. Очевидно, что емкость поглощения почвы не беспредельна и по мере насыщения селективных почвенных позиций специфическими катионами их фиксация закономерно снижается.

Совместное внесение одинарных и двойных доз калийных и аммонийных удобрений в почвы с относительно истощенным фондом этих катионов мало отразилось на масштабах необменного поглощения калия; в целом, количество зафиксированного почвой калия в этих случаях незначительно снизилось (не более 10 процентных пунктов) по сравнению с отдельным внесением калийных удобрений. Лишь при одновременном внесении в почву очень высоких (4-кратных) доз калийных и азотных удобрений интенсивность фиксации калия резко снизилась (в 2 раза) относительно вариантов с раздельным внесением аналогичных его доз. При этом данные почвенные образцы (варианты «Без удобрений» и «NP») имели относительно низкое исходное содержание фиксированных аммония и калия, что, казалось бы, предоставляло дополни-

тельные возможности для усиленного поглощения этих катионов. На почве с высоким исходным содержанием необменных калия и аммония дополнительное (к калийным) внесение аммонийных удобрений практически не влияло на фиксацию калия; разница в количестве поглощенного калия между вариантами с раздельным его внесением и совместным с азотом для соответствующих доз не превышала 1–2 мг/100 г почвы (см. табл. 2).

В целом, можно сказать, что исследуемая серая лесная среднесуглинистая почва обладает высокой фиксирующей способностью по отношению к калию и аммонiu. Длительное применение сбалансированных доз минеральных удобрений в агроценозах способствует существенному возрастанию почвенного фонда необменного калия и фиксированного аммония по сравнению с целинным аналогом; при этом содержание в почве необменного калия, как естественного, так и поглощенного из удобрений, многократно превосходит почвенный уровень фиксированного аммония. В процессе фиксации почвой калия и аммония отмечаются общие закономерности: с увеличением дозы вносимого катиона его абсолютное количество, поглощаемое почвой, возрастает, а процент фиксации относительно внесенной дозы, как правило, снижается; по мере роста содержания в почве определенного катиона и, соответственно, заполнения селективных почвенных позиций, интенсивность его фиксации почвой ослабевает.

С точки зрения практического земледелия следует заметить, что использование аммонийных форм азотных удобрений на истощенных по калию почвах заметно снизит их эффективность ввиду ослабленного закрепления в почве катиона аммония, способствующего его нерациональному потреблению растениями и возможным потерям. В случае необходимости оптимизации почвенного калийного состояния и применения калийных удобрений основная часть калия, независимо от баланса азота в агроценозе, после внесения будет непременно поглощаться почвой, тем самым снижая вероятные потери, и впоследствии в течение вегетации успешно усваиваться выращиваемыми культурами.

Заключение

Основная регуляторная роль процессов трансформации форм калия и аммония в почве состоит в сохранении оптимальных пропорций между формами этих катионов. Система почвенных калийсодержащих позиций функционирует весьма эффективно и обеспечивает довольно высокую стабильность соотношения между формами этого элемента в почве даже в вариативных условиях агроценозов. Аммонийная система почвы гораздо менее устойчива, а соотношение между формами этого катиона в почвах агроценоза меняется в широких пределах; характерно, что изменение содержания различных форм аммония в почве может происходить разнонаправленно. И если вектор трансформации форм калия в почве определяется общим уровнем этого элемента, то процессы фиксации-десорбции аммония в значительной степени обусловлены и внешними факторами.

Фиксация аммония почвой в очень большой степени зависит от ее калийного состояния. В агроценозах с истощенным почвенным фондом калия почва практически не фиксирует аммоний вносимых удобрений; его уровень в почве, даже при бездефицитном балансе азота, падает ниже целинного до недоступного растениям минимального «мертвого» запаса. В лабораторных условиях, при отсутствии выноса катиона растениями, почва с низким содержанием необменных калия и аммония фиксирует не более 2–2,5% вносимого с удобрениями аммонийного азота (при обычных, практически реальных дозах). При повышенном уровне калия в почве, независимо от того, был ли этот фон сформирован ранее или калий поступает одновременно с азотными удобрениями, фиксирующая способность почвы в отношении аммония значительно возрастает – до 8–10% от вносимой дозы. С повышением доз совместно вносимых калия и аммония фиксация почвой последнего значительно увеличивается.

Фиксация почвой калия при относительно невысоких дозах вносимых удобрений мало зависит от присутствия аммонийного катиона. Лишь при очень высоких дозах аммония, вносимых в истощенную почву совместно с калийными удобрениями, процесс фиксации калия резко ослабевает – почти в 2 раза по сравнению с отдельным внесением аналогичных доз калия. По-видимому, конкурирующая способность аммонийного катиона относительно калия по внедрению на необменные позиции в почвенном поглощающем комплексе может отчетливо проявляться при избыточных («теоретических») дозах вносимого аммонийного азота; только в случае, когда количество аммония в почве многократно возрастает по сравнению с естественным почвенным соотношением между этими катионами, аммоний может вытеснить заметную часть ионов калия со специфических позиций.

Литература

1. Блэк К.А. Растение и почва. М.: Колос, 1973. 503 с.
2. Барбер С.А. Биологическая доступность питательных веществ в почве. М.: Агропромиздат, 1988. 376 с.
3. Haynes R.J. Mineral nitrogen in the plant-soil system. USA, Florida, Orlando: Academic Press, Inc., 1986. 483 p.
4. Середина В.П. Калийное состояние почв и факторы, его определяющие: Автореф. дис. ... д-ра биол. наук. Томск, 2003. 42 с.
5. Якименко В.Н. Калий в агроценозах Западной Сибири. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2003. 231 с.
6. Гамзиков Г.П. Азот в земледелии Западной Сибири. М.: Наука, 1981. 268 с.
7. Агрохимические методы исследования почв. М.: Наука, 1975. 656 с.

Поступила в редакцию 03.11.2010 г.

Vladimir N. Yakimenko

*Institute of Soil Science and Agrochemistry of Siberian Division of Russian Academy
of Science, Novosibirsk, Russia*

THE TRANSFORMATION OF POTASSIUM AND AMMONIUM FORMS IN THE SOIL AGROCENOSSES

The sustainability of the ratio of potassium forms as well as the variability of ammonium forms were shown in soils of agrocnosis under conditions of long-term field trial. The ratio between ammonium forms varies in soils of agrocnosis within wide limits; at the same time the change of content of various soil ammonium forms can occur in different directions. Ammonium fixation depends to a great extent on soil potassium state. In agrocnosis with exhausted soil potassium fund the soil does not fix practically the ammonium of applied fertilizers; its level in soil is reduced below that of virgin, even at self-supporting nitrogen balance. As it was evidenced by laboratory trials, if there is no cation removal by plants the soil having low content of nonexchangeable potassium and ammonium fixes no more than 2–2,5% of applied ammonium nitrogen. The fixing capacity of soil in respect of ammonium increases considerably (up to 8–10% of applied dose) when potassium level in soil is high, independently if this background was formed earlier or potassium is received simultaneously with nitrogenous fertilizers. Potassium fixation in the soil amounts to 70% of applied dose and practically does not depend on nitrogen balance in agrocnosis and ammonium content in the soil; joint application of potassic and ammonium fertilizers has a weak effect on nonexchangeable adsorption of potassium by soil.

Key words: soil; potassium; ammonium; transformation of form elements, fixation.

Received November 3, 2010