

УДК 631.41 : 631.81

doi: 10.17223/19988591/25/2

В.Н. Якименко¹, А.А. Малюга²

¹ *Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, г. Новосибирск, Россия*

² *Сибирский НИИ земледелия и химизации сельского хозяйства
Россельхозакадемии, р.п. Краснообск, Новосибирская обл., Россия*

Зависимость агроэкологического состояния почвы от баланса калия в агроценозе

В длительном полевом опыте на серой лесной почве показано, что оптимизация минерального питания растений способствует существенному росту их продуктивности и повышению эффективного плодородия почвы. Выявлены закономерности изменения агрохимических свойств почвы при внесении возрастающих доз калийных удобрений (на фоне NP). Установлена зависимость изменения численности различных групп почвенных микроорганизмов от баланса калия в агроценозе. Показано значительное увеличение численности бактерий и актиномицетов в почве агроценоза при сбалансированном применении удобрений. Установлено, что одностороннее внесение азотных удобрений при истощенном калийном фонде почвы способствует резкому возрастанию популяции грибов, в том числе патогенных; оптимизация почвенного калийного состояния обеспечивает значительное сокращение численности грибов в почве агроценоза.

Ключевые слова: агроценоз; почва; калий; агрохимические свойства почвы; почвенные микроорганизмы.

Введение

Современная парадигма природопользования вообще и земледелия в частности обуславливает необходимость учета экологических законов и принципов. Экологизация земледелия предусматривает оптимизацию циклов биогенных элементов в агроландшафтах с их активным балансом, повышение продуктивности и экологической устойчивости агроценозов, сохранение и восстановление биоразнообразия. Эти важные, экологически обусловленные задачи земледелия могут быть решены только при научно обоснованном использовании средств химизации, в том числе минеральных удобрений [1–3].

В многочисленных исследованиях, проведенных как в нашей стране, так и за рубежом, показана существенная роль агрохимических средств в регулировании круговорота питательных элементов в агроэкосистемах, сохранении плодородия почвы, повышении адаптационного потенциала растений к неконтролируемым факторам внешней среды, изменении биологической активности и структуры почвенного микробиоценоза, а также в решении других важных агрономических и экологических задач.

Использование минеральных удобрений в отечественном земледелии в целом и особенно в сибирском в настоящее время находится на весьма невысоком уровне; при этом соотношения вносимых макроэлементов далеки от оптимальных [4–6]. Наименьшее внимание уделяется регулированию режима калия в агроценозах – калийные удобрения зачастую практически не применяются, баланс элемента является перманентно сильнодефицитным. Очевидно, что имеет место недоучет или даже игнорирование важных экологических законов – равнозначности и незаменимости факторов жизни растений, возврата, минимума, что, несомненно, может самым негативным образом отразиться на агрохимическом и экологическом состоянии пахотных почв.

Значение калия в функционировании антропогенных и естественных экосистем показано в ряде работ [5, 7–9 и др.]. Отмечается роль калия в повышении продуктивности культур и качества продукции, усилении эффекта от других средств химизации, улучшении фитосанитарного состояния агроэкосистем, снижении поступления радионуклидов в растения; рассматриваются геохимические особенности поведения калия в различных почвах, а также некоторые иные функции элемента. Однако в Западной Сибири работы, посвященные выявлению влияния калийного режима на почвенно-геохимическое, агрохимическое, микробиологическое, экологическое состояние агроценозов, в целом немногочисленны, что обуславливает актуальность и необходимость проведения подобных исследований.

Цель нашей работы – в длительных полевых стационарных опытах исследовать влияние баланса калия на агрономическое, агрохимическое и экологическое состояние агроценоза.

Материалы и методики исследования

Полевой стационарный мелкоделяночный опыт по изучению влияния минеральных удобрений на эколого-агрохимическую ситуацию в агроценозе был заложен в 1988 г. на исходно целинной серой лесной почве со следующими характеристиками (слой 0–20 см): 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% (подвижного – 18 мг/100 г), калия – 1,5% (обменного – 12 мг/100 г). Опыт проводится на научном стационаре ИПА СО РАН, расположенном в Искитимском районе Новосибирской области. Закладку и проведение опыта осуществляли по общепринятой методике [10]; первые годы выращивали овощные культуры в севообороте, а с 2000 г. картофель в монокультуре [5].

Опыты проводили по следующей схеме: вариант 0 – непрерывный многолетний пар (без растений и удобрений), 1 – без удобрений (контроль), 2 – NP (фон – вносили азотные и фосфорные удобрения из расчета 100% компенсации выноса элементов планируемым урожаем выращиваемой культуры), 3 – NP + K, 25% (калий в дозе 25% от выноса планируемым уро-

жаем), 4 – NP + K, 50%, 5 – NP + K, 75%, 6 – NP + K, 100%, 7 – NP + K, 125%. Повторность в опытах – четырехкратная. Удобрения в форме аммиачной селитры, двойного суперфосфата и хлористого калия вносили ежегодно весной перед посевом семян, высадкой рассады или клубней. Конкретные дозы удобрений под каждую выращиваемую культуру, данные по продуктивности культур в зависимости от уровня их минерального питания, а также по содержанию элементов в основной и побочной продукции опубликованы нами ранее [5]. Дозы вносимых в опыте минеральных удобрений под картофель, а также полученные урожаи клубней за последние годы показаны в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

**Ежегодные дозы минеральных удобрений и урожайность картофеля
в полевом стационарном опыте**

Вариант опыта	Дозы, кг д.в./га			Урожай клубней, ц/га				
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	2009 г.	2010 г.	2011 г.	2012 г.	Сред- нее
Без удобрений	–	–	–	78	62	81	84	76
NP	100	60	–	125	78	95	80	95
NPK _{25%}	100	60	30	203	135	178	92	157
NPK _{50%}	100	60	60	291	182	239	133	216
NPK _{75%}	100	60	90	298	187	253	144	226
NPK _{100%}	100	60	120	309	187	274	148	235
NPK _{125%}	100	60	150	342	202	312	162	260
HCP ₀₅				32	23	24	22	

Почвенные образцы анализировали стандартными методами [11]: гумус определяли по Тюрину, pH – на потенциометре, емкость поглощения почвы – по Бобко и Аскинази, легкогидролизуемый азот – по Тюрину и Кононовой, нитратный азот – на иономере, обменный аммоний – с реактивом Несслера, фиксированный аммоний – по Могилевкиной, подвижный фосфор – по Чирикову, степень подвижности фосфатов – по Карпинскому и Замятиной, фракционный состав минеральных фосфатов – по Гинзбург и Лебедевой, обменные катионы (Ca, Mg, K) – в вытяжке 1 М раствора CH₃COONH₄, легкообменный калий – в 0,0025 М CaCl₂, необменный калий – в 1 М HNO₃.

Определение численности бактерий, актиномицетов и грибов в почвенных образцах проводили стандартными методами [12]. Заселенность почвы пропагулами гриба *R. solani* определяли методом множественных почвенных таблеток [13]. Пораженность растений картофеля ризоктониозом – по методике [14].

Результаты исследования и обсуждение

Важнейшей проблемой агрохимии является обеспечение экологически и экономически оптимального баланса биогенных элементов в агроценозах.

Результаты проведенных нами исследований показали, что длительная эксплуатация естественного плодородия почвы без использования удобрений в контрольном варианте опыта привела к формированию в агроценозе резко отрицательного баланса элементов питания растений (табл. 2). В фоновом варианте сложился профицитный баланс азота и фосфора, однако сильный дефицит даже одного элемента – калия – существенно ограничивал урожайность культур до уровня, близкого к контрольному варианту. Отметим, что безлимитное азотно-фосфорное питание культур в фоновом варианте не способствовало значительной дополнительной мобилизации почвенных запасов калия по сравнению с контролем; баланс калия на этих вариантах опыта был близким.

Баланс азота, равно как и фосфора, в вариантах с внесением возрастающих доз калийных удобрений (кроме наименьшей дозы – К 25%) был примерно одинаковым, несмотря на прогрессивный рост урожайности культур. Очевидно, это свидетельствует о более рациональном использовании растениями элементов при оптимизированном питании. Профицит баланса калия закономерно нарастал по мере повышения вносимых его доз.

Урожайность выращиваемых культур в опыте (табл. 1, 2) варьировала по годам в связи с различной тепло- и влагообеспеченностью, однако закономерность повышения продуктивности растений по мере оптимизации условий их минерального питания очевидна.

Различный уровень минерального питания растений в вариантах многолетнего опыта заметно отразился на ряде параметров эколого-агрохимического состояния почвы.

Важным интегральным показателем почвенного состояния является содержание гумуса, который улучшает физико-химические свойства почвы, ее биологическую активность и структуру микробиоценоза. Содержание гумуса в почве, отражающее общий уровень ее потенциального плодородия, снизилось за время проведения опытов в варианте «бессменный пар» примерно на 20% по сравнению с целиной (табл. 3). Это снижение произошло главным образом за первые 8–10 лет эксплуатации почвы и в дальнейшем практически прекратилось, что свидетельствует об установившемся в условиях агроценоза новом стационарном уровне гумуса. Выращивание растений и, соответственно, увеличение числа различных обработок почвы (рыхление и т.п.) привело к дальнейшему снижению содержания гумуса. Однако в этих вариантах четко прослеживается тенденция роста содержания гумуса в почве по мере увеличения урожайности выращиваемых на ней культур, очевидно за счет большего поступления корневых и послеуборочных остатков. Оптимизация минерального питания растений способствовала поддержанию содержания гумуса в почве агроценоза на заметно более высоком уровне по сравнению с вариантом экстенсивного использования почвы (контроль).

Таблица 2

**Общий урожай культур и баланс элементов питания
в полевом опыте за 1988–2012 гг.**

Вариант	Урожай, ц к.е./га	Азот, кг/га			Фосфор, кг/га			Калий, кг/га		
		Вы- нос	Посту- пление	Ба- ланс	Вы- нос	Посту- пление	Ба- ланс	Вы- нос	Пос- ту- пле- ние	Баланс
Без удобрений	1 793	2 102	–	–2 102	615	–	–615	1 728	–	–1 728
NP	2 082	2 829	3 120	292	858	1 800	942	1 800	–	–1 800
NPК _{25%}	2 610	3 497	3 120	–377	1 067	1 800	733	2 399	1 304	–1 095
NPК _{50%}	2 962	3 756	3 120	–636	1 145	1 800	655	2 997	2 608	–389
NPК _{75%}	2 975	3 803	3 120	–683	1 155	1 800	645	3 443	3 912	469
NPК _{100%}	3 126	3 784	3 120	–664	1 152	1 800	648	3 855	5 216	1 361
NPК _{125%}	3 233	3 793	3 120	–673	1 157	1 800	643	4 631	6 520	1 889

Таблица 3

Изменение агрохимических свойств почвы в агроценозе

Вариант	Гумус, %	рН водн.	Емкость по- глощения почвы, мг-экв / 100 г	Обменные катионы			Калий	
				Са	Mg	К	легкооб- менный	необмен- ный
				мг/ 100 г почвы				
Целина	4,89	7,3	21,3	402	17	11	1,7	118
Пар	4,05	7,2	21,5	343	15	13	1,5	120
Без удобрений	3,69	7,2	21,1	326	12	8	0,5	90
NP	3,74	6,9	21,8	375	12	8	0,5	90
NPК _{25%}	3,85	6,9	21,7	369	10	10	0,8	103
NPК _{50%}	3,86	6,9	21,4	358	9	13	1,0	110
NPК _{75%}	3,88	6,9	21,4	359	9	18	1,5	123
NPК _{100%}	3,92	6,9	21,5	358	8	21	2,8	144
NPК _{125%}	3,96	6,9	21,5	341	8	40	6,8	183
HCP ₀₅	0,4	0,2	0,5	18	4,4	7,1	1,5	12

Реакция почвенного раствора при сельскохозяйственном использовании почвы без применения минеральных удобрений (пар, контроль) практически не изменилась по сравнению с целиной (табл. 3). Длительное же применение азотных удобрений вызвало некоторое подкисление почвы, при этом дополнительное внесение возрастающих доз калия не повлияло на показатель pH.

Емкость катионного обмена почвы (ЕКО) мало изменилась при ее сельскохозяйственном освоении и различной интенсивности применения мине-

ральных удобрений (табл. 3). Очевидно, что базовые почвенные свойства, в основном определяющие ЕКО, – минералогический и гранулометрический состав – довольно устойчивы к антропогенной нагрузке.

Длительное применение калийных удобрений в агроценозе, а также их неиспользование, как и можно было ожидать, заметно повлияли на содержание форм калия в почве (табл. 3). В вариантах с сильным калийным дефицитом содержание обменного калия в почве, снизившись примерно до 8 мг/100 г за первые несколько лет сельскохозяйственного использования участка, в дальнейшем стабилизировалось и не отражало убыль почвенных запасов элемента в связи с их потреблением выращиваемыми культурами. Аналогичная ситуация была и с легкообменной формой калия. Снижение же содержания необменного калия в почве этих вариантов было более плавным, однако замедление его темпов в последние годы свидетельствует о достижении и этой формой элемента определенного стабильно низкого уровня. Растения, выращиваемые на почве с «минимальным» уровнем содержания калия, испытывали явный дефицит этого элемента, что самым негативным образом влияло на их рост и развитие.

Содержание форм калия в почве на уровне, близком к целинному, сохранялось при небольшом дефиците калийного баланса в агроценозе. Очевидно, внесение калийных удобрений (на фоне NP) и оптимизация питания культур способствовали дополнительной мобилизации почвенных запасов калия, более прочно связанного с минеральной основой почвы и не извлекаемого экстрагентами, используемыми в наших исследованиях. При положительном калийном балансе по мере роста его профицита содержание всех форм калия в почве заметно увеличивалось (табл. 3). Следует отметить, что изменение уровня всех форм калия произошло главным образом в верхнем пахотном горизонте почвы [15].

Сельскохозяйственное освоение целинной почвы и систематическое внесение в нее минеральных удобрений отразились на почвенном содержании обменных катионов (табл. 3). Содержание обменного кальция в почве пара очень существенно уменьшилось по сравнению с целинным участком, по-видимому, за счет выщелачивания этого элемента. Выращивание растений на контрольном варианте опыта привело к дальнейшему понижению уровня кальция в почве, однако очевидно, что потери этого элемента от выщелачивания значительно превосходят его вынос урожаями культур (по крайней мере при невысокой их продуктивности). Содержание обменного кальция в почве фонового варианта существенно возросло по сравнению с контролем, несмотря на близкую урожайность культур на этих участках, что связано, вероятно, с систематическим применением двойного суперфосфата, содержащего значительное количество этого элемента. При внесении возрастающих доз калийных удобрений на фоне NP отмечалась явная тенденция снижения в почве уровня обменного кальция. Причиной этого явления послужил, с одной стороны, прогрессивный рост урожайности культур

по мере улучшения условий их минерального питания, а с другой стороны, калий, при высоких дозах его внесения (К 125%), видимо, вытеснял некоторую часть ионов кальция из почвенного поглощающего комплекса.

Снижение содержания обменного магния в почве агроценоза было, на наш взгляд, в большей степени обусловлено выносом этого элемента урожаями выращиваемых культур, нежели процессом выщелачивания. Оптимизация калийного состояния почвы и сопутствующий ей рост урожайности растений привели к заметному уменьшению почвенного уровня обменного магния (табл. 3). Учитывая важность магния для сбалансированного питания растений и его намного меньшие по сравнению с кальцием почвенные запасы, обеспеченности выращиваемых культур этим элементом в интенсивных агроценозах следует уделять дополнительное внимание.

Эффективное плодородие почвы в отношении азота и фосфора характеризуется прежде всего содержанием в ней подвижных форм этих элементов [16, 17]. В связи с тем, что внесение NP-удобрений служило фоном при изучении калийного режима в агроценозе, изменения некоторых показателей азотного и фосфорного состояния почвы в опыте показаны для наиболее контрастных вариантов (табл. 4, 5).

Перманентная минерализация органического вещества почвы при ее длительном паровании привела к заметному повышению содержания в ней легкогидролизуемого и сопряженного с ним нитратного азота (табл. 4). В то же время при обеспечении потребностей растений в азоте только за счет его почвенных запасов на контрольном варианте опыта уровень этих форм азота в почве существенно упал. Отметим, что содержание легкогидролизуемого и нитратного азота в почве отражало как степень ее удобренности, так и эффективность использования внесенного азота удобрений.

Т а б л и ц а 4

Содержание форм азота в почве полевого опыта, мг N /кг

Вариант	Азот		Аммоний	
	легкогидролизуемый	нитратный	обменный	фиксированный
Целина	85	7	12	165
Пар	98	21	9	164
Без удобрений	67	8	9	151
NP	138	43	14	145
NPK _{100%}	102	17	9	209
HCP ₀₅	17	11	3	28

Содержание обменного аммония в почве агроценоза было достаточно стабильным, что свидетельствует о слабых диагностических возможностях этого показателя. Лишь при положительном балансе азота и дефиците калия (вариант NP) уровень обменного аммония в почве агроценоза существенно возрос (табл. 4). Фиксация аммония почвой в сильной степени зависела от ее калийного состояния [18]; в почве с истощенными запасами калия содер-

жание необменного аммония заметно снизилось (вероятно, до «минимального» уровня), тогда как при бездефицитном калийном балансе в агроценозе количество фиксированного аммония в почве значительно увеличилось. В целом очевидно, что оптимизация калийного состояния почвы существенно влияла на почвенный фонд минерального азота, усиливая потребление растениями нитратов [15] и регулируя процессы фиксации-мобилизации аммония [18].

Фракционный состав минерального фосфора почвы является информативным показателем ее фосфорного состояния [17]. Изменение фосфорного фонда почвы агроценозов в наших опытах отразилось на составе минеральных форм фосфатов (табл. 5). Самой динамичной была фракция наиболее растворимых форм фосфатов щелочных и щелочноземельных металлов (Ca-P_I) – при дефицитном балансе фосфора ее содержание в почве снизилось в несколько раз по сравнению с паром, а при положительном балансе – значительно возросло. Содержание фракций разноосновных фосфатов кальция (Ca-P_{II}) и фосфатов полуторных окислов (Al-P и Fe-P) варьировало существенно меньше, причем по мере снижения степени растворимости отдельных форм минерального фосфора различия в их содержании между вариантами опыта сглаживались. Количество фракции высокоосновных фосфатов кальция типа апатита (Ca-P_{III}) в почве при различной агрогенной нагрузке на нее практически не изменилось, фиксации внесенного с удобрением фосфора в труднодоступной форме не наблюдалось. Очевидно, что трансформация фонда минеральных фосфатов почвы при ее сельскохозяйственном использовании происходила прежде всего за счет наиболее доступной растениям фракции Ca-P_I , вызывая соответствующие изменения эффективного почвенного плодородия. Внесение повышенных доз фосфорных удобрений способствовало накоплению запасов доступного растениям фосфора и, вероятно, повышению степени мобильности имевшихся почвенных фосфатов [17].

Таблица 5

Изменение фосфорного состояния почвы в агроценозе

Вариант	Фракционный состав минеральных фосфатов					Подвижный фосфор	Степень подвижности фосфатов
	Ca-P _I	Ca-P _{II}	Al-P	Fe-P	Ca-P _{III}		
	мг/100 г почвы						мг/л
Пар	12,5	6,3	4,6	5,5	47,2	18	0,3
Без удобрений	2,5	2,3	2,6	3,4	47,2	9	следы
NP	32,9	7,4	6,8	8,2	46,9	44	2,0
NPK _{100%}	26,6	7,3	5,8	7,2	46,8	43	1,9
НСП ₀₅	5,4	2,6	2,2	1,3	6,1	4,4	0,2

Содержание подвижного фосфора (по Чирикову) в почве контрольного варианта опыта снизилось примерно в два раза по сравнению с паром и целиной; этот уровень оставался достаточно стабильным в течение последних ряда лет. При положительном балансе фосфора в агроценозе содержание его подвижной формы в почве существенно повысилось (табл. 5).

Важным показателем способности твердой фазы почвы отдавать в раствор ионы фосфора является степень подвижности почвенных фосфатов. В почве агроценоза, где потребность культур в фосфоре обеспечивалась за счет естественного плодородия, степень подвижности фосфатов снизилась до минимального уровня. Очевидно, что при таком фосфорном состоянии почвы питание выращиваемых на ней культур было сильно лимитировано. В вариантах с внесением фосфорных удобрений показатель степени подвижности почвенных фосфатов демонстрировал высокую обеспеченность выращиваемых культур доступным фосфором.

Проведенные исследования показали, что длительное сельскохозяйственное использование почвы оказало значительное воздействие на различные компоненты агроэкосистемы, в том числе микробиологический комплекс. Интенсивность использования удобрений и уровень минерального питания растений в агроценозе заметно повлияли на структуру микробоценоза и численность основных групп микроорганизмов (табл. 6–8).

Численность бактерий в почве вариантов опыта существенно различалась (табл. 6). В почве контрольного и фонового вариантов количество бактерий (800–840 тыс. КОЕ/г абсолютно-сухой (а.с.) почвы в среднем за вегетацию) несколько уменьшилось относительно пара (960 тыс.), что связано, очевидно, как со значительным снижением содержания подвижных форм макроэлементов, так и с их неблагоприятным соотношением, прежде всего N и K. По мере улучшения условий калийного питания растений (на фоне NP) в опыте прогрессивно увеличивалась и численность почвенных бактерий. Максимальное количество этих микроорганизмов (1,9 млн) отмечено в варианте NPK_{100%}, что свидетельствует о сложившихся относительно оптимальных условиях функционирования почвенного бактериального ценоза. При дальнейшем увеличении дозы вносимых калийных удобрений численность этой группы микроорганизмов несколько снижалась (до 1,6 млн), вероятно, из-за повышения концентрации солей в почвенном растворе. Статистическая обработка данных свидетельствует о статистически значимом увеличении численности бактерий в вариантах с оптимизированным фоном минерального питания по сравнению с контрольными вариантами.

Общая численность бактерий в почве всех вариантов опыта существенно возрастала в течение периода вегетации растений (табл. 6). Наименьшей (по срокам наблюдения) эта величина была в фазу всходов картофеля и составляла в среднем по опыту около 700 тыс. КОЕ/г почвы. К середине вегетации число бактерий в почве возросло почти в два раза, а в конце периода – в фазу созревания клубней картофеля – достигло 1,9 млн КОЕ/г почвы.

Таблица 6

**Общая численность бактерий в пахотном слое почвы агроценоза,
тыс. КОЕ /г а.с. почвы**

Вариант	Период отбора почвенных проб			Среднее по фону минерального питания
	1	2	3	
Пар	541	1 122	1 227	963
Без удобрений	552	885	990	809
NP	526	768	1 220	838
NPK _{25%}	582	1 138	1 830	1 183
NPK _{50%}	592	1 714	1 953	1 419
NPK _{75%}	644	1 660	2 530	1 611
NPK _{100%}	1122	1 426	3 120	1 889
NPK _{125%}	968	1 424	2 364	1 585
Среднее по периоду	691	1 267	1 904	
HCP ₀₅ по факторам	фон – 646; период отбора – 395			

Примечание. Здесь и далее. Периоды отбора проб: 1 – полные всходы картофеля, 2 – полная бутонизация, 3 – созревание.

Численность актиномицетов в почве различных вариантов опыта колебалась в среднем за вегетацию от 70 тыс. до 130 тыс. КОЕ/г почвы (табл. 7). Закономерность изменения их количества в зависимости от уровня минерального питания растений в агроценозе была аналогична таковой для бактериального ценоза. Наименьшее число актиномицетов в почве отмечалось в вариантах без внесения минеральных удобрений или с несбалансированными их дозами. Численность этой группы микроорганизмов достигала максимума в почве с оптимальным калийным состоянием и статистически значимо превышала таковую в контрольном и фоновом вариантах. Следует отметить, что актиномицеты, в отличие от бактерий, не столь негативно реагировали на NP-удобрение – их численность в почве фонового варианта (NP) имела тенденцию к увеличению по сравнению с контролем.

Таким образом, проведенные исследования показали, что численность почвенных прокариот – бактерий и актиномицетов – хорошо отражает уровень эффективного почвенного плодородия, который формируется в результате длительного применения (или неприменения) минеральных удобрений. Наивысшая в опытах численность этих групп микроорганизмов отмечалась в почве вариантов со сбалансированным минеральным питанием растений, на которых была достигнута и наиболее высокая урожайность выращиваемых культур. В то же время минимальное количество прокариот содержалось в почве агроценозов с экстенсивным ее использованием или длительным внесением только азотно-фосфорных удобрений; продукционный процесс растений на этих почвенных участках был явно лимитирован.

Характер изменения численности грибов в почве агроценоза на различных фонах минерального питания в нашем опыте (табл. 8) был диаметрально-

но противоположен характеру варьирования других групп микроорганизмов – бактерий и актиномицетов. Наивысшая численность грибов (7,7 тыс. КОЕ/г в среднем за вегетацию) отмечалась в почве варианта с внесением только NP-удобрений и, соответственно, повышенным (избыточным) содержанием подвижных форм минерального азота при истощенном калийном фонде. Оптимизация калийного состояния почвы при сбалансированном применении минеральных удобрений приводила к статистически значимому снижению (до 4,1–4,2 тыс. КОЕ/г почвы) популяции этой группы микроорганизмов в почве агроценоза.

Таблица 7

**Общая численность актиномицетов в пахотном слое почвы агроценоза,
тыс. КОЕ /г а.с. почвы**

Вариант	Период отбора почвенных проб			Среднее по фону минерального питания
	1	2	3	
Пар	91	44	54	63
Без удобрений	42	66	70	59
NP	60	96	100	85
NPK _{25%}	44	92	164	101
NPK _{50%}	48	137	158	114
NPK _{75%}	84	182	163	143
NPK _{100%}	113	146	174	144
NPK _{125%}	96	136	190	142
Среднее по периоду	72	112	134	
HCP ₀₅ по факторам	фон – 64; период отбора – 58			

Наиболее рельефные различия по численности почвенных грибов между вариантами нашего опыта (более чем в 4 раза) наблюдались в самом начале вегетации. В это время в почве варианта NP их содержалось около 10 тыс. КОЕ/г, тогда как в вариантах NPK_{50–125%} – 2,2–2,4 тыс. Очевидно, что в этот период концентрация в почвенном растворе элементов, внесенных с удобрениями, была наиболее высока, что отчетливо отразилось на популяции грибов. По мере потребления растениями в течение вегетации питательных веществ и снижения, соответственно, их концентрации в почвенном растворе разница между вариантами по численности грибов в почве сглаживалась, а в конце вегетации различий практически не было.

Известно, что многие грибы являются патогенными организмами, ведущими паразитарный образ жизни и вызывающими ряд болезней на растениях, например, ризоктониоз – распространенное и вредоносное заболевание картофеля. Определение численности пропагул ризоктонии в почве вариантов нашего опыта (табл. 9) показало, что изменение популяции этого гриба в зависимости от уровня азотного и калийного питания подчиняется общей

закономерности, характерной для всего грибного ценоза. При одностороннем применении азотных удобрений численность ризоктонии в почве резко увеличивалась, а по мере дополнительного внесения возрастающих доз калийных удобрений – существенно снижалась. В начале и середине вегетации в почве вариантов с повышенными дозами калийных удобрений пропагул ризоктонии вообще обнаружить не удалось. Лишь в конце вегетационного периода, в фазу созревания клубней, при общем возрастании численности гриба в почве всех вариантов опыта, небольшое количество пропагул отмечалось и в почве с повышенным содержанием калия.

Т а б л и ц а 8

**Общая численность грибов в пахотном слое почвы агроценоза,
тыс. КОЕ /г а.с. почвы**

Вариант опыта	Период отбора почвенных проб			Среднее по фону минерального питания
	1	2	3	
Пар	3,40	1,97	6,90	4,09
Без удобрений	2,09	1,84	5,18	3,04
NP	9,98	5,66	7,40	7,67
NPK _{25%}	4,92	4,76	7,38	5,69
NPK _{50%}	2,38	3,08	7,58	4,35
NPK _{75%}	2,34	2,20	7,76	4,10
NPK _{100%}	2,26	2,70	7,58	4,18
NPK _{125%}	2,24	2,85	7,74	4,28
Среднее по периоду	3,70	3,13	7,19	
HCP ₀₅ по факторам	фон – 2,70; период отбора – 2,88			

Т а б л и ц а 9

Общая численность пропагул ризоктонии в пахотном слое почвы, шт./100 г

Вариант	Период отбора почвенных проб			Среднее по фону минерального питания
	1	2	3	
Пар	0	0	0	0
Без удобрений	12,5	12,1	4,3	9,6
NP	24,3	15,5	46,0	28,6
NPK _{25%}	19,7	12,7	14,0	15,5
NPK _{50%}	14,4	4,3	21,2	13,3
NPK _{75%}	6,0	0	13,0	6,3
NPK _{100%}	0	0	4,2	1,4
NPK _{125%}	0	0	4,4	1,5
Среднее по периоду	9,6	5,6	13,4	
HCP ₀₅ по факторам	фон – 3,3; период – 2,0; частные средние – 5,7			

Поражаемость растений картофеля ризоктониозом в вариантах опыта закономерно возрастала с повышением численности ризоктонии в почве. Так, в варианте NP распространенность ризоктониоза на растениях в фазу уборки урожая составляла: на ботве – 45%, на клубнях – 95%, тогда как в вариантах NPK_{100–125%} болезнью было поражено не более 7% растений.

Заключение

Исследования, проведенные в многолетнем стационарном полевом опыте, показали, что бездефицитный баланс калия в агроценозе существенно улучшает агрохимическое и экологическое состояние как почвы, так и агроценоза в целом. Оптимизация калийного статуса почвы агроценоза, при достаточной ее обеспеченности азотом и фосфором, способствовала значительному росту урожайности выращиваемых культур и повышению эффективности использования растениями элементов питания. Длительное внесение возрастающих доз калийных удобрений не оказало отрицательного воздействия на почвенные агрохимические свойства по сравнению с NP-фоном: емкость поглощения и кислотность почвы практически не изменились, а содержание гумуса несколько возросло. Уровень калия в почве в определенной степени влиял на ее азотный режим, регулируя процессы фиксации – мобилизации аммония и масштабы потребления нитратного азота. Интенсивность использования калийных удобрений наибольшее влияние оказала на почвенный состав обменных катионов – при повышенных дозах вносимого калия содержание в почве магния и особенно кальция заметно снижалось.

Различная интенсивность использования минеральных удобрений в агроценозе отразилась на функционировании микробного сообщества почвы. Систематическое внесение научно обоснованных и сбалансированных доз удобрений оказало заметное положительное действие на численность и структуру почвенного микробоценоза. Оптимизация эффективного плодородия почвы и условий минерального питания растений в агроценозе способствовала значительному росту численности почвенных бактерий и актиномицетов. Дефицит в почве подвижных форм хотя бы одного из макроэлементов (например калия) негативным образом отражался на популяции прокариот.

Одностороннее использование азотных удобрений при сильнодефицитном балансе калия и истощенном калийном фонде почвы вызывало резкий рост почвенной популяции грибов, в том числе фитопатогенных, повышая тем самым инфекционный потенциал почвы. Оптимизация калийного состояния почвы способствовала значительному сокращению численности почвенных грибов и улучшению фитосанитарной ситуации в агроценозе. Численность различных групп микроорганизмов в почве и структура всего микробоценоза является информативным показателем оценки агроэкологического состояния пахотных почв, отражая как уровень эффективного почвенного плодородия, так и почвенный инфекционный потенциал.

Литература

1. Кирюшин В.И. Теория адаптивно-ландшафтного земледелия. М. : КолосС, 2011. 443 с.
2. Кудеяров В.Н., Башкин В.Н., Кудеярова А.Ю., Бочкарев А.Н. Экологические проблемы применения минеральных удобрений. М. : Наука, 1984. 214 с.
3. Минеев В.Г. Химизация земледелия и природная среда. М. : Агропромиздат, 1990. 287 с.
4. Кудеяров В.Н., Семенов В.М. Оценка современного вклада удобрений в агрогеохимический цикл азота, фосфора и калия // Почвоведение. 2004. № 12. С. 1440–1446.
5. Якименко В.Н. Калий в агроценозах Западной Сибири. Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2003. 231 с.
6. Минеев В.Г., Бычкова Л.А. Состояние и перспективы применения минеральных удобрений в мировом и отечественном земледелии // Агрохимия. 2003. № 8. С. 5–12.
7. Прокопьев В.В., Дерюгин И.П. Калий и калийные удобрения. М. : Ледум, 2000. 185 с.
8. Середина В.П. Резервы калия в почвах Западно-Сибирской равнины // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2013. № 1 (21). С. 7–21.
9. Минеев В.Г. Агрохимия и экологические функции калия. М. : Изд-во МГУ, 1999. 332 с.
10. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта. М. : Агропромиздат, 1985. 351 с.
11. Агрохимические методы исследования почв / под ред. А.В. Соколовой. М. : Наука, 1975. 656 с.
12. Сэги Й. Методы почвенной микробиологии. М. : Колос, 1983. 296 с.
13. Henis Y. A new pellet soil-sample and its use for the study of population dynamics of *Rhizoctonia solani* // Phytopathology. 1978. Vol. 19. P. 1269–1273.
14. Frank J., Leach S.S., Webb R.E. Evaluation of potato clone reaction to *Rhizoctonia solani* // Plant dis. reporter. 1976. Vol. 60, № 11. P. 910–912.
15. Якименко В.Н. Изменение содержания форм минерального азота и калия в профиле почвы агроценоза // Вестник Томского государственного университета. 2009. № 328. С. 202–207.
16. Гамзиков Г.П. Азот в земледелии Западной Сибири. М. : Наука, 1981. 267 с.
17. Гинзбург К.Е. Фосфор основных типов почв СССР. М. : Наука, 1981. 242 с.
18. Якименко В.Н. Трансформация форм калия и аммония в почве агроценоза // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2011. № 1. С. 19–27.

Поступила в редакцию 15.10.2013 г.

Авторский коллектив:

Якименко Владимир Николаевич – д-р биол. наук, доцент, в.н.с. лаборатории агрохимии Института почвоведения и агрохимии СО РАН (г. Новосибирск, Россия). E-mail: yakimenko@issa.nsc.ru

Малюга Анна Анатольевна – д-р с/х наук, с.н.с., зав. лабораторией интегрированной защиты зерновых культур и картофеля от болезней и вредителей Сибирского НИИ земледелия и химизации сельского хозяйства Россельхозакадемии (р.п. Краснообск, Новосибирская обл., Россия). E-mail: anna_malyuga@mail.ru

Tomsk State University Journal of Biology. 2014. № 1 (25). P. 26–41

doi: 10.17223/19988591/25/2

Vladimir N. Yakimenko¹, Anna A. Malyuga²

¹ Laboratory of Agrochemistry, Institute of Soil Science and Agricultural Chemistry, Siberian Division of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation. E-mail: yakimenko@issa.nsc.ru

² Siberian Research Institute of Soil Management and Chemicalization of Agriculture, Krasnoobsk, Novosibirsk region, Russian Federation. E-mail: anna_malyuga@mail.ru

**Dependence of agro-environmental soil constitution
on potassium balance in agroecosis**

The studies conducted during a long-term field experiment showed that self-supporting potassium balance in agroecosis improved essentially both agrochemical

and environmental state of the soil and agrocenosis as a whole. Optimization of soil potassium status at sufficient level of nitrogen and phosphorus favored an increase in crop capacity of growing cultures and efficient use of nutritive elements by plants. Prolonged application of increasing doses of potassic fertilizers did not influence negatively on soil agrochemical properties as compared to N-background: soil exchange capacity and acidity practically did not change, as for humus content it increased to some extent. The level of soil potassium influenced, to some degree, soil nitrogen regime regulating the processes of fixation and mobilization of ammonium and the scale of consumption of nitrate nitrogen. The intensity of the use of potassic fertilizers most greatly influenced the composition of soil cations: the content of soil magnesium and especially calcium decreased considerably when applying elevated doses of potassium.

Different intensity of use of mineral fertilizers in agrocenosis had an effect on functioning of soil microbial communities. Systematic application of science-based doses of fertilizers had a positive effect on the number and structure of soil microbiocenosis. Optimization of effective soil fertility and condition of mineral nutrition of plants in agrocenosis favored a considerable increase in the number of soil bacteria and actinomycetes. Deficiency of movable forms (at least of one of macroelements, for example, potassium) had a negative effect on populations of prokaryotes.

One-sided use of nitrogenous fertilizers at serious deficiency of potassium and scanty potassic fund of soil caused a strong growth of populations of soil fungi, including phytopathogenous ones, increasing soil infectious potential at the same time. Optimization of soil potassic state favored a considerable decrease in the number of soil fungi and improvement of phythosanitary situation in agrocenosis. The number of different groups of soil microorganisms and structure of the whole of microbiocenosis is an informative index of assessment of agro environmental state of ploughlands reflecting both the level of soil effective fertility and soil infectious potential.

Key words: agrocenosis; soil; potassium; soil properties; soil microorganisms.

Received October, 15, 2013

References

1. Kiryushin V.I. Teoriya adaptivno-landshaftnogo zemledeliya. M.: KolosS, 2011. 443 pp. [Kirjushin VI. Theory of adaptive landscape agriculture. Moscow: KolosS; 2011, 443 p.] In Russian
2. Kudiyarov V.N., Bashkin V.N., Kudiyarova A.Yu., Bochkarev A.N. Ekologicheskie problemy primeneniya mineral'nykh udobreniy. M.: Nauka, 1984. 214 pp. [Kudiyarov VN, Bashkin VN, Kudiyarova AY, Bochkarev A.N. Ecological problems of using mineral fertilizers. Moscow: Nauka; 1984, 214 p.] In Russian
3. Mineev V.G. Agriculture chemisation and natural environment. M.: Agropromizdat, 1990. 287 pp. [Mineev VG. Khimizatsiya zemledeliya i prirodnaya sreda. Moscow: Agropromizdat, 1990. 287 p.] In Russian
4. Kudiyarov V.N., Semenov V.M. Otsenka sovremennogo vklada udobreniy v agrogeokhimicheskiy tsikl azota, fosfora i kaliya. Pochvovedenie. 2004. No 12. PP. 1440-1446. [Kudiyarov VN, Semenov VM. Assessment of the current contribution of fertilizers to the agrogeochemical cycles of nitrogen, phosphorus, and potassium. *Pochvovedenie*. 2004;12:1440-1446.] In Russian, English summary
5. Yakimenko V.N. Kaliy v agrotsenozakh Zapadnoy Sibiri. Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 2003. 231 pp. [Yakimenko VN. Potassium in agrocenoses of Western Siberia. Novosibirsk: Publishing House of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 2003, 231 p.] In Russian

6. Mineev V.G., Bychkova L.A. Sostoyanie i perspektivy primeneniya mineral'nykh udobreniy v mirovom i otechestvennom zemledelii. *Agrokimiya*. 2003. No 8. PP. 5-12. [Mineev VG, Bychkova LA. Condition and prospects of applying mineral fertilizers in world and domestic agriculture. *Agrochimija*. 2003;8:5-12.] In Russian, English summary
7. Prokoshev V.V., Deryugin I.P. Kaliy i kaliynye udobreniya. M.: Ledum, 2000. 185 pp. [Prokoshev VV, Deryugin IP. Potassium and potassium fertilizers. Moscow: Ledum; 2000, 185 p.] In Russian
8. Seredina V.P. Rezervy kaliya v pochvakh Zapadno-Sibirskoy ravniny. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya*. 2013. No 1 (21). PP. 7-21. [Seredina VP. Reserve of potassium in soils of the West Siberian plain. *Tomsk State University Journal of Biology*. 2013;1(21):7-21.] In Russian, English summary
9. Mineev V.G. *Agrokimiya i ekologicheskie funktsii kaliya*. M.: Izd-vo MGU, 1999. 332 pp. [Mineev VG. Agrochemistry and ecological functions of potassium. Moscow: Moscow university press; 1999, 332 p.] In Russian
10. Dospekhov B.A. *Metodika polevogo opyta*. M.: Agropromizdat, 1985. 351 pp. [Dospekhov BA. Techniques for field experiment. Moscow: Agropromizdat; 1985, 351 p.] In Russian
11. *Agrokhimicheskie metody issledovaniya pochv / pod red. AV Sokolovoi*. M.: Nauka, 1975. 656 pp. [Agrochemical methods of soil examination / Ed. AV Sokolova. Moscow: Nauka; 1975, 656 p.] In Russian
12. Segi Y. *Metody pochvennoy mikrobiologii*. M.: Kolos, 1983. 296 pp. [Segi Y. Methods of soil microbiology. Moscow: Kolos; 1983, 296 p.] In Russian
13. Henis Y. A new pellet soil-sample and it use for the study of population dynamics of *Rhizoctonia solani*. *Phytopathology*. 1978;19:1269-1273.
14. Frank J, Leach SS, Webb RE. Evaluation of potato clone reaction to *Rhizoctonia solani*. *Plant dis reporter*. 1976; 60(11):910-912.
15. Yakimenko V.N. Izmenenie soderzhaniya form mineral'nogo azota i kaliya v profile pochvy agrotsenoza. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2009. No 328. PP. 202-207. [Yakimenko VN. The change of mineral nitrogen forms and potassium content in the soil profile of agrocenoses. *Tomsk State University Journal*. 2009;328:202-207.] In Russian, English summary
16. Gamzikov G.P. *Azot v zemledelii Zapadnoy Sibiri*. M.: Nauka, 1981. 267 pp. [Gamzikov GP. Nitrogen in agriculture of Western Siberia. Moscow: Nauka; 1981, 267 p.] In Russian
17. Ginzburg K.E. *Fosfor osnovnykh tipov pochv SSSR*. M.: Nauka, 1981. 242 pp. [Ginsburg KE. Phosphorus of basic soil types of the USSR. Moscow: Nauka; 1981, 242 p.] In Russian
18. Yakimenko V.N. Transformatsiya form kaliya i ammoniya v pochve agrotsenoza. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya*. 2011. No 1(21). PP. 19-27. [Yakimenko VN. The transformation of potassium and ammonium forms in the soil agrocenoses. *Tomsk State University Journal of Biology*. 2011;1(21):19-27.] In Russian, English summary