

ВЛИЯНИЕ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ НА ТРАНСФОРМАЦИЮ КАЛИЙНОГО ФОНДА ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ТЯЖЕЛОСУГЛИНИСТОЙ ПОЧВЫ

© 2022 г. Н. Е. Завьялова^{1,*}, М. Т. Васбиева¹, Д. Г. Шишков¹, И. В. Казакова¹

¹Пермский федеральный исследовательский центр УрО РАН
614532 Пермский край, Пермский р-н, с. Лобаново, ул. Культуры, 12, Россия

*E-mail: nezavyalova@gmail.com

Поступила в редакцию 02.07.2021 г.

После доработки 28.08.2021 г.

Принята к публикации 15.10.2021 г.

В полевом стационарном опыте 1978 г. закладки изучили влияние длительного внесения минеральных удобрений на содержание валового калия, его водорастворимых, легкообменных, обменных и необменных форм в дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве. Применение азотных, фосфорных и калийных удобрений в чистом виде и их сочетаний (доза 90 кг д.в./га) показало, что внесение азотно-фосфорных удобрений без использования калийных привело к снижению содержания легкообменных соединений калия относительно контроля на 20, обменных по Кирсанову – на 22 (по Масловой – на 25), необменных гидролизующих по Пчелкину – на 33, необменных фиксированных по Гедройцу – на 42%. Применение азотных удобрений в чистом виде в большей степени повлияло на содержание необменных форм калия, отмечено снижение содержания необменных форм калия в почве на 22–26%. При длительном внесении калийных удобрений отмечено достоверное увеличение в почве относительно контрольного варианта валового содержания калия на 15, его легкообменных соединений – на 47, обменных по Кирсанову и Масловой – на 63–75%. Сочетание азотно-калийных удобрений достоверно повысило в почве содержание легкообменных и обменных соединений калия. Только внесение полного минерального удобрения (NPK)90 способствовало повышению содержания всех форм калия в почве на 21–53%.

Ключевые слова: дерново-подзолистая почва, минеральные удобрения, формы калия.

DOI: 10.31857/S0002188122010136

ВВЕДЕНИЕ

Калий является важным элементом минерального питания растений, занимающим лидирующие позиции среди других элементов-биофилов по величине выноса из почвы урожаями сельскохозяйственных культур. Тем не менее, изучению калийного состояния почв агроценозов уделяется наименьшее внимание, а использование калийных удобрений находится на минимальном уровне. Вопреки научным требованиям, в последнюю четверть века произошел почти полный отказ от использования этих удобрений. В результате страна ежегодно недополучает сотни тысяч тонн продукции растениеводства [1–5]. Считается, что почвы содержат значительные запасы валового калия, однако даже при значительных валовых запасах этого элемента калийное питание может лимитироваться сорбционно-десорбционными процессами [6, 7]. При постоянном отчуждении калия урожаем и неполным возвратом элемента с

удобрениями происходит медленное, но постоянное снижение содержания доступного калия в почве, уменьшаются его подвижность и способность почвы к восстановлению исходного уровня содержания калия в легкодоступной для растений форме, что в конечном итоге приводит к недобору урожая [8–10].

Цель работы – выявить влияние длительного применения минеральных удобрений на трансформацию калийного режима дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почвы.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Полевой стационарный опыт был заложен в 1978 г. на опытном поле Пермского НИИСХ (филиала ПФИЦ УрО РАН) на дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве со следующими агрохимическими характеристиками (слой 0–20 см): рН_{KCl} 5.6, гидролитическая кислотность – 2.0, об-

Таблица 1. Влияние длительного применения удобрений на продуктивность полевого севооборота, хозяйственный баланс калия и его интенсивность

Вариант	Продуктивность севооборота (среднее за 1–5-ю ротации), т к.е./га/год	Поступило с удобрениями K ₂ O в сумме за 1–5-ю ротации, кг/га	Вынос K ₂ O урожаем полевых культур в сумме за 1–5-ю ротации, кг/га	Баланс, кг/га		Интенсивность баланса, %
				за 5 ротаций	за год	
Контроль	2.5	0	2729	–2729	–68	0
N90	3.1	0	3100	–3100	–77	0
P90	2.8	0	2783	–2783	–70	0
K90	2.9	2250	2964	–714	–18	76
(NP)90	3.0	0	2907	–2907	–73	0
(NK)90	3.0	2250	3176	–926	–23	71
(PK)90	2.9	2250	2828	–578	–14	80
(NPK)90	3.3	2250	3557	–1307	–33	63
HCP ₀₅	0.2	–	–	–	–	–

менная – 0.025, сумма поглощенных оснований – 21.0 ммоль/100 г почвы, содержание гумуса по Тюрину – 2.12%, подвижных форм фосфора в пахотном слое – 175, обменного калия – 203 мг/кг почвы (по Кирсанову). Содержание физической глины варьировало в интервале 40.1–44.9% в зависимости от варианта опыта. Схема опыта включала следующие варианты: без удобрений (контроль), N90, P90, K90, (NP)90, (NK)90, (PK)90, (NPK)90. Исследования проводили в 8-польном севообороте со следующим чередованием культур: чистый пар–озимая рожь–картофель–пшеница–клевер 1-го года пользования–клевер 2-го года пользования–ячмень–овес. Минеральные удобрения вносили под зерновые культуры и картофель, в посеве клевера изучали последствие. В опыте использовали N_{аа}, P_с, K_х. Известь вносили перед закладкой опыта в дозе по 1.0 Н_г. Органические удобрения в опыте не использовали. Общая площадь делянки – 120 м², учетная – 76.4 м². Размещение вариантов в опыте рендомизированное.

Почвенные образцы для исследования отбирали в конце 5-й ротации севооборота после уборки овса в слое 0–20 см. Основные агрохимические показатели почвы определяли в соответствии с ГОСТами и методиками ЦИНАО. Содержание различных форм калия изучали с использованием следующих методов: водорастворимого – по Александровой, легкоподвижного – в 0.0025 М CaCl₂-вытяжке, обменного – по Кирсанову и Масловой, необменного легкогидролизуемого – по Пчелкину, необменного фиксированного – по Гедройцу. Валовое содержание калия определяли методом спекания (ГОСТ 26261-84). Запасы форм калия рассчитывали через массу пахотного слоя,

плотность слоя почвы 0–20 см варьировала от 1.23 до 1.28 г/см³.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Максимальная продуктивность полевого 8-польного севооборота в среднем за 5 ротаций получена при внесении (NPK)90 – 3.3 т к.е./га в год, что было на 32% достоверно больше контрольного варианта. Минимальный прирост продуктивности отмечен при внесении P90, K90 и (PK)90. Зафиксирован отрицательный баланс калия во всех изученных вариантах (табл. 1). Наиболее высокий отрицательный баланс сложился при одностороннем внесении азотных, фосфорных удобрений, сочетании NP и в контрольном варианте опыта. Интенсивность баланса в вариантах с применением калийных удобрений в дозе K90 составила 63–80%.

Валовое содержание калия в дерново-подзолистой почве в слое 0–20 см в вариантах опыта варьировало от 17100 до 21300 мг/кг (рис. 1а). Максимальное его содержание в почве отмечено в варианте (NPK)90 – 21300 и в варианте K90 – 20300 мг/кг, что на 21 и 15% достоверно больше контрольного варианта. Запасы валового калия в варианте (NPK)90 составили 54.6 т/га, в варианте K90 – 50.7 т/га (табл. 2), что соответствовало целинному аналогу, расположенному вблизи опытного поля под злаково-разнотравным лугом (50.2 т/га). Можно предположить, что применение калийных удобрений в чистом виде в дозе K90 и (NPK)90 способствовало поддержанию калийного режима почвы на исходном уровне. Минимальное содержание валового калия и его запасов в почве отмечено в вариантах (NP)90 и (NK)90.

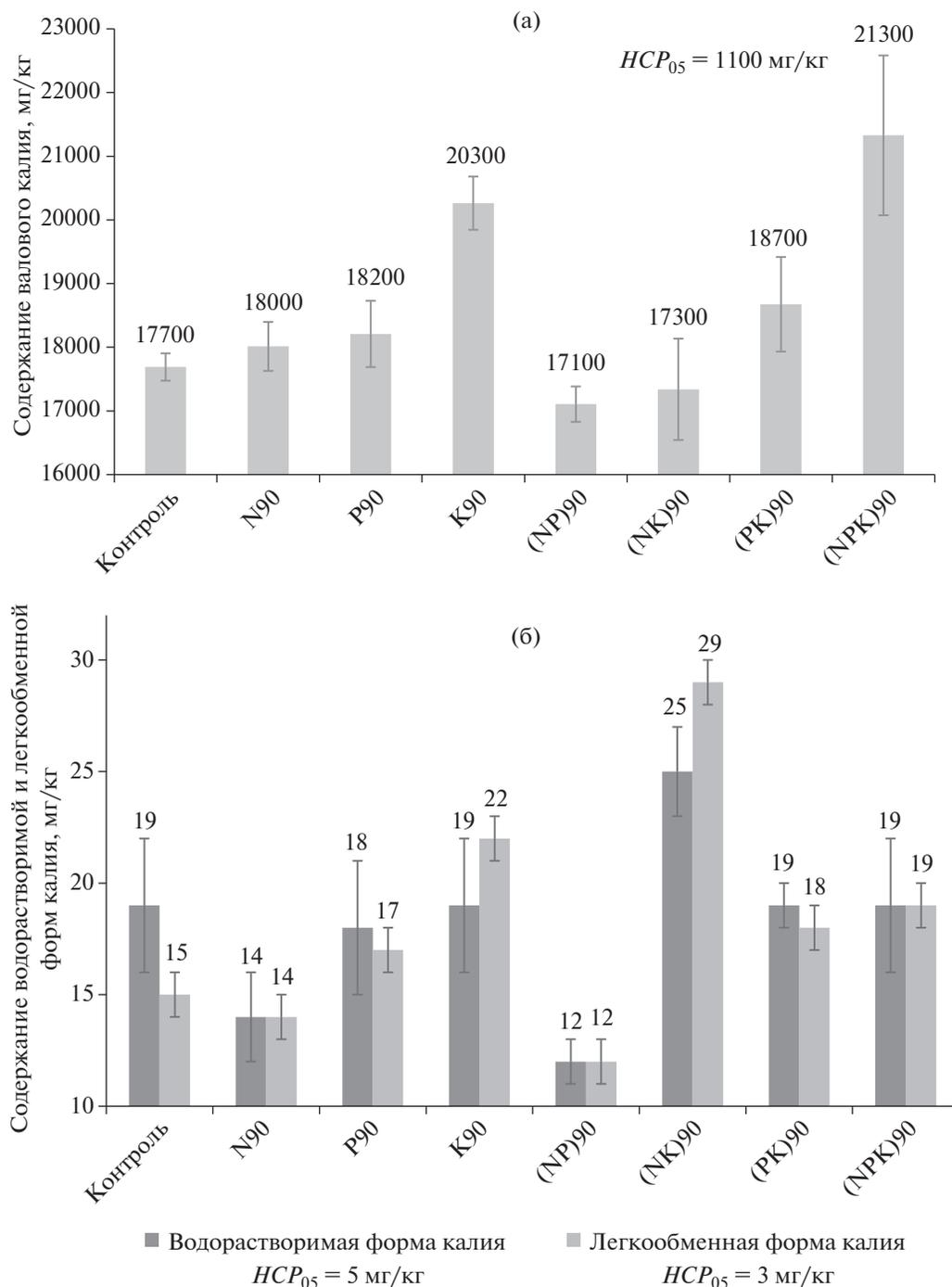


Рис. 1. Содержание калия в дерново-подзолистой почве при длительном применении минеральных удобрений, мг/кг: (а) – валового, (б) – водорастворимой и легкообменной форм, (в) – обменных форм, (г) – необменных (гидролизуемой и фиксированной) форм.

Содержание валового калия отражает потенциальный почвенный запас данного элемента [9]. Доступность калия растениям определяется прочностью его связи с минеральной основой почвы. Для диагностики калийного питания и количественного выражения содержания различ-

ных форм калия были проведены исследования по содержанию K_2O в различных вытяжках из почвы: водной, солевой и кислотной.

Водорастворимые соединения калия в почвенном растворе представлены солями угольной, азотной и фосфорной кислот и находятся в легко-

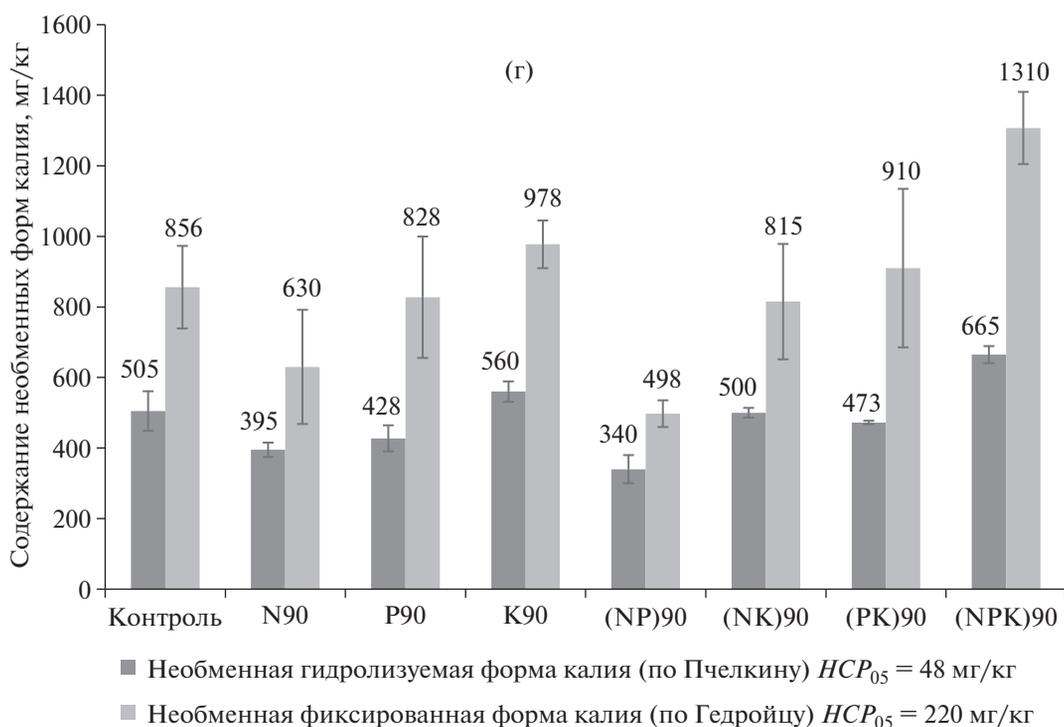


Рис. 1. Окончание.

доступном состоянии для растений [11]. Содержание водорастворимых соединений калия в исследованной дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве составило 12–25 мг/кг (рис. 16). Практически не было различий содержания водорастворимой и легкодоступной форм калия, представленных хлоркальциевой вытяжкой из

почвы (12–29 мг/кг). По содержанию K_2O в 0.0025 М $CaCl_2$ -вытяжке судили о степени подвижности этого элемента, следовательно, об обеспеченности калийным питанием растений. Следует отметить, что содержание калия в водной и хлоркальциевой вытяжках было минимальным в вариантах (NP)90 и N90, что возможно было

Таблица 2. Запасы форм калия в дерново-подзолистой почве (слой 0–20 см) длительного опыта, т/га (5-я ротация, 2017 г.)

Вариант	Валовое содержание	Легкообменная	Обменная по Кирсанову	Обменная по Масловой	Необменная по Пчелкину	Необменная по Гедройцу
Контроль	44.2	0.04	0.3	0.4	1.3	2.1
N90	44.7	0.03	0.3	0.4	1.0	1.6
P90	44.8	0.04	0.3	0.4	1.1	2.0
K90	50.7	0.06	0.5	0.7	1.4	2.4
(NP)90	43.1	0.03	0.2	0.3	0.9	1.3
(NK)90	43.3	0.07	0.5	0.6	1.3	2.0
(PK)90	47.4	0.05	0.4	0.6	1.2	2.3
(NPK)90	54.6	0.05	0.4	0.6	1.7	3.3
HCP ₀₅	2.7	0.01	0.1	0.1	0.1	0.6

связано с высоким выносом этого элемента возделываемыми в севообороте культурами. Содержание водорастворимых и легкоподвижных соединений калия в варианте (NK)90 было в 1.3 и 1.9 раза больше, чем в контроле. Ионы калия в почвенном растворе и ионы калия, адсорбированные почвой, находятся в динамическом равновесии. При возделывании сельскохозяйственных культур в вариантах без внесения удобрений в почве оставалось небольшое количество K_2O (12–19 мг/кг) в почвенном растворе, который пополняется за счет обменной формы калия.

Содержание обменных соединений калия в почве на сегодняшний день является основным диагностическим показателем уровня калийного питания растений. Наиболее распространенными в нашей стране являются 2 метода определения содержания обменных соединений калия – в вытяжке 1 М CH_3COONH_4 (метод Масловой) и в вытяжке 0.2 М HCl (метод Кирсанова для подзолистых почв). Содержание обменной формы калия по методу Кирсанова варьировало в зависимости от вида внесенных удобрений от 94 до 210 мг/кг почвы, и было максимальным в варианте K90 (рис. 1в).

Длительное (в течение 5-ти ротаций севооборота) использование хлористого калия в дозе 90 кг д.в./га не привело к увеличению содержания обменной формы калия, но способствовало сохранению исходного уровня содержания K_2O в почве. В контроле отмечено снижение содержания обменной формы калия на 40.9% относительно его исходного содержания перед закладкой опыта. При использовании 1 М раствора ацетата аммония (метод Масловой) из почвы извлекали большее количество обменных ионов калия (128–

278 мг/кг), однако закономерности изменения содержания обменных соединений калия в вариантах опыта были одинаковыми. Вне зависимости от метода, минимальное количество обменного калия определено в варианте (NP)90 (94 и 128 мг K_2O /кг соответственно). Длительный дефицитный баланс калия привел к существенному снижению содержания в почве обменной формы калия. Уровень обменной формы калия, установившийся в длительном опыте за 5 ротаций севооборота в варианте (NP)90, следует считать показателем нижнего агрономического предела обеспеченности почвы калием [12]. В этом варианте в почву не только не вносили калийные удобрения, но и сочетание азотных удобрений с фосфорными резко увеличило потребление калия растениями.

Еще в 1966 г. В.У. Пчелкин высказал предположение о пополнении обменных соединений калия за счет необменных соединений этого элемента в почве и пришел к выводу, что калий, переходящий в вытяжку 2 М HCl, соответствует необменной поглощенной форме этого элемента. Снижение содержания необменных гидролизующихся соединений калия в пахотном слое почвы наблюдали при длительном одностороннем внесении азотных, фосфорных удобрений и их сочетания (рис. 1г), что было связано с переходом этого элемента прежде всего в обменную форму для обеспечения роста и развития растений или наоборот закрепления в виде фиксированной формы необменного калия. Минимальный уровень необменной гидролизующейся формы калия по Пчелкину определен в варианте (NP)90 – 340 мг/кг почвы, что в 1.5 раза меньше, чем в контроле. Длительное внесение K90 и (NPK)90 способствовало закреплению остаточного калия удобрений в необменно

поглощенном состоянии. В варианте (NPK)90 отмечено наибольшее содержание необменных гидролизуемых соединений калия в изученной почве (665 мг/кг), что было в 1.3 раза больше, чем в контрольном варианте.

Внесение азотных удобрений в чистом виде и в сочетании с фосфорными, усиливая развитие растений, способствовало увеличению хозяйственного выноса калия культурами севооборота и привело к существенному уменьшению фракции необменного фиксированного калия по Гедройцу. В данных вариантах содержание необменных фиксированных соединений калия составило 498–630 мг/кг, что было в 1.4–1.7 раза меньше, чем в контроле и в 2.1–2.6 раза, чем в варианте (NPK)90. Максимальное содержание необменных фиксированных соединений калия отмечено при внесении полного минерального удобрения (NPK)90 – 1310 мг/кг, что было в 1.5 раза больше контроля.

Изучение содержания различных форм калия в дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве позволило сформулировать вывод о том, что сумма обменных и необменных форм калия, которые обеспечивают калийное питание растений, составляет малую долю от общего его содержания в почве (обменные формы – 0.5–1.4, необменные формы – 2.0–6.1%). Основу калийного фонда почвы составляет калий почвенного скелета, который входит в состав труднорастворимых почвенных минералов.

Длительное применение азотно-фосфорных удобрений привело к достоверному снижению в почве валовых запасов калия на 1.1, запасов обменных соединений – на 0.1, необменных соединений по Пчелкину – на 0.4 и по Гедройцу – на 0.9 т/га.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Содержание валового калия в пахотном горизонте дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почвы варьировало от 17 100 до 21 300 мг/кг. Доля обменных и необменных форм калия, доступных для питания растений и являющихся ближайшим резервом, от валового содержания составила 0.5–6.1%. Трансформация дерново-подзолистой почвы без внесения калийных удобрений происходила в направлении деградации калийного фонда. Наибольшие потери были выявлены в варианте внесения (NP)90, где содержание соединений легкообменного калия уменьшилось на 20, обменных по Кирсанову и по Масловой – на 22–25, необменных гидролизуемых по Пчелкину – на 33, необменных фиксированных по Гедройцу –

на 42% относительно контрольного варианта. Максимальное содержание обменных соединений калия определено в варианте K90, необменных соединений и валового содержания – в варианте применения (NPK)90.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края в рамках научного проекта № 20-45-596005 p_НОЦ_Пермский край.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Якименко В.Н. Изменение содержания форм калия по профилю почвы при различном калийном балансе в агроценозах // *Агрохимия*. 2007. № 3. С. 3–11.
2. Беляев Г.Н. Калийные удобрения из калийных солей Верхнекамского месторождения и их эффективность. Пермь: Перм. кн. изд-во, 2005. 304 с.
3. Прокошев В.В., Дерюгин И.П. Калий и калийные удобрения. М.: Ледум, 2000. 185 с.
4. Шафран С.А., Кирпичников Н.А. Научные основы прогнозирования содержания подвижных форм фосфора и калия в почвах // *Агрохимия*. 2019. № 4. С. 3–10.
5. Meyer G., Bell M.J., Doolette C.L., Brunetti Zh. YQ., Lombi E., Kopittke P.M. Plant-available phosphorus in highly concentrated fertilizer bands: Effects of soil type, phosphorus form, and coapplied potassium // *J. Agricult. Food Chem.* 2020. V. 68. № 29. С. 7571–7580.
6. Артемьева З.С., Фрид А.С., Титова В.И. Миграционная доступность калия растениям на суглинистых почвах // *Агрохимия*. 2019. № 7. С. 16–26.
7. Никитина Л.В. Исследования калийного режима разных типов почв в длительных опытах Геосети // *Агрохимия*. 2018. № 1. С. 39–51.
8. Носов В.В. Значение калийных удобрений для сохранения экологического равновесия // *Плодородие*. 2002. № 2. С. 28–30.
9. Якименко В.Н. Формы калия в почве и методы его определения // *Почвы и окружающая среда*. 2018. Т. 1. № 1. С. 25–31.
10. Никитина Л.В. Действие и последствие разных систем удобрения в длительном полевом опыте на калийный режим суглинистой почвы // *Плодородие*. 2015. № 6. С. 3–6.
11. Пчелкин В.У. Почвенный калий и калийные удобрения М.: Колос, 1966. 336 с.
12. Никитина Л.В. Динамика обменного калия и его минимальные уровни в агроценозах на дерново-подзолистых почвах // *Агрохимия*. 2007. № 2. С. 14–18.

Influence of Mineral Fertilizers on the Transformation of the Potash Fund of Sod-Podzolic Heavy Loamy Soil

N. E. Zavyalova^{a,#}, M. T. Vasbieva^a, D. G. Shishkov^a, and I. V. Kazakova^a

*^aPerm Federal Research Center of the Ural Branch of the RAS
ul. Kultury 12, Perm Krai, Perm district, d. Lobanovo 614532, Russia*

[#]E-mail: nezavyalova@gmail.com

In the field stationary experiment of 1978, the bookmarks studied the effect of prolonged application of mineral fertilizers on the content of total potassium, its water-soluble, easily exchangeable, exchangeable and non-exchangeable forms in sod-podzolic heavy loamy soil. The use of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizers in pure form and their combinations (a dose of 90 kg a.s./ha) showed that the introduction of nitrogen-phosphorus fertilizers without the use of potassium led to a decrease in the content of easily exchangeable potassium compounds relative to the control by 20, exchangeable by Kirsanov – by 22 (by Maslova – by 25), non-exchangeable hydrolyzable by Pchelkin – by 33, non-exchangeable fixed by Giedroyc – by 42%. The use of nitrogen fertilizers in pure form had a greater impact on the content of non-exchangeable forms of potassium, a decrease in the content of non-exchangeable forms of potassium in the soil by 22–26% was noted. With prolonged application of potash fertilizers, there was a significant increase in the soil relative to the control version of the total potassium content by 15, its easily exchangeable compounds – by 47, Kirsanov and Maslova exchange compounds – by 63–75%. The combination of nitrogen-potassium fertilizers significantly increased the content of easily exchangeable and exchangeable potassium compounds in the soil. Only the introduction of complete mineral fertilizer (NPK)90 contributed to an increase in the content of all forms of potassium in the soil by 21–53%.

Key words: sod-podzolic soil, mineral fertilizers, forms of potassium.