

АГРОХИМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ, СОДЕРЖАНИЕ И ЗАПАСЫ ПОДВИЖНЫХ И НЕОБМЕННЫХ ФОРМ КАЛИЯ В ПРОФИЛЕ ПАХОТНОЙ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЫ ДЛИТЕЛЬНОГО ОПЫТА ПРИ ВНЕСЕНИИ ВОЗРАСТАЮЩИХ ДОЗ NPK*

Н.Е. Завьялова, доктор биологических наук, М.Т. Васбиева, кандидат биологических наук,
Д.Г. Шишков, О.В. Иванова

Пермский федеральный исследовательский центр УрО РАН,
614532, Пермский край, Пермский район, с. Лобаново, ул. Культуры, 12
E-mail: nezavyalova@gmail.com

Исследования проводили с целью изучения влияния возрастающих доз NPK на изменение агрохимических показателей, обменных и необменных форм калия по профилю дерново-подзолистой почвы. Обобщены результаты исследований, полученные в стационарном полевом опыте 1978 г. закладки на дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве Предуралья. Схема опыта предусматривала применение возрастающих доз полного минерального удобрения от 30 до 150 кг д.в./га в полевом восьмипольном севообороте. Внесение NPK по 60...150 кг д.в./га совместно с запашкой соломы способствовало сохранению исходного уровня запасов органического углерода в пахотном слое почвы. Распределение органического углерода вглубь по профилю резко убывающее. Применение (NPK)_{30...150} привело к существенному накоплению в пахотном слое почвы минерального азота. При внесении высоких доз (NPK)_{120...150} увеличение количества минерального азота отмечено по всему метровому слою, запасы возросли в 4,0...4,2 раза. Минеральное удобрение в дозе 90...150 кг д.в./га привело к повышению содержания подвижных соединений фосфора в слое 0...80 см. Запасы фосфатов в метровом слое почвы возросли на 1,2...1,9 т/га. Содержание легкообменных соединений калия в пахотном слое почвы увеличилось при длительном внесении NPK по 60...150 кг д.в./га (в 1,8...3,2 раза), подвижных – при применении NPK по 90...150 кг д.в./га (в 1,2...1,4 раза, относительно исходного уровня). Однако при внесении NPK наблюдали снижение содержания необменной формы калия в метровом слое почвы. Принципиальных различий в характере формирования метрового профиля рассматриваемых вариантов опыта в зависимости от различных доз NPK не установлено. Сопоставляя распределение основных элементов питания по профилю дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почвы, следует отметить, что основные изменения обусловлены внесением минеральных удобрений и произошли в пределах верхнего 0...40 см слоя.

AGROCHEMICAL INDICATORS, CONTENT AND RESERVES OF MOBILE AND NON-EXCHANGEABLE POTASSIUM FORMS IN THE PROFILE OF ARABLE SODDY-PODZOLIC SOIL OF LONG-TERM EXPERIENCE AT INTRODUCTION OF INCREASING DOSES OF NPK

Zavyalova N.E., Vasbieva M.T., Shishkov D.G., Ivanova O.V.

Perm Federal Research Center, Ural Branch Russian Academy of Sciences,
614532, Permskii krai, Permskii raion, s. Lobanovo, ul. Kul'tury, 12
E-mail: nezavyalova@gmail.com

The aim of the work is to study the effect of increasing doses of NPK on the change in agrochemical parameters, exchangeable and non-exchangeable forms of potassium along the profile of sod-podzolic soil. The results of studies obtained in a stationary field experiment in 1978 of laying on sod-podzolic heavy loamy soil of the Cis-Urals are summarized. We studied the introduction of increasing doses of complete mineral fertilizer from 30 to 150 kg AI/ha in a field eight-field crop rotation. It has been established that the application of NPK at the rate of 60-150 kg a.i./ha, together with the plowing of straw, contributed to the preservation of the initial level of organic carbon reserves in the arable soil layer. The distribution of organic carbon in depth along the soil profile sharply decreases. The use of (NPK)₃₀₋₁₅₀ led to a significant accumulation of mineral nitrogen in the soil in the arable layer. With the introduction of high doses (NPK)₁₂₀₋₁₅₀, an increase in the amount of mineral nitrogen was noted throughout the entire meter layer, the reserves increased by 4.0-4.2 times. The use of mineral fertilizer at a dose of 90-150 kg of AI/ha led to an increase in the content of mobile phosphorus compounds in the 0-80 cm layer. Phosphate reserves in the 1-meter soil layer increased by 1.2-1.9 t/ha. The content of readily exchangeable potassium compounds in the arable soil layer increased with long-term application of NPK at 60-150 kg of a.i./ha (by 1.8-3.2 times), mobile – with the use of NPK at 90-150 kg of a.i. / ha (1.2-1.4 times – relative to the initial level). However, when NPK was introduced, a decrease in the content of the non-exchangeable form of potassium in a meter-long soil layer was observed. Fundamental differences were not established in the nature of the formation of the meter profile of the considered variants of the experiment, depending on various doses of NPK. Comparing the results on the distribution of the main nutrients along the profile of soddy-podzolic heavy loamy soil, it should be noted that the main changes occurred within the upper 0-40 cm layer and were caused by the application of mineral fertilizers.

Ключевые слова: кислотность почвы, подвижные формы элементов питания, миграция по профилю, формы калия.

Key words: soil acidity, mobile forms of nutrients, profile migration, potassium forms.

Исследования проводили в Предуралье, которое исходя из природно-хозяйственного районирования, относится к южно-таежной лесной зоне, где преобладают дерново-подзолистые почвы. Почвы данного типа характеризуются низким уровнем естественного плодородия. Систематическое продолжительное применение минеральных удобрений является мощным фактором воздействия на агрохимические свойства

дерново-подзолистых почв и урожайность возделываемых сельскохозяйственных культур. При выявлении роли агротехнических приемов на процессы трансформации и миграции элементов питания необходимо исследовать их внутрипрофильное распределение, которое для разных типов почв специфично и отражает их типовые различия [1,2]. Формирование профиля в конкретных климатических условиях зависит, прежде всего, от гранулометри-

Табл. 1. Изменение содержания $C_{орг}$ по профилю почвы при длительном применении возрастающих доз полного минерального удобрения

Вариант	Содержание, %						Запасы, т/га			
	перед закладкой, 0...20 см	VI ротация					перед закладкой, 0...20 см	VI ротация		
		глубина слоя, см						глубина слоя, см		
		0...20	20...40	40...60	60...80	80...100		0...20	0...40	0...100
Без удобрений	1,24	1,12	0,76	0,42	0,28	0,19	32	29	50	77
(NPK) ₃₀	1,20	1,13	0,57	0,55	0,44	0,32	31	29	45	85
(NPK) ₆₀	1,24	1,21	0,80	0,39	0,32	0,26	32	32	53	82
(NPK) ₉₀	1,29	1,33	0,86	0,57	0,45	0,39	34	34	58	101
(NPK) ₁₂₀	1,16	1,34	0,71	0,52	0,34	0,29	30	35	54	89
(NPK) ₁₅₀	1,23	1,37	0,80	0,44	0,33	0,32	32	36	57	91
HCP ₀₅	–	0,19	$F_{\phi} < F_T$	$F_{\phi} < F_T$	$F_{\phi} < F_T$	$F_{\phi} < F_T$	–	5	6	$F_{\phi} < F_T$

ческого и химического состава почв, от распределения главных элементов-органогенов (азота, фосфора, калия, кальция, магния) в генетическом профиле дерново-подзолистой почвы и от количества и качества поступающего в почву органического вещества. Установлено, что интенсивное применение удобрений, периодическое известкование и культура севооборота влияют на агрохимические свойства дерново-подзолистой почвы на всю глубину метрового профиля, но наиболее существенные изменения происходят в верхнем пахотном (0-20 см) и подпахотном (20-40 см) слоях. Масштабы и направление изменения свойств почвы в пределах метрового профиля тесным образом связаны с интенсивностью и типом окультуривания [3,4]. Характер изменения агрохимических свойств почвы обусловлен способом ее использования. Основные изменения происходят в пахотном слое и зависят от интенсивности антропогенного воздействия. Длительное экстенсивное использование пашни приводит к подкислению почвы и потере элементов питания [5,6]. На перемещение биофильных элементов по профилю оказывает влияние гранулометрический состав почвы, промывной водный режим, вносимые удобрения, возделываемые культуры и другие природные и антропогенные факторы [7,8].

Цель исследований – изучить влияние возрастающих доз NPK на изменение агрохимических показателей, обменных и необменных форм калия по профилю дерново-подзолистой почвы.

Методика. Полевой стационарный опыт был заложен в 1978 г. на опытном поле Пермского НИИСХ (филиала ПФИЦ УрО РАН) на дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве. Схема опыта включала 6 уровней минерального питания: (NPK)₀ – контроль; (NPK)₃₀; (NPK)₆₀; (NPK)₉₀; (NPK)₁₂₀; (NPK)₁₅₀. Исследования проводили в восьмипольном севообороте со следующим чередованием культуры: чистый пар, озимая рожь, картофель, пшеница с подсевом клевера, клевер 1 г.п., клевер 2 г.п., ячмень, овес. Минеральные удобрения вносили под зерновые культуры и картофель, на клевере изучали последствие. В опыте использовали мочевины или аммиачную селитру, суперфосфат и хлористый калий. Известь вносили перед закладкой опыта в дозе 1,0 Нг. Общая площадь делянки – 120 м², учетная – 76,4 м². Опыт заложен в 2-х полевых закладках, размещение вариантов рендомизированное. В течение четырёх ротаций восьмипольного севооборота солому с поля удаляли, органические удобрения в почву не вносили, уровень органического углерода определяло только количество пожнивно-корневых остатков возделываемых культур. С середины пятой ротации севооборота солому с поля перестали отчуждать.

Почвенные образцы для исследований отбирали в 2021 г. после уборки по слоям до глубины 1 метр с шагом 20 см. Вегетационный период 2021 г. был аномально засушливым, что могло отразиться на результатах агрохимических исследований. Май и июнь 2021 г.

Табл. 2. Изменение показателей кислотности, суммы обменных оснований и степени насыщенности основаниями по профилю почвы при длительном применении возрастающих доз полного минерального удобрения

Вариант	Перед закладкой, 0...20 см	VI ротация				
		глубина слоя, см				
		0...20	20...40	40...60	60...80	80...100
pH_{KCl}						
Без удобрений	5,7	5,2	4,9	4,8	4,8	6,0
(NPK) ₃₀	5,8	5,8	5,3	5,0	4,9	6,4
(NPK) ₆₀	6,0	4,6	4,8	4,7	4,8	6,1
(NPK) ₉₀	5,9	4,7	4,6	4,5	4,5	4,7
(NPK) ₁₂₀	5,8	4,7	4,6	4,5	4,5	4,7
(NPK) ₁₅₀	5,7	4,5	4,6	4,4	4,4	4,7
HCP ₀₅	–	0,3	0,4	0,3	0,3	0,5
Нг, смоль(экв)/100 г						
Без удобрений	2,2	2,5	2,7	2,8	2,8	1,4
(NPK) ₃₀	2,5	2,3	2,9	2,6	1,8	0,9
(NPK) ₆₀	2,0	3,8	3,3	3,1	2,8	1,7
(NPK) ₉₀	2,0	4,0	3,5	3,5	2,9	2,5
(NPK) ₁₂₀	2,4	3,4	3,3	3,4	2,7	1,9
(NPK) ₁₅₀	2,2	5,1	3,8	3,7	3,1	2,4
HCP ₀₅	–	0,2	0,4	0,5	0,3	0,6
S, смоль(экв)/100 г						
Без удобрений	20,0	17,0	18,3	24,0	27,7	40,7
(NPK) ₃₀	16,7	21,4	24,9	27,6	35,4	47,8
(NPK) ₆₀	18,2	16,7	19,3	25,5	27,7	43,1
(NPK) ₉₀	21,5	15,7	18,5	23,0	25,7	29,6
(NPK) ₁₂₀	20,0	16,7	21,1	25,4	32,7	39,0
(NPK) ₁₅₀	20,3	16,0	20,6	24,5	26,1	27,3
HCP ₀₅	–	3,4	2,8	1,9	3,1	7,0
V, %						
Без удобрений	90	87	87	90	91	97
(NPK) ₃₀	87	90	90	91	95	98
(NPK) ₆₀	90	81	85	89	91	96
(NPK) ₉₀	92	79	84	87	90	92
(NPK) ₁₂₀	89	85	86	88	92	95
(NPK) ₁₅₀	90	76	85	87	89	92
HCP ₀₅	–	3	3	2	2	2

выдались сухими и жаркими. Высокая температура воздуха и недостаток осадков привели к большому дефициту влаги в почве. ГТК составил 1,0, при средне-многолетней величине этого показателя 1,4. В июле наблюдали немногочисленные, но обильные дожди ливневого характера. Гидротермический коэффициент по декадам сильно изменялся, в 1 декаде он был равен 2,9, во 2 декаде – 0,2, в 3 декаде – 4,3. В августе на территории Пермского края установилась жаркая и сухая погода. Большая часть осадков выпала в первой декаде этого месяца, затем незначительная их часть в третьей декаде. Сумма осадков составила 23,9 мм, или 31 % от среднемноголетней нормы, ГТК – 0,4.

Основные агрохимические показатели почвы определяли в соответствии с ГОСТами и методиками ЦИНАО. Содержание различных форм калия изучали с использованием следующих методов: легкоподвижной – в 0,01M CaCl₂ вытяжке, подвижной (обменный) по Кирсанову, необменной по Гедройцу. Концентрацию необменных соединений рассчитывали по разности между содержанием калия в 10 %-ной HCl вытяжке и количеством подвижных форм этого элемента, определенных по методу Кирсанова.

Результаты и обсуждение. За 43 года проведения длительного стационарного опыта произошло изменение всех агрохимических показателей исследуемой дерново-подзолистой почвы. Содержание органического углерода в варианте без удобрений и при внесении NPK в дозе 30 кг д.в./га снизилось на 9...10 % (табл. 1). Применение NPK в дозах 60...150 кг д.в./га способствовало формированию большего количества биомассы пожнивных и корневых остатков, что привело к сохранению или даже некоторому повышению органического углерода в пахотном (0...20 см) слое почвы при внесении максимальных доз. С возрастанием дозы минерального удобрения наблюдали увеличение запасов C_{орг} в верхнем слое (0...20 см) почвы с 29 т/га в варианте без удобрений до 36 т/га при максимальной дозе NPK. Значимого влияния на содержание углерода в глубинных горизонтах почвы это не оказало, оно постепенно убывало.

Сельскохозяйственное использование почвы без внесения удобрений в течение длительного периода исследований привело к подкислению почвенного раствора в пахотном слое на 0,5 ед. рН_{KCl} (табл. 2). С возрастанием дозы физиологически кислых удобрений с 30 до 150 кг д.в./га отмечено существенное подкисление почвы в пахотном слое до рН_{KCl} 4,5. В варианте без удобрений и с умеренными дозами NPK вглубь по профилю до 80 см наблюдали тенденцию к увеличению концентрации ионов водорода, а в слое 80...100 см она уменьшалась (рН_{KCl} – 6,0...6,4). При более высоких дозах удобрений величина показателя рН_{KCl} практически не изменялась по агрохимическим горизонтам (рН_{KCl} – 4,4...4,7).

В вариантах стационарного полевого опыта при внесении NPK по 60...150 кг д.в./га выявлено достоверное повышение гидролитической кислотности в пахотном и подпахотном слоях исследуемой почвы с возрастанием дозы минеральных удобрений в 1,4...2,0 раза. Экспериментальные данные указывают на снижение суммы обменных оснований, по сравнению с исходным содержанием, на 15...43 % в верхнем (0...20 см) слое, что связано с их вымыванием в нижележащие горизонты при подкислении почвы, а также выносом сельскохозяйственными культурами. Отмечено высокое содержание обменных оснований в глубинных горизонтах почвы, особенно в слое 80...100 см, что обусловлено не только выщелачиванием кальция и магния из пахотного слоя,

но и особенностями почвообразующей породы, богатой этими элементами.

Тенденция распределения обменного кальция и магния по профилю дерново-подзолистой почвы повторяет закономерности, установленные для суммы обменных оснований. В целом, внесение возрастающих доз NPK оказало слабое влияние на запасы этих элементов, запасы CaO в метровом слое составили 3,3...4,5 т/га, запасы MgO – 519...672 кг/га.

Минеральный азот почвы, который представлен нитратной и аммиачной формой, в слое 0...20 см закономерно увеличивался при внесении возрастающих доз NPK от 10,3 до 59,1 мг/кг. Наблюдали его миграцию в нижележащие слои почвы с постепенным убыванием до 80 см и некоторое его накопление в слое 80...100 см. Такое перемещение минерального азота по профилю связано с его подвижностью и промывным водным режимом исследуемой почвы (табл. 3).

При внесении (NPK)₃₀ наблюдали рост содержания минерального азота в слоях 40...60 (в 1,7 раза) и 80...100 см (в 2,9 раза). В слое 40...60 см отмечено увеличение количества аммонийного азота, а в слое 80...100 см – нитратного. При внесении (NPK)₆₀ достоверное повышение содержания минерального азота установлено в слоях 20...40, 40...60 и 80...100 см, в варианте (NPK)₉₀ – в слое 0...20 см и 40...60 см – в 1,5...3,0 раза. При этом наблюдали равномерное накопление, как нитратного, так и аммонийного азота. При внесении (NPK)₁₂₀ и (NPK)₁₅₀ количество минерального азота возрастало по всему метровому слою – в 3,3...5,7 раза.

Запасы минерального азота в почве при внесении NPK в дозах от 60 до 150 кг д.в./га в слое 0...40 увеличились в 2...5 раз (с 47 до 100...219 кг/га), в слое 0...100 – в 2...4 раза (с 89 до 179...375 кг/га). При использовании высоких доз (NPK)_{120...150} происходило избыточное накопление нитратов и обменного аммония по профилю почвы, что может привести к загрязнению сопредельных сред.

Перед закладкой полевого опыта почва характеризовалась высоким содержанием подвижных соединений фосфора. В процессе сельскохозяйственного использования, через пять ротаций севооборота в варианте без удобрений в слое 0...20 см произошло его снижение на 20 %, так как потребность культур в этом минеральном элементе обеспечивалась благодаря естественному плодородию. С увеличением дозы вносимых удобрений содержание подвижных соединений фосфора в верхнем слое почвы увеличивалось до 530 мг/кг, что в 3,1 раза выше исходного уровня (табл. 4). Содержание подвижных соединений фосфора уменьшалось постепенно с глубиной до 60 см, в слое 60...80 см наблюдали его накопление при внесении NPK в возрастающих дозах.

На глубине 80...100 см определено очень высокое содержание P₂O₅ независимо от варианта опыта, что связано с влиянием почвообразующей породы, богатой этим элементом. Известно, что в дерново-подзолистых почвах основная часть неиспользованного фосфора удобрений превращается со временем в труднодоступные фосфаты оксидов железа и алюминия [9, 10].

Различный уровень минерального питания растений в изучаемых вариантах длительного стационарного опыта оказал значительное влияние на калийный режим почвы. Содержание легкообменных соединений калия, наиболее доступных для растений, в слое 0...20 см увеличилось с ростом дозы удобрения в 3,2 раза (табл. 5). Распределение этой формы калия по профилю постепенно убывающее. Статистически значимое уменьшение легкообменных соединений калия

Табл. 3. Изменение содержания минерального азота по профилю почвы при длительном применении возрастающих доз полного минерального удобрения

Вариант	Содержание, мг/кг					Запасы, кг/га		
	глубина слоя, см					0...20	0...40	0...100
	0...20	20...40	40...60	60... 80	80...100			
N_{мин}								
Без удобрений	10,3	7,7	5,1	4,5	3,9	27	47	89
(NPK) ₃₀	12,9	8,1	8,7	6,6	11,3	34	56	137
(NPK) ₆₀	17,8	19,8	11,0	8,5	12,4	46	100	198
(NPK) ₉₀	29,9	11,8	10,0	6,8	6,2	78	110	179
(NPK) ₁₂₀	45,2	26,3	17,8	16,4	19,2	117	189	352
(NPK) ₁₅₀	59,1	31,8	17,0	16,1	17,6	154	219	375
HCP ₀₅	8,3	5,8	3,2	9,0	3,6	20	38	53
N-NO₃								
Без удобрений	5,0	5,3	4,0	3,0	2,6	13	27	57
(NPK) ₃₀	8,4	5,7	3,7	3,9	9,0	22	37	89
(NPK) ₆₀	5,7	8,5	4,7	4,7	7,1	15	38	88
(NPK) ₉₀	13,3	6,5	5,5	3,5	3,6	34	52	90
(NPK) ₁₂₀	14,7	11,0	8,3	10,8	14,4	38	68	172
(NPK) ₁₅₀	47,1	21,0	10,2	8,5	9,6	123	163	253
HCP ₀₅	7,2	2,6	1,9	1,4	1,7	18	30	39
N-NH₄								
Без удобрений	5,3	2,4	1,1	1,5	1,3	14	20	32
(NPK) ₃₀	4,6	2,4	5,0	2,8	2,3	12	18	49
(NPK) ₆₀	12,2	11,3	6,3	3,8	5,4	32	62	109
(NPK) ₉₀	16,7	5,3	4,5	3,3	2,6	43	58	89
(NPK) ₁₂₀	30,5	15,3	9,5	5,6	4,8	79	121	181
(NPK) ₁₅₀	12,0	10,8	6,8	7,6	8,0	31	56	122
HCP ₀₅	2,6	7,2	3,1	9,9	3,8	30	33	57

в слое 20...40 см отмечено при внесении минимальной дозы NPK (в 2 раза ниже, чем в контроле), что связано, прежде всего, с некомпенсированным выносом калия возделываемыми культурами.

При максимальной в опыте дозе минерального удобрения установлено увеличение содержания легкообменной формы калия в подпахотном горизонте в 3,2 раза, в слое 80...100 см – в 2,8 раза, что объясняется избыточным внесением калия с удобрениями и его накоплением в почвенном растворе [11]. В других вариантах опыта, несмотря на значительные изменения доз вносимого калийного удобрения, различия по содержанию этой формы калия наблюдали только в верхнем горизонте почвы.

Без применения минеральных удобрений содержание подвижных соединений калия по Кирсанову в слое

0...20 см уменьшилось за 43 года ведения опыта со 190 до 129 мг/кг (на 32 %). Внесение NPK по 90...150 кг д.в./га привело к увеличению подвижной формы K₂O в пахотном слое, относительно исходного уровня, на 16...41 %.

С глубиной содержание подвижных соединений калия постепенно уменьшается. При высоких дозах NPK выявлено его передвижение в более глубокие слои. На глубине 20...40 см содержание подвижных форм этого элемента при внесении NPK по 90 и 150 кг д.в./га выше в 1,2...1,4 раза, в остальных вариантах оно сопоставимо с контролем. Внесение минеральных удобрений увеличило запасы подвижных соединений калия в метровом слое почвы при длительном внесении (NPK)₁₅₀ в 1,3 раза.

Содержание необменных соединений калия в исследуемой почве значительно выше, чем подвижных (обменных). В пахотном слое величина этого показателя

Табл. 4. Изменение содержания подвижных соединений фосфора по профилю почвы при длительном применении возрастающих доз полного минерального удобрения

Варианты	Содержание, мг/кг					Запасы, т/га				
	перед закладкой, 0...20 см	VI ротация					перед закладкой, 0...20 см	VI ротация		
		глубина слоя, см						глубина слоя, см		
		0...20	20...40	40...60	60... 80	80...100	0...20	0...40	0...100	
Без удобрений	240	192	167	139	236	376	0,6	0,5	0,9	3,3
(NPK) ₃₀	160	329	150	214	273	456	0,4	0,9	1,3	4,2
(NPK) ₆₀	206	339	200	174	368	454	0,5	0,9	1,4	4,5
(NPK) ₉₀	194	371	225	188	328	428	0,5	1,0	1,6	4,5
(NPK) ₁₂₀	231	446	210	199	346	461	0,6	1,2	1,7	4,9
(NPK) ₁₅₀	173	530	242	252	356	423	0,4	1,4	2,0	5,2
HCP ₀₅	–	123	41	51	91	F _φ <F _τ	–	0,3	0,3	0,8

Табл. 5. Изменение содержания легкообменных, подвижных и необменных соединений калия по профилю почвы при длительном внесении возрастающих доз NPK

Варианты	перед закладкой, 0...20 см	Содержание, мг/кг					Запасы ¹			
		VI ротация					перед закладкой, 0...20 см	VI ротация		
		глубина слоя, см						глубина слоя, см		
		0...20	20...40	40...60	60...80	80...100	0...20	0...40	0...100	
Легкообменные соединения										
Без удобрений	–	10,9	8,0	3,2	1,5	1,3	–	28	50	68
(NPK) ₃₀	–	10,2	3,9	2,2	3,3	1,5	–	27	37	58
(NPK) ₆₀	–	19,9	10,5	4,9	5,4	1,5	–	52	80	116
(NPK) ₉₀	–	29,4	10,4	6,8	3,7	1,7	–	76	105	141
(NPK) ₁₂₀	–	19,3	8,1	5,0	2,1	1,6	–	50	72	98
(NPK) ₁₅₀	–	35,3	15,0	6,7	4,6	3,6	–	92	132	177
HCP ₀₅	–	5,9	2,7	F _ф <F _т	F _ф <F _т	1,5	–	15	22	30
Подвижные соединения										
Без удобрений	190	129	116	98	91	82	0,5	0,3	1,0	2,6
(NPK) ₃₀	140	133	115	108	89	66	0,4	0,3	1,0	2,6
(NPK) ₆₀	182	178	116	93	86	84	0,5	0,5	1,1	2,7
(NPK) ₉₀	185	230	140	122	102	98	0,5	0,6	1,4	3,3
(NPK) ₁₂₀	168	195	135	116	96	77	0,4	0,5	1,0	2,8
(NPK) ₁₅₀	166	234	161	125	111	91	0,4	0,6	1,5	3,5
HCP ₀₅	–	17	13	18	19	F _ф <F _т	–	0,1	0,1	0,2
Необменные соединения										
Без удобрений	–	1040	1065	1435	1400	1230	–	2,7	5,6	18,0
(NPK) ₃₀	–	1015	1160	1270	1100	1050	–	2,6	5,8	16,2
(NPK) ₆₀	–	980	1000	1200	1050	1025	–	2,5	5,2	15,3
(NPK) ₉₀	–	1070	1155	1115	1040	1065	–	2,8	5,9	15,8
(NPK) ₁₂₀	–	992	1025	1250	1230	1060	–	2,6	5,3	16,2
(NPK) ₁₅₀	–	1165	1250	1230	1140	985	–	3,0	6,4	16,7
HCP ₀₅	–	72	125	199	236	136	–	0,2	0,4	1,6

¹запасы легкообменных соединений представлены в кг/га, подвижных и необменных – т/га.

теля изменялась от 980 до 1165 мг/кг в зависимости от вариантов опыта. Достоверно более высокое содержание необменных соединений калия в 1,1...1,2 раза, относительно контрольного варианта, определено только в варианте (NPK)₁₅₀ в слоях 0...20 и 20...40 см и объясняется бездефицитным калийным балансом при длительном внесении высоких доз калийного удобрения в составе NPK. Наибольшее содержание необменной формы калия отмечено в глубинных слоях не удобренной почвы, в вариантах с удобрениями величина этого показателя ниже на 7...15 %. Возможно такая ситуация связана с неоднородностью почвенного покрова или с использованием необменной формы калия на пополнение его подвижной (обменной) формы в связи с большим выносом этого элемента культурами севооборота. Если придерживаться последнего предположения, то в питании растений участвует калий не только пахотного и подпахотного горизонтов, но и калий из необменной формы более глубоких слоев почвы. На метровой глубине во всех вариантах опыта наблюдали снижение содержания необменных соединений калия. Их запасы в пахотном слое составили 2,5...3,0 т/га, в слое 0...100 см – 15,3...18,0 т/га.

Соотношение содержания необменных соединений калия к подвижным (обменным) отражает степень истощенности почвы, ее текущее калийное состояние и специфику трансформации форм этого элемента [7]. Чем выше эта величина, тем сильнее почва истощена в отношении подвижных соединений калия. В условиях нашего опыта это соотношение в слое 0...20 см варьировало в интервале 4,7...8,1 и имело тенденцию к

снижению с возрастанием дозы NPK. Изменение соотношения $K_{необ} : K_{подв}$ в сторону снижения при внесении NPK в дозах от 60 до 150 кг д.в./га наблюдали по всему метровому слою.

Таким образом, длительное сельскохозяйственное использование почвы без применения удобрений привело к подкислению почвенного раствора в слое 0...20 см на 0,5 ед. рН, снижению содержания органического углерода – на 10 %, уменьшению подвижных соединений фосфора – на 20 %, подвижных соединений калия – на 32 %, относительно их содержания в исходной почве.

Внесение NPK по 60...150 кг д.в./га способствовало сохранению исходного уровня запасов органического углерода в пахотном слое почвы. Содержание минерального азота в пахотном слое почвы при внесении (NPK)_{30...150} увеличилось в 1,3-5,7 раза. Наблюдали его миграцию в нижележащие слои почвы с постепенным убыванием до 80 см и некоторым накоплением в слое 80...100 см. При внесении (NPK)_{120...150} увеличение количества минерального азота отмечено по всему метровому слою, запасы возросли в 4,0...4,2 раза, по сравнению с вариантом без удобрений.

Повышение содержания подвижных соединений фосфора в почве наблюдали в слое 0...80 см при внесении более высоких доз полного минерального удобрения 90...150 кг д.в./га. Его запасы в метровом слое почвы повысились с 3,3 до 4,5...5,2 т/га, относительно контроля. Возможно, при длительном применении фосфорных удобрений произошло постепенное максимально возможное насыщение этим элементом верхнего слоя почвы, что способствовало его миграции по профилю. В вариантах

с более низкими дозами 30 и 60 кг д.в./га увеличение содержания подвижных соединений фосфора отмечено в отдельных слоях почвы, что может быть связано, как с применением удобрений, так и с неоднородностью почвенного профиля.

Содержание легкообменных соединений калия увеличивалось с ростом дозы удобрения в слое 0...20 см с 10,2 мг/кг при (НРК)₃₀ до 35,3 мг/кг при (НРК)₁₅₀, их распределение по профилю постепенно убывающее. Внесение НРК по 90...150 кг д.в./га привело к увеличению содержания подвижной формы калия в пахотном слое на 16...41 %. При длительном внесении НРК отмечено снижение содержания необменной формы калия в метровом слое почвы.

Литература

1. Пчелкин В.У. Почвенный калий и калийные удобрения. М.: «Колос», 1966. 336 с.
2. Шафран С.А., Кирпичников Н.А. Научные основы прогнозирования содержания подвижных форм фосфора и калия в почвах // *Агрохимия*. 2019. № 4. С. 3–10
3. Гаркуша И.Ф. Изменение дерново-подзолистых почв под влиянием окультуривания // *Почвоведение*. 1955. № 4. С. 33–47.
4. Доспехов Б.А., Кирюшин Б.Д., Братерская А.Н. Изменение агрохимических свойств дерново-подзолистой почвы по профилю под влиянием 62-летнего применения удобрений и периодического известкования // *Известия ТСХА*. 1975. Вып. 6. С. 30–40.
5. Глазовская М.А., Кречетов П.П., Черницова О.В. Общие закономерности накопления и возобновление запасов элементов – органоенов в дерново-подзолистых почвах хвойно-широколиственных лесов // *Почвоведение*. 2004. №12. С.1430–1439.
6. Минеев В.Г., Гомонова Н.Ф., Морачевская Е.В. Изменение свойств и калийного состояния дерново-подзолистой почвы при 40-летнем применении агрохимических средств // *Агрохимия*. 2013. № 10. С.3–12.
7. Иванов Д.А., Карасева О.В., Рублюк М.В. Мониторинг агрохимических свойств различных угодий в пределах агроландшафта // *Агрохимия*. 2020. №1. С.27–30.
8. Якименко В.Н. Баланс калия, урожайность культур и калийное состояние почвы в длительном полевом опыте в лесостепи Западной Сибири // *Агрохимия*. 2019. № 10. С. 16–24.
9. Касицкий Ю.И. Общие вопросы установления оптимального уровня содержания подвижного фосфора в почвах // *Агрохимия*. 1988. № 10. С. 129–140.
10. Завьялова Н.Е., Сторожева А.Н. Влияние длительного применения минеральных удобрений на фосфатный режим дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почвы // *Агрохимия* 2015. № 9. С.33–40.
11. Якименко В.Н. Изменение содержания форм калия по профилю почвы при различном калийном балансе в агроценозах // *Агрохимия*. 2007. №3. С.5–11.

Поступила в редакцию 20.06.2022
 После доработки 09.08.2022
 Принята к публикации 12.09.2022