

СОДЕРЖАНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ФОРМ КАЛИЯ В ПОЧВЕННОМ ПРОФИЛЕ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЫ ПРЕДУРАЛЬЯ

© 2023 г. Н. Е. Завьялова^а, * (ORCID: 0000-0003-4005-8998),

М. Т. Васбиева^а, Д. Г. Шишков^а, О. В. Иванова^а

^аПермский федеральный исследовательский центр УрО РАН,
ул. Культуры, 12, с. Лобаново, Пермский край, 614532 Россия

*e-mail: nezavyalova@gmail.com

Поступила в редакцию 06.02.2023 г.

После доработки 10.04.2023 г.

Принята к публикации 11.04.2023 г.

Изучено влияние длительного применения азотных, фосфорных и калийных удобрений и их сочетаний (N, P, K, NP, NK, PK и NPK) на изменение в дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве (Albic Retisol (Abruptic, Aric, Loamic)) валового, легкообменного, обменного и необменного содержания калия. Исследования проведены в метровом слое почвы в условиях многолетнего стационарного опыта, заложенного в Пермском крае в 1978 г. В опыте применяли аммиачную селитру или мочевины, двойной или простой суперфосфат и калий хлористый. Доза удобрений — 90 кг д.в./га. Длительное внесение калия хлористого в чистом виде и в сочетании с суперфосфатом и азотными удобрениями (K₉₀, (PK)₉₀, (NK)₉₀, (NPK)₉₀) обеспечило увеличение в пахотном слое почвы валового содержания калия в 1.1–1.2 раза и его различных соединений в 1.1–2.8 раза (относительно контрольного варианта). Здесь отмечено сужение соотношения необменного калия к обменному. Изменения в метровом слое почвы зависели от сочетания удобрений, изучаемой формы калия в почве. Внесение только азотных и фосфорных удобрений (N₉₀, P₉₀, (NP)₉₀) без компенсации выноса калия в течение пяти ротаций восьмипольного полевого севооборота привело к уменьшению запасов обменного и необменного калия в слое 0–40 см на 15–20%. Минимальный уровень содержания обменного калия в дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве в слое 0–20 см составил 108–112 мг/кг.

Ключевые слова: обменный и необменный калий, почвенный профиль, длительный стационарный опыт, баланс калия, валовое содержание калия

DOI: 10.31857/S0032180X23600154, EDN: OILKFX

ВВЕДЕНИЕ

Предуралье относится к южно-таежной лесной зоне. Площадь пахотных земель в Пермском крае составляет 1.1 млн га, из них дерново-подзолистых около 70%. Данный тип почв сформирован на тяжелых по гранулометрическому составу породах и в условиях промывного водного режима. Дерново-подзолистые почвы Предуралья бедны элементами питания, в частности обменным калием. Формирование урожая сельскохозяйственных культур за последние годы в крае и в России в целом происходило в основном за счет естественного плодородия почв и запасов питательных веществ, пополняемых в предыдущие годы, что привело к обеднению пахотных почв питательными веществами [6, 17, 20].

На сегодняшний день из-за отсутствия применения минеральных удобрений или низких доз (12–15 кг д.в./га) в 11 районах Пермского края площадь пашни с очень низким и низким содержанием обменного калия составляет более 20%.

Очень низкую обеспеченность обменным калием имеют 5%, низкую — 13.7%, среднюю — 43.2% пахотных земель [4].

Регион исследования характеризуется высокими природными запасами калийных солей. В Пермском крае расположено самое крупное в мире месторождение калийных солей — “Верхнекамское”, содержащее треть мировых запасов. На территории края работают современные предприятия по производству минеральных удобрений: ПАО “Уралкалий” и АО ОХК “Уралхим” [1]. Эти ведущие предприятия калийной промышленности экспортируют свою продукцию во многие страны мира.

Калий — важный элемент питания, который играет ключевую роль в различных физиологических и биохимических функциях растений. Сбалансированное внесение питательных веществ способствует лучшему росту и развитию растений [5, 16, 21]. Высокое валовое содержание калия в почве не гарантирует полноценного калийного

питания растений, необходимо достаточное количество обменных форм этого элемента в почве. Для создания устойчивого калийного режима почвы и для возможной мобилизации имеющихся запасов почвенного калия важно знать направление процессов трансформации и миграции соединений калия под действием природных и антропогенных факторов [20, 22].

При длительном экстенсивном использовании почвенных ресурсов наблюдается снижение содержания обменного калия как в пахотном горизонте, так и до глубины 50–100 см [9, 14, 18]. Существует вероятность разрушения ценных калийсодержащих минералов в условиях невосполнимых потерь калия [2, 18, 24–26]. При этом нарушаются механизмы саморегуляции содержания почвенных калийных соединений, и происходит истощение их подвижных фракций, ухудшается эффективное и потенциальное плодородие почвы. Основные изменения в содержании форм калия происходят в пахотном слое почвы и зависят от интенсивности антропогенного воздействия. Подвижность обменного калия в дерново-подзолистых почвах обусловлена, прежде всего, условиями формирования этих почв и их генетическими особенностями. Потери калия из почв в результате миграции зависят от гранулометрического состава, кислотности, поглощательной способности почв, количества и распределения осадков [7, 8, 11].

Изучение калийного фонда дерново-подзолистых почвы во время длительного стационарного опыта позволит установить направление и особенности его трансформации в пахотных почвах Предуралья, что является важным в практическом и теоретическом плане направлением исследований в аграрной науке.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследования проводили на опытном поле Пермского НИИСХ – филиала ПФИЦ УрО РАН, в длительном стационарном опыте, заложенном в 1978 г. по сокращенной факториальной схеме $6 \times 6 \times 6$. Почва дерново-подзолистая тяжелосуглинистая (Albic Retisol (Abruptic, Aric, Loamic)) со следующими характеристиками перед закладкой опыта (слой 0–20 см): гумус (по Тюрину) – 2.12%, pH_{KCl} – 5.6, гидролитическая кислотность – 2.0, обменная – 0.025, сумма поглощенных оснований – 21.0 смоль(экв)/кг, содержание подвижных форм фосфора – 175, обменного калия (по Кирсанову) – 203 мг/кг почвы. Чередование культур в севообороте: чистый пар, озимая рожь, картофель, пшеница, клевер 1 года пользования, клевер 2 года пользования, ячмень, овес. Под клевер удобрения не вносили, изучали последствие. Перед закладкой опыта почва была известкована по полной дозе гидролитической

кислотности. Органические удобрения не вносили. Общая площадь делянки 120 м², учетная 76.4 м². Для проведения исследований выбрали следующие варианты: без удобрений (контроль), N₉₀, P₉₀, K₉₀, (NP)₉₀, (NK)₉₀, (PK)₉₀, (NPK)₉₀. Почвенные образцы отбирали в начале шестой ротации севооборота после уборки возделываемой культуры по слоям до глубины 1 м с шагом 20 см.

Содержание различных форм калия изучали с использованием следующих методов: легкоподвижной – в 0.01 М CaCl₂ вытяжке, подвижной (обменной) по Кирсанову, необменной по Гедройцу. Расчет содержания необменного калия определяли по разности содержания калия в 10%-ной HCl (по Гедройцу) и 0.2 М HCl (подвижный по Кирсанову) вытяжках. Валовое содержание калия определяли после мокрого озоления в смеси концентрированной серной кислоты и перекиси водорода [13].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

При длительном (40 лет) сельскохозяйственном использовании дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почвы получен отрицательный баланс по калию на всех изучаемых вариантах полевого стационарного опыта (табл. 1). Наибольший отрицательный баланс сложился в варианте без удобрений, а также при одностороннем внесении азотных и фосфорных удобрений и их сочетании. Интенсивность баланса в вариантах K₉₀, (NK)₉₀, (PK)₉₀, (NPK)₉₀ составила 64–77%. Следовательно, внесение калийных удобрений в дозе 90 кг д.в./га отдельно и совместно с азотными и фосфорными не обеспечило бездефицитный баланс калия в почве.

Почвенный калий принято подразделять на различные формы: легкообменный, обменный, необменный и калий почвенного скелета [7, 14, 23]. Наиболее пристальное внимание уделяется первым трем формам, которые подвижны, обеспечивают питание растений и подвержены влиянию природных и антропогенных факторов.

Исследуемая дерново-подзолистая почва Предуралья имеет высокие природные резервы калия, сформированные в процессе ее развития [3].

В пахотных почвах создаваемый уровень минерального питания значительно влияет на калийный режим почвы. Отмечено более высокое содержание валового калия в пахотном слое почвы относительно контрольного варианта (выше на 12–21%) при длительном внесении калия хлористого как в чистом виде, так и в смеси с суперфосфатом и азотными удобрениями (K₉₀, (PK)₉₀, (NK)₉₀ и (NPK)₉₀) (табл. 2). При одностороннем внесении калийных удобрений валовое содержание калия было достоверно больше, чем в варианте без удобрений и в подпахотном слое почвы. За-

Таблица 1. Баланс калия в полевом восьмипольном севообороте, кг/га (за 5 ротаций, 1978–2017 гг.)

Вариант	Поступление калия* в сумме за 5 ротаций	Хозяйственный вынос калия в сумме за 5 ротаций	Баланс		Интенсивность баланса
			всего	в среднем в год	
		кг/га			
Без удобрений	130	2970	−2840	−71	4
N ₉₀	130	3200	−3070	−77	4
P ₉₀	130	2850	−2720	−68	5
K ₉₀	2380	3075	−695	−17	77
(NP) ₉₀	130	3190	−3060	−77	4
(NK) ₉₀	2380	3540	−1160	−29	67
(PK) ₉₀	2380	3260	−880	−22	73
(NPK) ₉₀	2380	3720	−1340	−34	64

* С удобрениями и семенами.

Таблица 2. Изменение валового содержания калия по профилю почвы при длительном применении минеральных удобрений

Вариант	Содержание, г/кг					Запасы, т/га		
	0–20	20–40	40–60	60–80	80–100	0–20	0–40	0–100
Без удобрений	15.9	17.8	21.6	21.2	21.2	41	89	286
N ₉₀	17.0	22.2	22.0	22.5	21.8	44	104	308
P ₉₀	16.6	17.4	21.4	20.8	19.9	43	90	280
K ₉₀	19.0	21.2	21.7	21.0	20.2	49	107	299
(NP) ₉₀	15.5	19.0	22.5	22.6	20.7	40	92	293
(NK) ₉₀	18.2	19.7	24.2	24.0	21.6	47	101	315
(PK) ₉₀	19.2	22.6	23.8	22.2	22.6	50	111	321
(NPK) ₉₀	17.8	18.8	21.2	20.8	21.1	46	97	291
HCP ₀₅ *	1.6	1.8	2.1	2.3	$F_{\phi} < F_T$	4	4	6

* Здесь и далее в табл. 3–6: HCP – наименьшая существенная разница, F_{ϕ} – фактическое значение критерия Фишера, F_T – теоретическое значение критерия Фишера.

пасы в слое 0–40 см составили 107 т/га и были сопоставимы с расположенной рядом целинной почвой злаково-разнотравного луга [3].

Прослеживается тенденция к увеличению валового содержания калия и его запасов с глубиной исследуемого слоя почвы в вариантах (PK)₉₀ и (NK)₉₀. Запасы валового калия в метровом слое почвы были больше контрольного варианта на 10–12%. Это может быть связано с различной интенсивностью выноса калия растениями по вариантам и различиями в минеральном составе почвенных горизонтов. Применение полного минерального удобрения (NPK)₉₀ повысило валовое содержание калия только в пахотном слое.

Увеличение валового содержания калия выявлено при внесении азотных удобрений N₉₀, до-

стоверное повышение на 25% отмечено в подпахотном слое почвы. Полученные результаты, возможно, связаны с промывным водным режимом почвы, а также разрушением и трансформацией калийсодержащих минералов почвы в результате длительного применения физиологически кислых удобрений и перемещением тонкодисперсных минералов в составе илистой фракции, из пахотного в подпахотный слой [12, 18].

В исследованиях [18] показано, что внесение высоких доз азотного, калийного и полного минерального удобрения вызывает заметное сокращение ближнего резерва калия и ослабление способности почвы к восполнению обменных форм. По данным [2], в результате длительного применения удобрений отмечено уменьшение в 3 раза содержания слюд (мусковит, биотит) – одних из

Таблица 3. Изменение содержания легкообменного калия (в вытяжке 0.01 М CaCl₂) по профилю почвы при длительном применении минеральных удобрений, над чертой — содержание, под чертой — % от валового содержания калия

Вариант	Содержание, мг/кг					Запасы, кг/га		
	0–20	20–40	40–60	60–80	80–100	0–20	0–40	0–100
Без удобрений	<u>10.9</u> 0.07	<u>8.0</u> 0.04	<u>3.2</u> 0.01	<u>1.5</u> 0.01	<u>1.3</u> 0.01	28	50	68
N ₉₀	<u>9.7</u> 0.06	<u>5.1</u> 0.02	<u>3.9</u> 0.02	<u>2.3</u> 0.01	<u>1.4</u> 0.01	25	39	62
P ₉₀	<u>9.4</u> 0.06	<u>6.4</u> 0.04	<u>4.1</u> 0.02	<u>2.5</u> 0.01	<u>1.2</u> 0.01	24	42	65
K ₉₀	<u>24.0</u> 0.13	<u>7.0</u> 0.03	<u>6.7</u> 0.03	<u>1.9</u> 0.01	<u>1.3</u> 0.01	62	81	111
(NP) ₉₀	<u>14.3</u> 0.09	<u>7.0</u> 0.04	<u>4.5</u> 0.02	<u>2.0</u> 0.01	<u>1.3</u> 0.01	37	56	80
(NK) ₉₀	<u>30.7</u> 0.17	<u>13.2</u> 0.07	<u>6.5</u> 0.03	<u>3.5</u> 0.01	<u>1.6</u> 0.01	80	116	150
(PK) ₉₀	<u>20.1</u> 0.10	<u>5.8</u> 0.03	<u>3.5</u> 0.01	<u>1.7</u> 0.01	<u>2.3</u> 0.01	52	68	91
(NPK) ₉₀	<u>29.4</u> 0.17	<u>10.4</u> 0.06	<u>6.8</u> 0.03	<u>3.7</u> 0.02	<u>1.7</u> 0.01	77	105	141
HCP ₀₅	5.9	2.7	$F_{\phi} < F_T$	$F_{\phi} < F_T$	1.5	15	20	32

основных калийсодержащих минералов. Причиной перемещения калия в нижележащие горизонты может быть высокое содержание катионов аммония в почве, который способен вытеснить в почвенный раствор заметную часть ионов калия со специфических позиций [24].

Увеличение содержания легкообменных форм калия, которые являются наиболее доступными для растений, в пахотном слое почвы относительно контрольного варианта происходило только при внесении калийных удобрений как в чистом виде, так и в смеси с суперфосфатом и азотными удобрениями — содержание увеличилось в 1.8–2.8 раза, запасы от 28 (контроль) до 52–80 кг/га (табл. 3). Внесение азотных удобрений совместно с калийными повышало подвижность калия. Количество легкообменной формы в пахотном слое почвы в варианте НК было достоверно выше, чем при одностороннем внесении калия хлористого или РК. Увеличение содержания легкообменных форм калия при внесении азотно-калийных удобрений также наблюдали в подпахотном слое почвы. Длительное внесение азотных и фосфорных удобрений (N₉₀, P₉₀, (NP)₉₀) не оказало существенного влияния на изменение количества легкообменных форм в пахотном слое почвы относительно контрольного варианта.

Содержание обменной (подвижной) формы калия в почве на сегодняшний день является основным диагностическим показателем уровня

калийного питания растений. Длительный дефицитный баланс калия привел к существенному снижению содержания в почве обменной формы этого элемента. Уровень обменного калия 108–112 мг/кг, установившийся в длительном опыте за пять ротаций севооборота на вариантах N₉₀, P₉₀ и (NP)₉₀, следует считать показателем нижнего агрономического предела обеспеченности дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почвы Предуралья калием. На этих вариантах в почву не только не вносили калийные удобрения, но и внесение только азотных или фосфорных удобрений и сочетание азотных удобрений с фосфорными увеличивало потребление калия растениями, что привело к снижению количества обменных форм калия в пахотном слое почвы относительно исходного уровня на 29–36% (табл. 4). Степень обеспеченности почвы обменными формами калия изменилась с высокой и повышенной до средней. В результате запасы обменных форм калия в слое 0–40 см уменьшились с 1.0 т/га в контрольном варианте до 0.8 т/га (на 20%).

Длительное применение калийных удобрений в чистом виде и сочетании с азотными и фосфорными (K₉₀, (PK)₉₀, (NK)₉₀ и (NPK)₉₀) обеспечило повышение количества обменного калия в пахотном слое почвы относительно исходного уровня на 20–40%. Применение калия хлористого в чистом виде увеличило содержание обменной формы калия в пахотном и подпахотном слоях почвы,

Таблица 4. Изменение содержания обменного калия (по Кирсанову) по профилю почвы при длительном применении минеральных удобрений, над чертой – содержание, под чертой – % от валового содержания калия

Вариант	Содержание, мг/кг						Запасы, т/га			
	перед закладкой, 0–20	VI ротация					перед закладкой, 0–20	VI ротация		
		0–20	20–40	40–60	60–80	80–100		0–20	0–40	0–100
Без удобрений	190	<u>129</u> 0.8	<u>116</u> 0.7	<u>98</u> 0.5	<u>91</u> 0.4	<u>82</u> 0.4	0.49	0.34	1.0	2.6
N ₉₀	157	<u>112</u> 0.7	<u>101</u> 0.5	<u>100</u> 0.5	<u>90</u> 0.4	<u>79</u> 0.4	0.41	0.29	0.8	2.5
P ₉₀	159	<u>108</u> 0.7	<u>95</u> 0.5	<u>102</u> 0.5	<u>103</u> 0.5	<u>82</u> 0.4	0.41	0.28	0.8	2.5
K ₉₀	156	<u>217</u> 1.1	<u>129</u> 0.6	<u>107</u> 0.5	<u>94</u> 0.4	<u>85</u> 0.4	0.41	0.56	1.3	3.0
(NP) ₉₀	169	<u>109</u> 0.7	<u>100</u> 0.5	<u>112</u> 0.5	<u>104</u> 0.5	<u>85</u> 0.4	0.44	0.28	0.8	2.5
(NK) ₉₀	158	<u>218</u> 1.2	<u>135</u> 0.7	<u>124</u> 0.5	<u>108</u> 0.4	<u>91</u> 0.4	0.41	0.57	1.3	3.3
(PK) ₉₀	162	<u>195</u> 1.0	<u>110</u> 0.5	<u>107</u> 0.4	<u>88</u> 0.4	<u>72</u> 0.3	0.42	0.51	1.1	2.7
(NPK) ₉₀	185	<u>230</u> 1.3	<u>140</u> 0.7	<u>122</u> 0.6	<u>102</u> 0.5	<u>98</u> 0.5	0.48	0.60	1.4	3.3
HCP ₀₅	—	17	13	18	$F_{\phi} < F_T$	$F_{\phi} < F_T$	—	0.05	0.1	0.2

внесение (NK)₉₀ и (NPK)₉₀ – до глубины 60 см, прежде всего, за счет способности элемента к миграции. В результате запасы обменных форм калия в метровом слое почвы увеличились в 1.2–1.3 раза. Внесение фосфорно-калийных удобрений оказало влияние только на пахотный слой почвы. По данным [14], даже при длительном ежегодном применении калийных удобрений в дозе 60–90 кг/га на дерново-подзолистых почвах разного гранулометрического состава заметная миграция калия удобрений в супесчаных почвах наблюдалась только до глубины 100 см, а в суглинистых почвах – до глубины 40–60 см. Дерновый процесс почвообразования способствует увеличению содержания подвижных форм калия в верхнем горизонте почвы. Этот процесс усиливается при внесении азотных и фосфорных удобрений, при создании условий для глубокого проникновения корневых систем выращиваемых культур. В питании растений калием участвует в основном слой почвы 0–40 см. Однако при длительном экстенсивном использовании пашни растения могут использовать калий из более глубоких горизонтов [15].

По данным исследований, миграция обменного калия в дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве ниже 40 см отмечена на вариантах (NK)₉₀ и (NPK)₉₀, где статистически доказано увеличение содержания обменной формы калия в слое 40–60 см относительно контрольного вари-

анта. Миграция калия удобрений в глубину по профилю ниже 60 см статистически не доказана. Непроизводительные потери калия удобрений за счет миграции составляют 24–26 мг/кг почвы или 15–16 кг/га в год. Данное количество обменной формы калия мигрирует за пределы корнеобитаемого слоя ниже 40 см в связи с промывным водным режимом исследуемой почвы и не участвует в питании растений.

Изучение динамики содержания обменных форм калия в пахотном слое почвы по ротациям показало, что максимальное уменьшение содержания данных соединений в вариантах без применения калийных удобрений происходило к концу первой ротации (рис. 1).

При внесении азотных и азотно-фосфорных удобрений отмечено минимальное количество обменных форм калия в пахотном слое почвы. Стабильно низкий уровень 80–110 мг/кг обменной формы элемента сохраняется по настоящее время. Полученные результаты соответствуют представленному в работе [10] минимальному уровню количества обменных форм калия в дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве.

Применение калия хлористого в чистом виде привело к повышению содержания обменных форм калия в почве к концу первой ротации севооборота (на 35%). Достоверное увеличение содержания обменного калия на 25–40% в пахотном слое

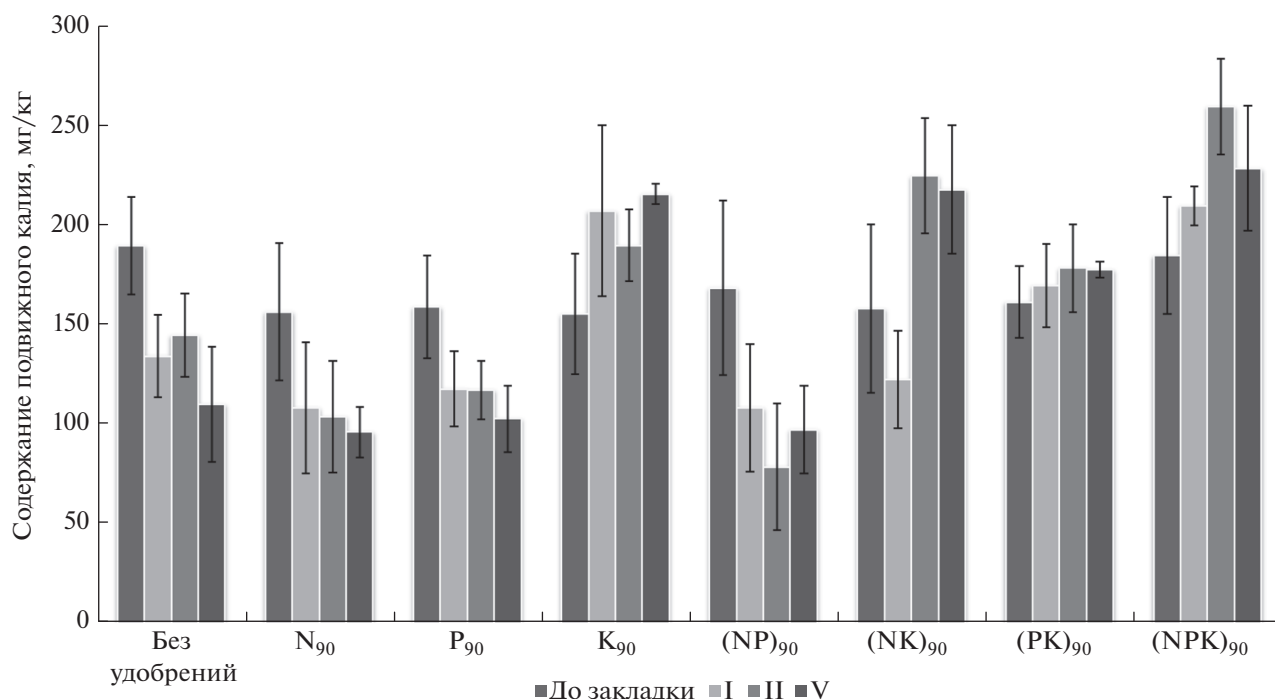


Рис. 1. Изменение содержания обменного (подвижного) калия (по Кирсанову) в пахотном слое почвы по ротациям севооборота.

почвы наблюдали с конца второй ротации севооборота в вариантах, где изучали сочетание калия хлористого с азотными удобрениями ((NK)₉₀, (NPK)₉₀). Фосфорные удобрения, по-видимому, способствовали закреплению калия в почве в не-обменной форме, поэтому в течение пяти ротаций увеличение обменной формы калия в пахотном слое относительно исходного уровня при внесении (PK)₉₀ составляло всего 5–10% и только на начало шестой ротации было зафиксировано увеличение на 25%.

Оценить ближайшие ресурсы восполнения содержания обменного калия можно по содержанию в почве его необменной формы. Содержание необменного калия в почве было больше контрольного варианта в 1.1–1.3 раза в пахотном и подпахотном слоях при длительном внесении калия хлористого и его сочетании с суперфосфатом (K₉₀, (PK)₉₀) (табл. 5). Отмечена тенденция к уменьшению содержания необменного калия в более глубоких слоях почвы. Содержание необменного калия в метровом слое сохранилось на уровне контрольного варианта или было чуть выше в варианте (NK)₉₀, что свидетельствует о миграции легкообменной и обменной форм калия по профилю почвы при промывном водном режиме и под воздействием азотных удобрений, их поглощением глинистыми минералами и трансформацией в необменную форму.

Содержание необменно фиксированного калия по Гедройцу достоверно больше контрольно-

го варианта отмечено в пахотном слое (в 1.1 раза) при внесении фосфорных удобрений (P₉₀) и в подпахотном слое (в 1.2 раза) – при внесении азотных удобрений (N₉₀). По-видимому, в данных вариантах наблюдается переход калия из силикатной труднодоступной формы в необменную.

По расчетным данным калий удобрений, не использованный растениями, распределяется в почве следующим образом между обменной и не-обменной формами этого элемента: в варианте K₉₀ на 25% закрепился в виде обменной формы и 75% – в виде необменной; (PK)₉₀ – 45% закрепилось в виде обменной формы и 55% – в виде необменной; (NK)₉₀ – 70% закрепилось в виде обменной формы и 30% – в виде необменной; (NPK)₉₀ – почти 100% закрепилось в виде обменной формы. Таким образом, азотные удобрения способствовали увеличению подвижности калия.

Степень истощения почвы по обменному калию, специфику трансформации форм калия в почве под действием антропогенных факторов отражает соотношение содержания необменного калия к подвижному (обменному). Лучшей обеспеченностью доступным для растений обменным калием характеризуются варианты с внесением калийных удобрений в чистом виде и в сочетании с азотными и фосфорными, где соотношение $K_{необ} : K_{обм}$ в слое 0–20 см составляет 4.7–5.8. Данное соотношение в вариантах N₉₀, P₉₀ и (NP)₉₀ расширилось по сравнению с

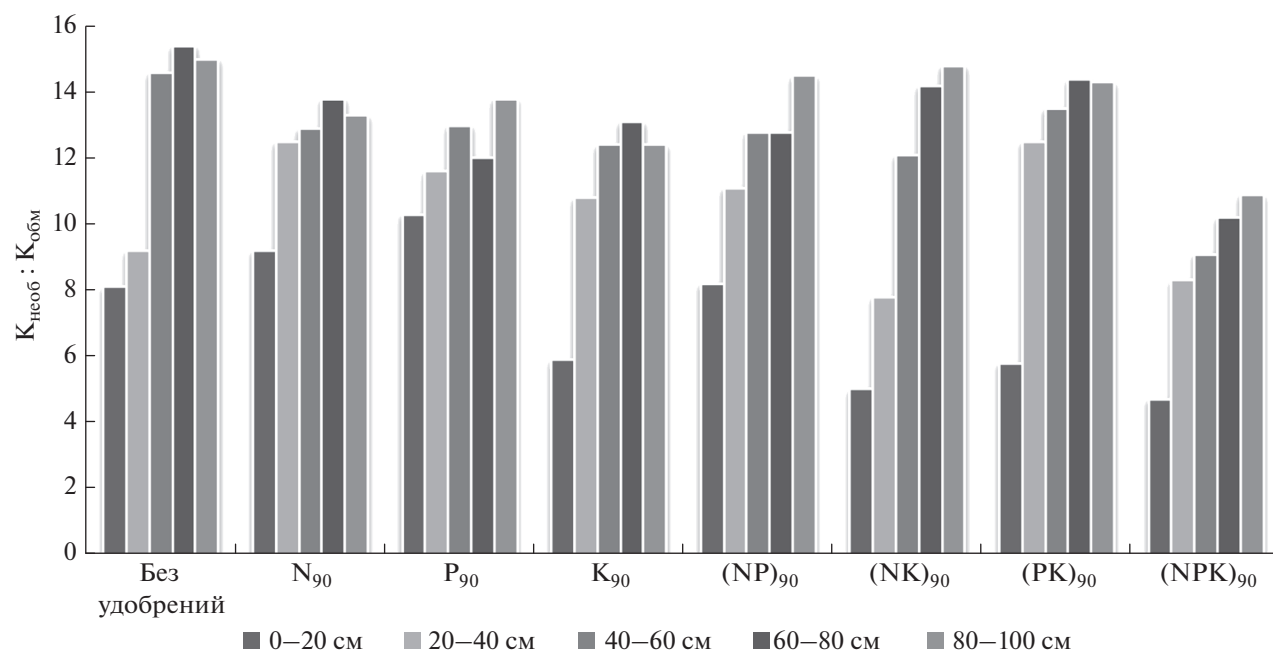


Рис. 2. Отношение необменного и обменного калия по вариантам опыта.

контрольным вариантом в слое 0–20 см до 8.2–10.3 (рис. 2). С глубиной соотношение $K_{\text{необ}} : K_{\text{обм}}$ расширяется независимо от вариантов опыта.

Длительное применение $(\text{NPK})_{90}$ способствовало накоплению большего содержания обмен-

ного калия в почве и привело к сужению соотношения необменного калия к обменному до 4.7–10.9 (в зависимости от почвенного слоя). Этот экспериментальный факт свидетельствует о перегруппировке форм калия, переходе части необ-

Таблица 5. Изменение содержания необменного калия (по Гедройцу) по профилю почвы при длительном применении минеральных удобрений, над чертой – содержание, под чертой – % от валового содержания калия

Вариант	Содержание, мг/кг					Запасы, т/га		
	0–20	20–40	40–60	60–80	80–100	0–20	0–40	0–100
Без удобрений	<u>1040</u> 6.5	<u>1065</u> 6.0	<u>1435</u> 6.6	<u>1400</u> 6.6	<u>1230</u> 5.8	2.7	5.6	18.0
N_{90}	<u>1030</u> 6.1	<u>1260</u> 5.7	<u>1295</u> 5.9	<u>1245</u> 5.5	<u>1050</u> 4.8	2.7	6.1	17.1
P_{90}	<u>1115</u> 6.7	<u>1100</u> 6.3	<u>1330</u> 6.2	<u>1240</u> 6.0	<u>1130</u> 5.7	2.9	5.9	17.2
K_{90}	<u>1285</u> 6.8	<u>1395</u> 6.6	<u>1335</u> 6.2	<u>1235</u> 5.9	<u>1050</u> 5.2	3.3	7.1	18.2
$(\text{NP})_{90}$	<u>890</u> 5.7	<u>1110</u> 5.8	<u>1430</u> 6.4	<u>1335</u> 5.9	<u>1230</u> 5.9	2.3	5.3	17.5
$(\text{NK})_{90}$	<u>1080</u> 5.9	<u>1055</u> 5.4	<u>1505</u> 6.2	<u>1535</u> 6.4	<u>1345</u> 6.2	2.8	5.7	19.1
$(\text{PK})_{90}$	<u>1125</u> 5.9	<u>1380</u> 6.1	<u>1440</u> 6.1	<u>1270</u> 5.7	<u>1030</u> 4.6	2.9	6.7	18.1
$(\text{NPK})_{90}$	<u>1070</u> 6.0	<u>1155</u> 6.1	<u>1115</u> 5.2	<u>1040</u> 5.0	<u>1065</u> 5.0	2.8	5.9	15.8
HCP_{05}	70	125	200	235	135	0.2	0.4	1.6

Таблица 6. Влияние длительного применения минеральных удобрений на продуктивность полевого восьмипольного севооборота (среднее по 2 закладкам, 1978–2019 гг.), ц к.ед./год

Вариант	Ротация					Среднее за 5 ротаций	Прибавка
	I	II	III	IV	V		
Без удобрений	28.9	29.8	25.7	30.7	28.6	28.7	—
N ₉₀	37.0	38.7	29.4	33.8	32.2	34.2	5.5
P ₉₀	31.6	32.9	25.5	30.0	30.0	30.0	1.2
K ₉₀	33.3	31.7	27.6	29.3	30.7	30.5	1.8
(NP) ₉₀	37.4	33.1	29.0	33.0	31.8	32.9	4.1
(NK) ₉₀	36.4	36.1	29.8	34.8	32.1	33.9	5.1
(PK) ₉₀	36.8	33.5	27.3	31.1	32.2	32.2	3.4
(NPK) ₉₀	37.6	37.5	30.6	34.5	35.8	35.2	6.5
HCP ₀₅	—	—	—	—	—	—	1.9

менного калия в обменный, и миграции ионов калия по профилю почвы под воздействием удобрений, особенно азотных.

Внесение азотных удобрений (N), сочетание NP, NK, PK и NPK обеспечило достоверное увеличение продуктивности севооборота в среднем за пять ротаций на 12–25% (табл. 6). Применение суперфосфата и калия хлористого в чистом виде не оказало заметного влияния на продуктивность севооборота, отмечено увеличение на 5–6%, в пределах случайной ошибки опыта. Достоверные корреляционные зависимости между продуктивностью сельскохозяйственных культур и содержанием в почве различных форм калия не установлены.

Прямые высокие корреляционные зависимости наблюдали между содержанием по профилю почвы обменного, легкообменного калия и $C_{орг}$ ($r = 0.8–0.9$), обратные средние и высокие ($r = -0.6–0.8$) — с суммой обменных оснований, степенью насыщенности почвы основаниями, содержанием обменного кальция и магния. Данные результаты связаны с существующей конкуренцией между ионами калия и ионами кальция, магния.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ содержания различных форм калия в дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве показал, что сумма обменного и необменного калия, которая вносит свой вклад в калийное питание растений, составляет малую долю от общего его содержания в почве — от 6.5 до 8.1%. Основу калийного фонда почвы составляет калий почвенного скелета, который входит в состав трудно-растворимых почвенных минералов, таких как полевые шпаты, слюды и др.

После пяти ротаций севооборота в длительном стационарном опыте получен отрицательный баланс по калию на всех изучаемых вариантах полевого стационарного опыта. Интенсивность баланса на вариантах с применением калийных удобрений по 90 кг д.в. составила 64–77%.

Распределение по почвенному профилю валового калия достаточно равномерное, однако при длительном внесении минеральных удобрений прослеживается тенденция к увеличению его содержания и запасов с глубиной исследуемого слоя почвы. Запасы валового калия в метровом слое почвы увеличились в вариантах (NK)₉₀, (PK)₉₀ на 10–12% относительно контроля.

Минимальное количество обменного калия в пахотном слое почвы (0–20 см) отмечено при внесении азотных, фосфорных и азотно-фосфорных удобрений — 108–112 мг/кг. Это значение практически не меняется в течение пяти ротаций восьмипольного севооборота и соответствует минимальному уровню содержания обменного калия в дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве. Миграция калия в дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве ниже 40 см отмечена в вариантах (NK)₉₀ и (NPK)₉₀. В этих вариантах статистически доказано увеличение содержания обменного калия в слое 40–60 см относительно контроля.

Содержание необменного калия в пахотном и подпахотном слоях больше контрольного варианта в 1.1–1.3 раза отмечено при длительном внесении калия хлористого и его сочетании с суперфосфатом (K₉₀, (PK)₉₀). Содержание необменного калия в метровом слое сохранилось на уровне контрольного варианта или было немного больше в варианте (NK)₉₀. Этот факт свидетельствует о миграции ионов калия по профилю почвы под воздействием азотных удобрений, их поглоще-

нии глинистыми минералами и трансформации в необменную форму.

Вынос обменного калия культурами севооборота нивелировался его резервами из необменной формы, которая в свою очередь поддерживалась на определенном уровне за счет калия, наиболее прочно удерживаемого почвенными минералами и не извлекаемого экстрагентами, использованными в настоящей работе.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Беляев Г.Н.* Калийные удобрения из калийных солей Верхнекамского месторождения и их эффективность. Пермь: Перм. кн. изд-во, 2005. 304 с.
2. *Воробьев В.А.* Агроэкологические аспекты природно-антропогенной трансформации калийного состояния дерново-подзолистых почв Северо-Запада России. Дис. ... докт. с.-х. наук. Брянск, 2016. 272 с.
3. *Завьялова Н.Е., Васбиева М.Т., Шишков Д.Г., Иванова О.В.* Калийное состояние дерново-подзолистой почвы в различных фитоценозах Предуралья // *Плодородие*. 2022. № 4. С. 59–63.
4. *Кайгородов А.Т., Пискунова Н.И.* Современное состояние почвенного плодородия пахотных земель Пермского края // *Достижения науки и техники АПК*. 2017. Т. 31. № 4. С. 22–26.
5. *Карпунин М.Ю., Байкин Ю.Л., Батыршина Э.Р.* Анализ современного состояния агроландшафтов и пути повышения их секвестрационного потенциала при сельскохозяйственном использовании на среднем Урале // *Вестник Курганской ГСХА*. 2021. № 4. С. 3–8.
6. *Кудяров В.Н.* Баланс азота, фосфора и калия в земледелии России // *Агрохимия*. 2018. № 10. С. 3–11.
7. *Лукин С.М.* Калийное состояние дерново-подзолистой супесчаной почвы и баланс калия при длительном применении удобрений // *Агрохимия*. 2012. № 12. С. 3–14.
8. *Меркушева М.Г., Убугунов Л.Л., Болонева Л.Н., Лаврентьева И.Н.* Содержание, запасы, формы калия в каштановых почвах Забайкалья в зависимости от орошения и возрастающих доз калийных удобрений (на фоне NPS) под картофель // *Агрохимия*. 2020. № 3. С. 3–10.
9. *Минеев В.Г., Гомогова Н.Ф., Морачевская Е.В.* Изменение свойств и калийного состояния дерново-подзолистой среднесуглинистой почвы при 40-летнем применении агрохимических средств // *Агрохимия*. 2013. № 10. С. 3–12.
10. *Никитина Л.В., Володарская И.В.* Влияние органического вещества на содержание форм калия в суглинистых дерново-подзолистых почвах // *Проблемы агрохимии и экологии*. 2009. № 1. С. 13–17.
11. *Никитина Л.В.* Исследование калийного режима разных типов почв в длительных опытах ГЕОСЕТИ // *Агрохимия*. 2018. № 1. С. 39–51.
12. *Никитина Л.В.* Обменный калий и его подвижность в дерново-подзолистых почвах разного гранулометрического состава // *Плодородие*. 2014. С. 18–21.
13. Пат. Республики Беларусь № 17070. Способ определения валовых форм азота, фосфора и калия из одной навески пробы почвы. 2013 г.
14. *Прокошев В.В., Дерюгин И.П.* Калий и калийные удобрения. М.: Ледум, 2000. 185 с.
15. *Савич В.И., Платонов И.Г., Духанин Ю.А., Поветкина Н.Л., Сафонов А.Ф.* Комплексная оценка состояния калия в почвах // *Известия ТСХА*. 2006. № 3. С. 15–28.
16. *Сычев В.Г., Шевицова Л.К., Беличенко М.В.* Влияние длительного применения различных систем удобрения на органофильный состав основных зональных типов почв сообщение 1. Дерново-подзолистые почвы // *Плодородие*. 2019. № 2. С. 3–7.
17. *Сычев В.Г., Шафран С.А., Виноградова С.Б.* Плодородие почв России и пути его регулирования // *Агрохимия*. 2020. № 6. С. 3–13.
18. *Шановалова Н.Н., Чижикова Н.П., Годунова Е.И., Сторчак И.Г.* Минералогический состав тонкодисперсных фракций и резервы калия в черноземе при внесении минеральных удобрений // *Плодородие*. 2018. № 3. С. 25–31.
19. *Шафран С.А., Кирпичников Н.А.* Научные основы прогнозирования содержания подвижных форм фосфора и калия в почвах // *Агрохимия*. 2019. № 4. С. 3–10.
20. *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.
21. *Якименко В.Н.* Влияние длительного применения калийных удобрений на агрохимические свойства почвы // *Агрохимия*. 2012. № 12. С. 41–46.
22. *Якименко В.Н.* Изменение содержания калия и магния в профиле почвы длительного полевого опыта // *Агрохимия*. 2019. № 3. С. 19–29.
23. *Якименко В.Н.* Калий в агроценозах Западной Сибири. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2003. 226 с.
24. *Якименко В.Н.* Фиксация калия и аммония почвой агроценозов // *Агрохимия*. 2011. № 8. С. 3–7.
25. *Firmano R.F., Melo V., Montes C.R., de Oliveira A., de Castro C., Alleoni L.R.F.* Potassium reserves in the clay fraction of a tropical soil fertilized for three decades // *Clays Clay Minerals*. 2020. V. 68. P. 237–249. <https://doi.org/10.1007/s42860-020-00078-6>
26. *Li T., Wang H.Y., Chen X.Q., Zhou J.M.* Soil reserves of potassium: release and availability to *Lolium perenne* in relation to clay minerals in six cropland soils from eastern China // *Land Degradation Development*. 2017. V. 28. P. 1696–1703. <https://doi.org/10.1002/ldr.2701>

The Content of Various Forms of Potassium in the Soil Profile of the Sod-Podzolic Soil of the Pre-Urals

N. E. Zavyalova^{1, *}, M. T. Vasbieva¹, D. G. Shishkov¹, and O. V. Ivanova¹

¹Perm Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Lobanovo, 614532 Russia

*e-mail: nezavyalova@gmail.com

The effect of long-term use of nitrogen, phosphorus and potash fertilizers and their combinations (N, P, K, NP, NK, PK and NPK) on change in sod-podzolic heavy loamy soil (Albic Retisol (Abruptic, Aric Loamic)) was studied the content of gross potassium and its easily exchangeable, exchangeable and non-exchangeable compounds. The research was carried out in a meter layer of soil under the conditions of a long-term stationary experiment laid down in the Perm Region in 1978. In the experiment, ammonium nitrate or urea, double or simple superphosphate and potassium chloride were used. The dose of fertilizers was 90 kg/ha in the primary plant food. Long-term application of potassium chloride in pure form and in combination with superphosphate and nitrogen fertilizers (K_{90} , $(PK)_{90}$, $(NK)_{90}$, $(NPK)_{90}$) provided an increase in the gross content of potassium in the arable soil layer by 1.1–1.2 times and its various compounds by 1.1–2.8 times (relative to the control variant). A narrowing of the ratio of non-exchangeable forms of potassium to exchange forms is noted here. Changes in the meter layer of soil depended on the combination of fertilizers, the studied form of potassium compounds in the soil. The introduction of only nitrogen and phosphorus fertilizers (N_{90} , P_{90} , $(NP)_{90}$) without compensation for potassium removal during five rotations of the eight-field field crop rotation led to a decrease in the reserves of exchangeable and non-exchangeable potassium compounds in the 0–40 cm layer by 15–20%. The minimum level of potassium exchange compounds in sod-podzolic heavy loamy soil in a layer of 0–20 cm was 108–112 mg/kg.

Keywords: exchangeable and non-exchangeable potassium compounds, soil profile, long-term stationary experience, potassium balance, gross potassium content