

ИЗМЕНЕНИЕ КАЛИЙНОГО РЕЖИМА ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ТЯЖЕЛОСУГЛИНИСТОЙ ПОЧВЫ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ ЭКСТЕНСИВНОМ ВОЗДЕЛЫВАНИИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР И ПРИМЕНЕНИИ УДОБРЕНИЙ

© 2024 г. М. Т. Васбиева^{а,*} (<http://orcid.org/0000-0003-4048-6319>),
В. Р. Ямалдинова^а, Н. Е. Завьялова^а

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

*e-mail: vasbieva@mail.ru

Поступила в редакцию 30.03.2024 г.

После доработки 08.05.2024 г.

Принята к публикации 27.06.2024 г.

Изучено изменение валового содержания калия, его легкоподвижных форм (вытяжка 0.01 М CaCl_2), подвижных по Кирсанову и необменных по Гедройцу соединений в метровом слое дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почвы (Albic Retisol (Abruptic, Aric, Loamic)) при длительном экстенсивном возделывании сельскохозяйственных культур и применении удобрений. Исследования проведены в многолетнем стационарном опыте, заложенном в 1968 г. в Пермском крае. Изучали в опыте органическую, минеральную и органо-минеральную системы удобрений, выровненные по элементам питания: контроль – без удобрений, навоз 10 и 20 т/га в год, NPK эквивалентно 10 и 20 т навоза, навоз 5, 10 и 20 т/га + NPK эквивалентно навозу. Севооборот парозерннопропашной полевой восьмипольный. Оценку изменений калийного режима пахотной почвы проводили по сравнению с целинным аналогом – злаково-разнотравным лугом. Установлено, что длительное (почти 50 лет) возделывание сельскохозяйственных культур без применения удобрений привело к уменьшению валовых запасов калия на 13%, его подвижных соединений на 43% в слое 0–20 см, запасов легкоподвижных соединений на 40% в метровом слое. Насыщенность удобрениями пашни и вид системы удобрения влияли на направленность изменений в калийном режиме почвы. Максимум накопления легкоподвижных, подвижных и необменных соединений калия в результате длительного применения удобрений отмечен в слое 0–40 см. В более глубоких слоях прослеживали тенденцию уменьшения содержания данных форм калия относительно варианта без удобрений. Поддержание в почве валовых запасов калия в слое 0–20 см на уровне целинного аналога (46 т/га) отмечено при использовании органо-минеральной системы удобрения с насыщенностью навозом 10 т/га в год + NPK эквивалентно навозу, увеличение запасов до 49 т/га – при насыщенности навозом 20 т/га в год + NPK эквивалентно навозу.

Ключевые слова: длительный опыт, органические и минеральные удобрения, баланс калия, валовое содержание калия, необменные, подвижные и легкоподвижные соединения калия

DOI: 10.31857/S0032180X24120143, **EDN:** JCLDJK

ВВЕДЕНИЕ

Обеспеченность почвы элементами минерального питания – один из важнейших показателей получения стабильной урожайности выращиваемых сельскохозяйственных культур. Вынос калия с урожаем сельскохозяйственных культур больше, чем фосфора, а иногда и азота. Калий в растениях участвует во многих процессах превращения

энергии и биосинтеза, функционирования ферментативных систем и др. Достаточная обеспеченность растений калием способствует увеличению устойчивости растений к целому комплексу неблагоприятных внешних воздействий [3, 14]. Общие запасы калия в большинстве минеральных почв значительны и зависят от их минералогического и гранулометрического состава, а также типа почвообразования. Валовое содержание калия в почвах

земледельческой зоны умеренного пояса в среднем составляет 1.5–2.5% [26]. Большая часть калия в почве для растений находится в труднодоступной форме. Переход его в обменные и подвижные формы происходит под влиянием различных биологических и химических процессов [28, 32, 33]. Сельскохозяйственное использование земли оказывает влияние на изменение калийного фонда почвы, направленность обусловлена генетическими свойствами исследованных почв [3, 28, 30], системой обработки почвы [5, 8, 21], типом севооборота [2], видами, дозами и длительностью внесения органических и минеральных удобрений [9, 10, 16, 19, 31].

В работе [25] показано, что с 1991 по 2021 гг. (50-летний период) в 17 регионах Нечерноземной зоны, где преобладают дерново-подзолистые почвы, в результате сокращения применения калийсодержащих удобрений уменьшилось средневзвешенное содержание подвижного калия. Вследствие деградации почв по агрохимическим свойствам нормативная урожайность зерновых культур уменьшилась на 4.4–4.8 ц/га, или на 13–23% [25]. Применение удобрений необходимо для сохранения калийного фонда почвы. По данным [13] на дерново-подзолистых почвах разного гранулометрического состава положительный баланс по калию складывался только при систематическом внесении минеральных и органических удобрений со среднегодовыми дозами более K_{90} . При этом в почвах легкого гранулометрического состава наблюдали увеличение содержания подвижного калия. В почвах тяжелого гранулометрического состава накопление калия происходило в разных по доступности формах. При среднегодовых дозах менее K_{90} складывался дефицитный или уравновешенный баланс, достоверных изменений в калийном режиме почвы не отмечено. По данным [29] для поддержания исходного содержания в почве калия, с учетом выноса растениями, необходимо ежегодно вносить 130 кг/га действующего вещества калийных удобрений. Известно, что существенная роль в удержании калия в пахотном слое почвы принадлежит органическим удобрениям, а способность почвы фиксировать калий, в которую длительно вносили NPK, уменьшается [24].

Цель работы – оценка влияния на калийный режим дерново-подзолистой почвы экстенсивного возделывания сельскохозяйственных культур и применения удобрений на основе комплексных исследований в длительном опыте и сравнении с целинным аналогом.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Длительный полевой опыт был заложен в 1968 г. в Пермском НИИСХ (филиал ПФИЦ УрО РАН) на дерново-слабоподзолистой тяжелосуглинистой почве (Albic Retisol (Abruptic, Aric, Loamic)).

В опыте изучали органическую, минеральную и органо-минеральную системы удобрений. Схема исследований: 1) без удобрений (контроль), 2) навоз 10 т/га в год, 3) навоз 20 т/га в год, 4) NPK эквивалентно 10 т навоза, 5) NPK эквивалентно 20 т навоза, 6) навоз 5 т + NPK эквивалентно 5 т навоза, 7) навоз 10 т + NPK эквивалентно 10 т навоза, 8) навоз 20 т + NPK эквивалентно 20 т навоза. Повторность вариантов четырехкратная, размещение рандомизированное. Опыт заложен в двух последовательных во времени закладках (1977, 1978 гг.). Общая площадь делянки 115.5 м². Исследования проводили в полевом восьмипольном парозерно-пропашном севообороте с чередованием культур: пар чистый, озимая рожь, яровая пшеница с подсевом клевера, клевер 1 года пользования, клевер 2 года пользования, ячмень, картофель, овес. Изучаемая схема в опыте сложилась со второй ротации севооборота (1977–1978 гг.).

Навоз крупного рогатого скота вносили в севообороте в два приема: под рожь и картофель (разовые дозы составили 20, 40 и 80 т/га). Минеральные удобрения, рассчитанные по эквивалентному содержанию в навозе, распределяли под озимую рожь, пшеницу, ячмень, картофель и овес. Клевер не удобряли, учитывали последействие. За пять ротаций севооборота (II–VI ротации) с навозом при насыщенности пашни 10 т/га в год в почву поступило N – 1400, P – 950, K – 2070 кг/га ($N_{35}P_{25}K_{50}$ в год), при насыщенности 20 т/га – 2800, 1900 и 4140 кг/га ($N_{70}P_{50}K_{100}$ в год) соответственно. Солома в опыте после уборки до 2013 г. отчуждалась. Формы удобрений – аммонийная селитра или мочевина, двойной или простой суперфосфат, калий хлористый. Агротехника в опыте – общепринятая для Пермского края.

Агрохимическая характеристика почвы до закладки опыта: содержание $C_{опт}$ – 1.3%, pH_{sol} – 5.5, гидролитическая кислотность (Нг) – 3.1 смоль(экв)/кг, сумма обменных оснований (S) – 15.6 смоль(экв)/кг, подвижного фосфора и калия по Кирсанову – 162 и 173 мг/кг соответственно.

Почвенные образцы в опыте отбирали в конце шестой ротации севооборота (2016–2017 гг.) по слоям 0–20, 20–40, 40–60, 60–80 и 80–100 см. Отбор проводили буром в пяти точках на делянке, образцы смешивали. Содержание различных форм калия изучали с использованием следующих методов: легкоподвижной – в 0.01М $CaCl_2$ вытяжке, подвижной по Кирсанову, необменной по Гедройцу [1]. Валовое содержание калия определяли после мокрого озоления в смеси концентрированной серной кислоты и перекиси водорода [18]. Запасы калия в почве рассчитывали через плотность. Статистическую обработку результатов исследований проводили по Б.А. Доспехову с использованием Microsoft Excel.

Оценку характера изменений калийного режима пахотной почвы провели по сравнению с целинным аналогом (злаково-разнотравным лугом). Целинный участок расположен в непосредственной близости от опытного поля Пермского НИИСХ. Ботанический состав травостоя: 62.0 – злаковые, 13.5 – бобовые, 24.5% – разнотравье. Травостой не отчуждался. Основные агрохимические параметры почвы злаково-разнотравного луга приведены в работе [6]. Исследуемая целинная почва характеризовалась следующим морфологическим строением профиля:

A_1 , 0–22 см – перегнойный, гумусовый, сухой, рыхлый, светло-коричневый, мелкоореховатый, тяжелосуглинистый, имеются корни растений, органические остатки, ходы червей, переход в нижележащий горизонт постепенный, не ярко выражен.

A_2B , 22–28 см – чуть светлее верхнего горизонта, рыхлый, сухой, ореховатый, темно-коричневый, тяжелосуглинистый, имеются корни, переход постепенный с затеками.

B_1 , 28–76 см – переходный, светло-бурый, сухой, рыхлый, ореховатый или крупно-ореховатый, единичные корни, тяжелосуглинистый, переход слабо выраженный.

B_2 , 76–105 см – коричнево-бурый, крупноореховатый, корневые остатки, влажный, плотный, тяжелоглинистый, переход постепенный.

B_2C , 105–127 см – переходный к почвообразующей породе, влажный, светло-коричневый с бурым оттенком, бесструктурный, переход в нижележащий горизонт постепенный, плотный, тяжелосуглинистый.

C , >127 см – влажный, светло-бурый, бесструктурный, плотный, глинистый, с соляной кислотой не вскипает.

Пахотная почва по своему морфологическому описанию была схожа с почвой злаково-разнотравного луга:

$A_{\text{пах}}$, 0–22 см – пахотный, светло-серый с буроватым оттенком, тяжелосуглинистый, пылевато-мелкокомковатый, уплотнен, сильно пронизан корнями, в нижней части неперепревшие органические остатки, переход в нижележащий горизонт ясный,

A_2B , 22–30 см, B_1 30–68 см, B_2 68–102 см, B_2C 102–135 см, C >135 см. Разрез был заложен на защитной полосе рядом с длительным опытом. Содержание физической глины в слое почвы 0–20 см под лугом составило 42.2%, в опыте – 41.8–44.2%.

Почвообразующая порода изучаемых почв желто-бурая некарбонатная покровная глина. Характерной особенностью почвы, сформированной на богатых в минералогическом отношении пермских глинах, является высокое содержание обменных форм кальция и магния, которое увеличивается с

глубиной, как и сумма поглощенных оснований. Исследования проводили в IV агроклиматическом районе Пермского края. Климат умеренно-континентальный с холодной, продолжительной, снежной зимой и теплым коротким летом. Сумма средних суточных температур $>10^{\circ}\text{C}$ составляет 1700–1900°C. Длительность периода активной вегетации с температурой $>10^{\circ}\text{C}$ в среднем 115 сут, с температурой $>15^{\circ}\text{C}$ – 60 сут. Район относится к зоне достаточного увлажнения: гидротермический коэффициент 1.4, осадков за год выпадает 470–500 мм, испаряемость с поверхности почвы составляет около 340 мм.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Исследования показали, что валовое содержание калия в целинной дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве под злаково-разнотравным лугом в верхнем слое (0–20 см) составило около 2% или 19.8 г/кг (табл. 1). Небольшое уменьшение его количества наблюдали в слое 20–40. Это связано с тем, что при отборе проб по слоям сюда вошел горизонт A_2B (22–28 см) – здесь отмечено наименьшее содержание валового калия по сравнению с другими генетическими горизонтами. Далее с глубиной количество $K_{\text{вал}}$ в почве злаково-разнотравного луга возрастало и в слое 40–100 см составило 21.5–21.8 г/кг. В составе калийного фонда верхнего слоя почвы (0–20 см) под злаково-разнотравным лугом легкоподвижные формы составили 0.1% от валового содержания калия, подвижные – 1.5%, необменные – 4.2%. Остальные 94.2% составил калий почвенного скелета. Считается, что такой калий прочно связан с минеральной частью почвы и не принимает активного участия в питании растений [9, 28]. Количество необменных, подвижных и легкоподвижных соединений калия в более глубоких слоях целинной почвы относительно верхнего слоя было меньше в 1.1–1.5 раза.

Валовое содержание калия в пахотной почве длительного опыта в слое 0–20 см варьировало от 17.0 до 19.4 г/кг (табл. 2). В варианте без удобрений его количество в слое 0–20 см было на 13% меньше, чем в почве злаково-разнотравного луга. Запасы в слое 0–20 см уменьшились от 46 (луг) до 43 т/га. В другом длительном опыте Пермского НИИСХ наблюдали уменьшение запасов $K_{\text{вал}}$ в слое почвы 0–20 см при экстенсивном возделывании (без удобрений) сельскохозяйственных культур до 41 т/га [7].

Наибольшее содержание $K_{\text{вал}}$ в длительном опыте в пахотном слое почвы (0–20 см) отмечено в варианте с максимальной насыщенностью пашни удобрениями навоз 20 т/га в год + NPK эквивалентно навозу и соответственно с максимально высокой интенсивностью баланса изучаемого элемента (210%) (табл. 3). Количество $K_{\text{вал}}$ только в данном варианте было достоверно выше контроля

Таблица 1. Валовое содержание калия, его легкоподвижные, подвижные и необменные соединения в почве злаково-разнотравного луга

Слой почвы, см	Валовое содержание калия ($K_{вал}$) г/кг	Необменные соединения калия ($K_{необ}$) мг/кг	Подвижные соединения калия ($K_{подв}$) мг/кг	Легкоподвижные соединения калия ($K_{л/подв}$) мг/кг	Отношение содержания $K_{необ}/K_{подв}$
0–20	19.8±0.7	<u>830±76</u> 4.2*	<u>289±45</u> 1.5	<u>24.1±4.0</u> 0.12	2.9
20–40	18.6±0.4	<u>690±23</u> 3.7	<u>210±15</u> 1.0	<u>15.5±0.9</u> 0.08	3.3
40–60	21.5±0.9	<u>630±51</u> 2.9	<u>191±21</u> 0.9	<u>11.9±1.4</u> 0.06	3.3
60–80	21.8±0.8	<u>715±38</u> 3.3	<u>189±15</u> 0.9	<u>11.9±1.2</u> 0.05	3.8
80–100	21.6±0.8	<u>630±41</u> 2.9	<u>186±22</u> 0.9	<u>12.6±0.6</u> 0.06	3.4
Запасы					
		т/га		кг/га	—
0–20	46	1.9	0.7	55	—
0–40	88	3.5	1.1	90	—
0–100	245	8.3	2.5	180	—

* Под чертой – % от валового.

Таблица 2. Изменение валового содержания калия по профилю почвы при длительном применении удобрений (VI ротация, 2016–2017 гг.)

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	17.3	19.1	19.4	20.8	21.7	43	94	284
Навоз 10 т/га	17.0	20.4	20.5	21.0	19.9	43	98	287
Навоз 20 т/га	17.5	21.1	21.3	21.1	21.1	44	100	295
NPK экв. 10 т навоза	17.6	20.6	21.0	21.1	19.7	44	99	289
NPK экв. 20 т навоза	17.0	21.7	21.3	21.1	20.2	43	102	293
Навоз 5 т+NPK экв.	17.4	20.3	20.8	20.1	20.4	44	99	287
Навоз 10 т + NPK экв.	18.5	19.6	20.8	19.7	19.4	46	99	282
Навоз 20 т + NPK экв.	19.4	19.2	19.2	20.5	19.9	49	101	284
HCP ₀₅	1.6	$F_{\phi} < F_t$	$F_{\phi} < F_t$	$F_{\phi} < F_t$	$F_{\phi} < F_t$	4	$F_{\phi} < F_t$	$F_{\phi} < F_t$

в 1.1 раза. Положительный баланс по калию также получен в вариантах – навоз 20 т/га, NPK экв. 20 т навоза, навоз 10 т/га в год + NPK экв. навозу (+12–17 кг/га в год). При этом в пахотном слое почвы содержание $K_{вал}$ находилось на уровне контрольного варианта или отмечены лишь тенденции к его

увеличению. Возможно, на изменение данного показателя, оказывала влияние механическая обработка почвы (вспашка, культивация, боронование).

Внесение навоза 20 т/га в год + NPK эквивалентно навозу обеспечило поддержание содержания $K_{вал}$ в верхнем слое почвы (0–20 см) на уровне

Таблица 3. Баланс калия в полевом восьмипольном севообороте, кг/га (среднее по двум закладкам, 1977–2017 гг.)

Вариант	Поступление калия* в сумме за 5 ротаций, кг/га	Хозяйственный вынос калия в сумме за 5 ротаций, кг/га	Баланс +/–, кг/га		Интенсивность баланса, %
			всего	в среднем в год	
	кг/га				
Без удобрений	130	2659	–2529	–63	5
Навоз 10 т/га	2199	3298	–1099	–27	67
Навоз 20 т/га	4268	3574	694	17	119
NPK экв. 10 т навоза	2202	3584	–1382	–35	61
NPK экв. 20 т навоза	4226	3729	496	12	113
Навоз 5 т + NPK экв.	2288	3638	–1350	–34	63
Навоз 10 т + NPK экв.	4407	3913	494	12	113
Навоз 20 т + NPK экв.	8549	4064	4485	112	210

* С удобрениями и семенами.

целинного аналога. Валовые запасы калия в данном варианте увеличились до 49 т/га. Запасы $K_{\text{вал}}$ сохранились на уровне целинного аналога при применении навоза 10 т/га в год + NPK эквивалентно навозу.

При экстенсивном возделывании культур в почве отмечены тенденции уменьшения содержания $K_{\text{л/подв}}$ и $K_{\text{подв}}$ в метровом слое – в 1.6–2.3 и 1.1–2.0 раза соответственно (табл. 4, 5). Запасы $K_{\text{л/подв}}$ уменьшились в метровом слое с 180 (луг) до 114 кг/га. Основные потери запасов $K_{\text{подв}}$ пришлись на слой 0–20 см – от 0.7 до 0.4 т/га. Экстенсивное возделывание сельскохозяйственных культур привело к уменьшению в почве доли подвижных и легкоподвижных соединений калия. Полученные результаты в первую очередь связаны с выносом изучаемого элемента растениями. За время проведения опыта в варианте без удобрений культурами севооборота было вынесено около трех тонн калия. В почве при экстенсивном возделывании сельскохозяйственных культур отмечены тенденции к увеличению содержания необменной формы калия относительно целинного аналога в 1.1–1.3 раза с глубины 20–40 см (табл. 6), что может происходить в результате разрушения калийных соединений минерального скелета почвы. Полученные данные по изменению количества различных форм калия в почве также могут быть связаны с миграцией соединений калия за пределы метрового слоя, переходом одной формы калия в другую, нельзя исключать генетическую неоднородность.

Похожие результаты по уменьшению подвижной (обменной) формы калия в результате длительного экстенсивного использования пашни отмечены в других работах: на черноземе до глубины 100 см [15], дерново-подзолистых песчаных

и супесчаных почвах [3] до глубины 100 см, се-рой лесной среднесуглинистой почве до глубины 0–60 см, дерново-подзолистой тяжелосуглинистой 0–40 см [27].

Соотношение необменной формы к подвижной в верхнем слое почвы 0–20 см при возделывании культур без применения удобрений расширилось от 2.9 (луг) до 4.8 (табл. 7). Увеличение соотношения наблюдали в метровом слое. Чем больше данная величина, тем сильнее почва истощена в отношении подвижных (доступных для растений) соединений калия [28].

Применение всех систем удобрения привело к увеличению в пахотном слое почвы (0–20 см) содержания легкоподвижных и подвижных соединений калия, их содержание в зависимости от варианта возросло относительно контрольного варианта в 1.4–3.2 раза. Количество $K_{\text{л/подв}}$ и $K_{\text{подв}}$ в почве возрастало при складывающемся положительном хозяйственном балансе не всегда пропорционально его интенсивности. Прямо пропорциональное увеличение доступных форм калия при повышении насыщенности пашни удобрениями наблюдали при минеральной и органо-минеральной системе. Накопление $K_{\text{л/подв}}$ и $K_{\text{подв}}$ в почве при использовании органической системы удобрений в вариантах навоз 10 т/га и навоз 20 т/га было примерно одинаковым, возможно калий закреплялся в виде других форм.

Достоверное увеличение количества $K_{\text{подв}}$ в почве в слое 0–20 см наблюдали только спустя две ротации с момента наложения данной схемы удобрений (рис. 1). Их содержание в IV–VI ротациях стабилизировалось примерно на уровне 210–260 мг/кг (исходный уровень 173 мг/кг) – в вариантах навоз

Таблица 4. Изменение содержания легкоподвижных соединений калия по профилю почвы при длительном применении различных систем удобрения (VI ротация, 2016–2017 гг.)

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>14.7*</u> 0.09	<u>8.5</u> 0.04	<u>7.6</u> 0.04	<u>5.6</u> 0.03	<u>5.5</u> 0.03	37	59	114
Навоз 10 т/га	<u>20.0</u> 0.12	<u>10.2</u> 0.05	<u>5.1</u> 0.02	<u>4.3</u> 0.02	<u>3.6</u> 0.02	50	77	115
Навоз 20 т/га	<u>21.7</u> 0.12	<u>9.2</u> 0.04	<u>6.7</u> 0.03	<u>4.5</u> 0.02	<u>3.6</u> 0.02	54	78	122
NPK экв. 10 т навоза	<u>22.4</u> 0.13	<u>12.6</u> 0.06	<u>8.3</u> 0.04	<u>4.1</u> 0.02	<u>2.8</u> 0.01	56	89	133
NPK экв. 20 т навоза	<u>30.5</u> 0.18	<u>13.7</u> 0.06	<u>5.9</u> 0.03	<u>4.4</u> 0.02	<u>3.1</u> 0.02	76	112	151
Навоз 5 т + NPK экв.	<u>22.9</u> 0.13	<u>10.2</u> 0.05	<u>5.9</u> 0.03	<u>4.4</u> 0.02	<u>3.6</u> 0.02	57	84	125
Навоз 10 т + NPK экв.	<u>25.9</u> 0.14	<u>15.3</u> 0.08	<u>7.4</u> 0.04	<u>4.3</u> 0.02	<u>3.6</u> 0.02	65	105	149
Навоз 20 т + NPK экв.	<u>45.9</u> 0.24	<u>20.5</u> 0.11	<u>8.9</u> 0.05	<u>6.3</u> 0.03	<u>4.6</u> 0.02	115	168	226
HCP ₀₅	4.1	3.4	1.5	$F_{\Phi} < F_t$	1.2	11	46	47

* Над чертой – содержание, под чертой – доля от валового содержания калия, %.

Таблица 5. Изменение содержания подвижных соединений калия по профилю почвы при длительном применении различных систем удобрения (VI ротация, 2016–2017 гг.)

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>142*</u> 0.8	<u>191</u> 0.9	<u>192</u> 0.9	<u>162</u> 0.8	<u>163</u> 0.8	0.4	0.9	2.5
Навоз 10 т/га	<u>212</u> 1.2	<u>190</u> 0.9	<u>150</u> 0.7	<u>150</u> 0.7	<u>128</u> 0.6	0.6	1.1	2.4
Навоз 20 т/га	<u>228</u> 1.3	<u>189</u> 0.9	<u>164</u> 0.8	<u>148</u> 0.7	<u>139</u> 0.7	0.6	1.1	2.5
NPK экв. 10 т навоза	<u>225</u> 1.3	<u>201</u> 1.0	<u>173</u> 0.8	<u>144</u> 0.7	<u>131</u> 0.7	0.6	1.1	2.5
NPK экв. 20 т навоза	<u>320</u> 1.9	<u>214</u> 1.0	<u>157</u> 0.7	<u>144</u> 0.7	<u>130</u> 0.6	0.8	1.4	2.7
Навоз 5 т + NPK экв.	<u>233</u> 1.3	<u>177</u> 0.9	<u>139</u> 0.7	<u>124</u> 0.6	<u>118</u> 0.6	0.6	1.1	2.2
Навоз 10 т + NPK экв.	<u>277</u> 1.5	<u>245</u> 1.3	<u>180</u> 0.9	<u>138</u> 0.7	<u>136</u> 0.7	0.7	1.4	2.8
Навоз 20 т + NPK экв.	<u>387</u> 2.0	<u>271</u> 1.4	<u>181</u> 0.9	<u>170</u> 0.8	<u>144</u> 0.7	1.0	1.7	3.2
HCP ₀₅	35	23	24	13	$F_{\Phi} < F_t$	0.1	0.4	0.3

* Над чертой – содержание, под чертой – доля от валового содержания калия, %.

Таблица 6. Изменение содержания необменных соединений калия по профилю почвы при длительном применении различных систем удобрения (VI ротация, 2016–2017 гг.)

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>775*</u> 4.5	735 3.5	<u>805</u> 3.8	<u>770</u> 3.6	<u>705</u> 3.3	2.0	4.0	11.0
Навоз 10 т/га	<u>815</u> 4.8	<u>770</u> 3.8	<u>645</u> 3.1	<u>635</u> 3.0	<u>560</u> 2.8	2.1	4.2	9.8
Навоз 20 т/га	<u>845</u> 4.8	<u>770</u> 3.7	<u>625</u> 2.9	<u>645</u> 3.1	<u>615</u> 2.9	2.2	4.3	10.1
NPK экв. 10 т навоза	<u>770</u> 4.4	<u>720</u> 3.5	<u>680</u> 3.2	<u>645</u> 3.1	<u>645</u> 3.3	2.0	3.9	10.0
NPK экв. 20 т навоза	<u>945</u> 5.6	755 3.5	<u>610</u> 2.9	<u>625</u> 3.0	<u>565</u> 2.8	2.5	4.5	10.0
Навоз 5 т + NPK экв.	<u>735</u> 4.2	<u>750</u> 3.7	<u>615</u> 3.0	<u>570</u> 2.8	<u>510</u> 2.5	1.9	3.9	9.1
Навоз 10 т + NPK экв.	<u>935</u> 5.1	<u>790</u> 4.0	<u>730</u> 3.5	<u>650</u> 3.3	<u>575</u> 3.0	2.4	4.6	10.5
Навоз 20 т + NPK экв.	<u>940</u> 4.8	<u>795</u> 4.2	<u>655</u> 3.4	<u>725</u> 3.5	<u>650</u> 3.3	2.4	4.6	10.8
HCP ₀₅	45	F _φ <F _τ	F _φ <F _τ	85	F _φ <F _τ	0.1	0.3	F _φ <F _τ

* Над чертой – содержание, под чертой – доля от валового содержания калия, %.

Таблица 7. Отношение содержания необменных соединений калия к содержанию подвижных соединений

Вариант	Глубина, см				
	0–20	20–40	40–60	60–80	80–100
Без удобрений	4.8	3.8	4.2	4.8	4.3
Навоз 10 т/га	2.9	4.1	4.3	4.2	4.4
Навоз 20 т/га	3.2	4.1	3.8	4.4	4.4
NPK экв. 10 т навоза	2.8	3.6	3.9	4.5	4.9
NPK экв. 20 т навоза	2.6	3.5	3.9	4.3	4.3
Навоз 5 т + NPK экв.	2.4	4.2	4.4	4.6	4.3
Навоз 10 т + NPK экв.	1.9	3.2	4.1	4.7	4.2
Навоз 20 т + NPK экв.	1.9	2.9	3.6	4.3	4.5

10 и 20 т/га в год, 230–290 мг/кг – в вариантах NPK эквивалентно 10 т/га навоза, навоз 5 т/га + NPK эквивалентно навозу, 280–320 мг/кг – NPK эквивалентно навозу 20 т/га и навоз 10 т/га в год + NPK эквивалентно навозу. Количество K_{подв} в варианте с максимальной насыщенностью пашни удобрениями навоз 20 т/га + NPK эквивалентно навозу увеличилось до 390–430 мг/кг.

Доля K_{л/подв} относительно его валового количества в пахотном слое почвы в результате при-

менения всех систем удобрения повысилась от 0.09 (контроль) до 0.12–0.24%, что соответствует уровню целинного аналога или существенно его превышает. Доля K_{подв} в слое 0–20 см повысилась до значений целинной почвы только при использовании минеральной и органо-минеральной систем удобрения с более высокой насыщенностью (NPK эквивалентно навозу 20 т/га, навоз 10 и 20 т/га в год + NPK эквивалентно навозу).

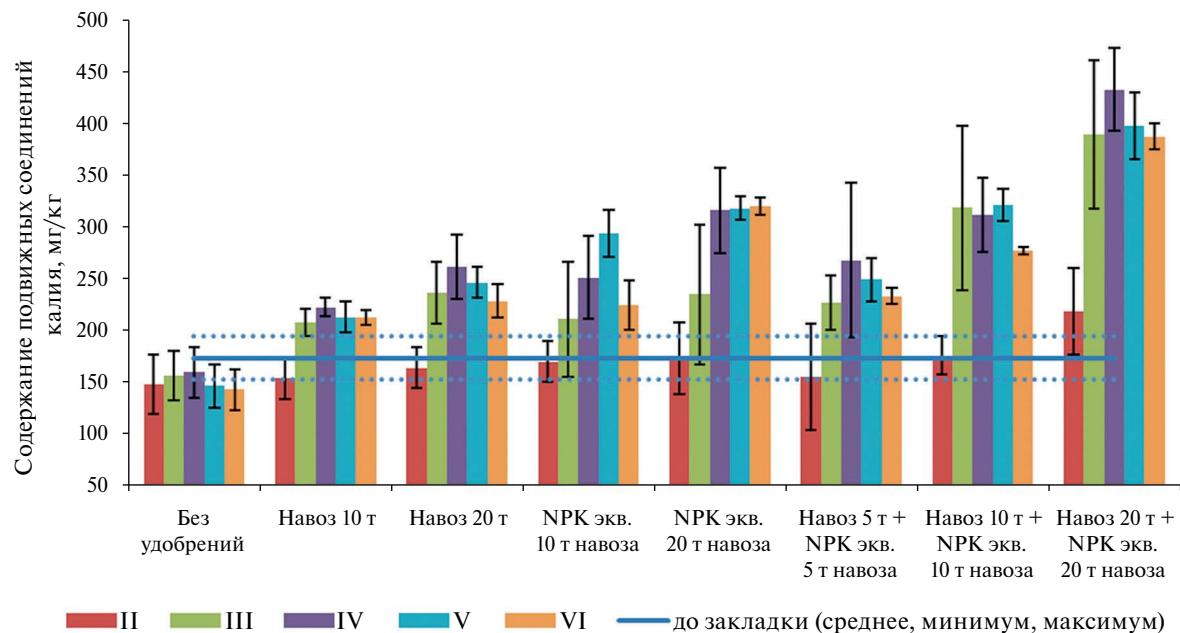


Рис. 1. Изменение содержания подвижных соединений калия в пахотном слое почвы (0–20 см) по ротациям севооборота (среднее по двум закладкам, II–VI ротации).

Изучение динамики содержания $K_{\text{подв}}$ в пахотном слое при возделывании сельскохозяйственных культур без применения удобрений по ротациям, показало уменьшение их количества от исходного уровня через 50 лет на 18%. Запасы $K_{\text{подв}}$ в пахотном слое почвы уменьшились всего на 80 кг, а вынос элемента составил около 3 т. Это свидетельствует о том, что в почве происходила мобилизация калия из необменных форм, или растения потребляли калий из нижележащих слоев почвы. Считается, что значительная часть обменного (подвижного) калия не поглощается растениями, так как он удерживается почвенными коллоидами с большей силой, чем та, с которой корневая система растений воздействует на почву. В отсутствие растений уровень содержания обменного калия в почве восстанавливается за счет перехода его из необменно-поглощенного состояния [12]. Поддержание подвижной формы калия также происходит в результате перераспределения калия из нижележащих слоев почвы в верхние. Перемещение происходит через корневую систему растений [17, 20].

Достоверное увеличение содержания $K_{\text{л/попл}}$ и $K_{\text{подв}}$ в подпахотном слое почвы (относительно контроля) отмечено при использовании минеральной и органо-минеральной системы в вариантах с более высокой насыщенностью удобрениями (NPK эквивалентно навозу 20 т/га, навоз 10 т/га + NPK эквивалентно навозу и навоз 20 т/га + NPK эквивалентно навозу) в 1.6–2.4 и 1.1–1.4 раза соответственно. Накопление $K_{\text{л/попл}}$ в слое 20–40 см наблюдали также при внесении NPK эквивалентно

10 т/га навоза. Полученные результаты связаны с тем, что калий в составе калия хлористого более подвижен и доступен, чем в навозе КРС, либо длительное внесение NPK могло привести к уменьшению способности почвы фиксировать калий [24].

На основе изучения подвижных (обменных) соединений калия в почве некоторые исследователи отмечают, что в большей степени весь внесенный с удобрениями калий концентрируется в пахотном слое. Такие результаты получены на различных типах почв в работах [22, 23, 27, 34]. Закрепление калия в пахотном слое наблюдали и в условиях орошения на каштановых супесчаных почвах [11]. Другие авторы отмечают накопление подвижных (обменных) соединений калия в профиле при применении калийных удобрений до глубины 40, 60, 100 см и даже их перемещение за пределы метрового и полутораметрового почвенного слоя. Чаще всего миграцию калийных соединений до глубины 100–150 см наблюдали на легких почвах, хотя встречаются похожие результаты на почвах тяжелого гранулометрического состава [27]. По изменению только подвижной формы калия не всегда можно судить о накоплении калия в профиле почвы. В работе [12] на дерново-подзолистой среднесуглинистой почве в результате длительного применения калийных удобрений (NPK, NK) наблюдали увеличение валового калия в метровом слое, его необменной формы – в слое 0–60 см, при этом накопление подвижной формы калия отмечено только в слое 0–20 см.

Увеличение содержания необменных соединений калия в почве в слое 0–20 см относительно контрольного варианта наблюдали только при более высокой насыщенности пашни удобрениями (навоз 20 т/га в год, NPK эквивалентно навозу 20 т/га, навоз 10 и 20 т/га + NPK эквивалентно навозу) – в 1.1–1.2 раза. В данных вариантах закрепление внесенного калия происходило, как в подвижной, так и необменной форме примерно в равных количествах. Содержание $K_{\text{необ}}$ в подпахотном слое при внесении удобрений существенно не изменилось.

Распределение калия удобрений в пахотном слое по формам составило:

– органическая система удобрений (навоз 10 и 20 т/га) – 55–65% калия закрепилось в виде подвижной формы и 35–45% – в виде необменной;

– минеральная система удобрений – при умеренной дозе (NPK эквивалентно 10 т навоза) – 100% закрепилось в виде подвижной формы, при высокой дозе (NPK эквивалентно 20 т навоза) распределение составило 1 : 1;

– органо-минеральная система удобрений (навоз 10 и 20 т/га + NPK эквивалентно навозу) – 45–60% закрепилось в виде подвижной формы и 40–55% – в виде необменной.

Соотношение содержания необменных соединений калия к подвижным в результате применения удобрения в слое 0–20 см сузилось с 4.8 в контрольном варианте до 3.2–1.9. В вариантах с более высокой насыщенностью пашни удобрениями

наблюдали сужение данного соотношения в слое почвы 0–80 см. Уменьшение соотношения необменных соединений калия к подвижным, относительно целинного аналога, отмечено при использовании минеральной и органо-минеральной систем удобрения в верхнем слое почвы (0–20 см).

Для целинной почвы установлена высокая и очень высокая корреляционная связь ($r = 0.9$ –1.0) между содержанием в почве необменных, подвижных и легкоподвижных соединений калия. В длительном опыте достоверная корреляционная зависимость выявлена между подвижной и легкоподвижной формами калия – прямая, высокая ($r = 0.8$).

Прямые высокие корреляционные зависимости наблюдали между содержанием по профилю почвы подвижных, легкоподвижных соединений калия и органическим углеродом ($r = 0.8$ –0.9), обратные средние и высокие ($r = -0.7$...–0.9) – 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 и магния.

Урожайность полевых культур за пять ротаций севооборота по вариантам опыта показана в работе [4]. Наибольшая продуктивность полевого восьмипольного севооборота отмечена в варианте с максимальным насыщением пашни удобрениями навоз 20 т + NPK эквивалентно навозу, при этом окупаемость 1 кг действующего вещества удобрений составила всего 1.8 кг зерновых

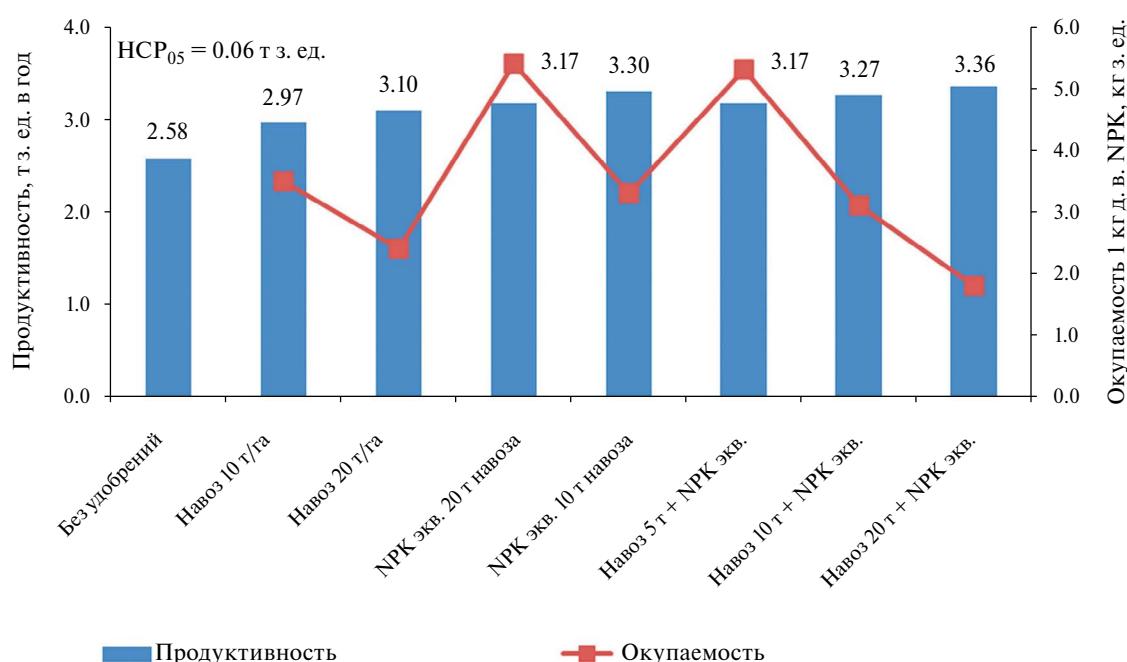


Рис. 2. Продуктивность полевого восьмипольного севооборота (среднее по двум закладкам, II–VI ротации), т з. ед. в год и окупаемость 1 кг д. в. NPK, кг з. ед.

единиц (з. ед.) (рис. 2). Наибольшая окупаемость (5.3–5.4 кг з. ед.) получена в вариантах NPK эквивалентно 10 т навоза, навоз 5 т/га в год + NPK эквивалентно навозу.

Использование любой системы удобрений имеет свои последствия относительно изменений плодородия почвы. В зависимости от поставленной цели – получение максимальной урожайности, экономической эффективности или сохранения плодородия почвы, земельного фонда, как национального достояния страны, выбор системы удобрения будет существенно отличаться.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Длительное возделывание сельскохозяйственных культур на дерново-подзолистой почве без применения удобрений привело к уменьшению валового содержания калия, его подвижных и легкоподвижных (наиболее доступных для растений) соединений. Валовые и подвижные запасы калия были меньше, чем в почве целинного аналога в слое 0–20 см на 13 и 43% соответственно. Запасы легкоподвижной формы калия уменьшились в метровом слое почти на 40%. Отмечены тенденции уменьшения содержания необменных соединений калия. В результате длительного экстенсивного сельскохозяйственного использования пашни также установлено уменьшение в почве доли подвижных и легкоподвижных соединений калия. Полученные результаты связаны с выносом элемента питания сельскохозяйственными культурами, при пашкой нижележащего горизонта, разрушением калийсодержащих минералов и переносом калийных соединений по профилю.

Изменение в калийном режиме почвы в результате длительного применения органической, минеральной и органо-минеральной систем удобрения (выровненных по элементам питания) зависело от насыщенности пашни удобрениями. Умеренная насыщенность пашни удобрениями (навоз 10 т/га в год, NPK эквивалентно 10 т навоза, навоз 5 т/га + NPK эквивалентно навозу) способствовала увеличению (относительно контрольного варианта) в пахотном слое почвы только содержания подвижных и легкоподвижных соединений калия в 1.4–1.6 раза. Запасы в пахотном слое подвижной формы калия в данных вариантах повысились с 0.4 до 0.6 т/га (50%), легкоподвижной – с 37 до 50–57 кг/га (на 35–54%). Высокая насыщенность пашни удобрениями (навоз 20 т/га в год, NPK эквивалентно 20 т/га навоза, навоз 10 т/га в год + NPK эквивалентно навозу) увеличила в пахотном слое почвы содержание необменных, подвижных и легкоподвижных соединений калия (в 1.1–2.3 раза), запасы соответственно возросли на 10–25, 50–100 и 46–105%.

Минеральная и органо-минеральная системы удобрений при более высокой насыщенности (NPK эквивалентно 20 т навоза, навоз 10 т/га + NPK эквивалентно навозу) способствовал накоплению подвижных и легкоподвижных соединений калия в подпахотном слое, в результате их запасы в слое 0–40 см увеличились от 0.9 (без удобрений) до 1.4 т/га и от 59 до 105–112 кг/га. Органическая система удобрений оказывала достоверное влияние на изменение калийного режима почвы только в слое 0–20 см.

Наибольшее положительное влияние на калийный режим почвы наблюдали при максимальной насыщенности пашни удобрениями навоз 20 т/га в год + NPK эквивалентно навозу. Здесь отмечено повышение в пахотном слое валового содержания калия и всех его изучаемых форм, в подпахотном – подвижных и легкоподвижных форм.

Следует отметить, что если в верхнем слое почвы (0–40 см) в результате длительного применения удобрений отмечено накопление различных форм калия, то в более глубоких слоях (40–60, 60–80, 80–100 см) прослеживали тенденцию уменьшения содержания легкоподвижных, подвижных и необменных соединений относительно контрольного варианта. Количество необменных соединений в отдельных вариантах (на глубине 60–100 см) было даже меньше целинного аналога. Полученные данные могут быть связаны с генетической неоднородностью почвы по профилю, потреблением растениями соединений калия из более глубоких слоев почвы (в вариантах с отрицательным балансом калия), перемещением за пределы метрового слоя. Удобрения могли оказать влияние на переход одних форм калия в другие, которые не представлены в данных исследованиях. Наиболее яркое уменьшение содержания подвижных и необменных соединений калия с глубины 40 см наблюдали в варианте навоз 5 т/га в год + NPK эквивалентно навозу. При максимальной насыщенности пашни удобрениями (навоз 20 т/га в год + NPK эквивалентно навозу) в более глубоких слоях почвы отмечено содержание легкоподвижных, подвижных и необменных соединений близкое к контрольному варианту.

Поддержание в почве валовых запасов калия в слое 0–20 см на уровне целинного аналога отмечено при использовании органо-минеральной системы удобрения навоз 10 т/га в год + NPK эквивалентно навозу. Сохранение запасов подвижных соединений калия наблюдали в вариантах NPK эквивалентно 20 т навоза, навоз 10 т/га + NPK эквивалентно навозу. Существенный рост валовых запасов калия (от 46 (луг) до 49 т/га) и его подвижной части (от 0.7 до 1.0 т/га) отмечен при внесении навоза 20 т/га в год + NPK эквивалентно навозу. Запасы легкоподвижной формы калия в метровом слое в пахотной почве были выше целинного аналога (на 25%) только при использовании системы

удобрения навоз 20 т/га в год + NPK эквивалентно навозу, в остальных вариантах запасы были меньше на 17–36%.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено в рамках государственного задания № 124020600030-6.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

В данной работе отсутствуют исследования человека или животных.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агрохимические методы исследования почв. Москва: Наука, 1975. 656 с.
2. Акманаева Ю.А. Влияние видов севооборота и системы удобрения на калийный режим дерново-мелкоподзолистой среднесуглинистой почвы // Пермский аграрный вестник. 2019. № 4. С. 25–32.
3. Беляев Г.Н. Калийные удобрения из калийных солей Верхнекамского месторождения и их эффективность. Пермь: Перм. кн. изд-во, 2005. 304 с.
4. Васибева М.Т., Ямалдинова В.Р. Эффективность применения различных систем удобрения на дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве в условиях Предуралья // Агрохимия. 2023. № 3. С. 29–42.
<https://doi.org/10.31857/S0002188123030110>
5. Гармашов В.М. Калийный режим чернозема обыкновенного при минимализации обработки почвы и прямом посеве // Международный научно-исследовательский журнал. 2022. № 2–1. С. 128–132.
<https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.116.2.021>
6. Завьялова Н.Е. Гумус и азот дерново-подзолистой почвы различных сельскохозяйственных угодий Пермского края // Почвоведение. 2016. № 11. С. 1347–1354.
<https://doi.org/10.7868/S0032180X16110113>
7. Завьялова Н.Е., Васибева М.Т., Шишков Д.Г., Иванова О.В. Содержание различных форм калия в почвенном профиле дерново-подзолистой почвы Предуралья // Почвоведение. 2023. № 8. С. 943–952.
<https://doi.org/10.31857/S0032180X23600154>
8. Кузина Е.В. Влияние обработки почвы на содержание основных элементов минерального питания // Научная жизнь. 2020. Т. 15. № 5. С. 622–630.
<https://doi.org/10.35679/1991-9476-2020-15-5-622-630>
9. Лукин С.М. Калийное состояние дерново-подзолистой супесчаной почвы и баланс калия при длительном применении удобрений // Агрохимия. 2012. № 12. С. 5–14.
10. Мезенцева Е.Г., Кулеш О.Г., Грачева А.А. Влияние дефицитных систем удобрения на динамику содержания фосфатов и калия, их баланс в длительном опыте на дерново-подзолистой супесчаной почве // Почвоведение и агрохимия. 2022. № 1. С. 40–49.
[https://doi.org/10.47612/0130-8475-2022-1\(68\)-40-49](https://doi.org/10.47612/0130-8475-2022-1(68)-40-49)
11. Меркушева М.Г., Убугунов Л.Л., Болонева Л.Н., Лаврентьева И.Н. Содержание, запасы и 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.
<https://doi.org/10.31857/S0002188120030102>
12. Минеев В.Г., Гомонова 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.
13. Никитина Л.В. Исследования калийного режима разных типов почв в длительных опытах Геосети // Агрохимия. 2018. № 1. С. 39–51.
<https://doi.org/10.7868/S0002188118010040>
14. Никитина Л.В., Беличенко М.В. Калий в питании растений и эффективность калийных удобрений // Плодородие. 2023. № 6. С. 5–8.
<https://doi.org/10.25680/S19948603.2023.135.01>
15. Носко Б.С. Изменение калийного фонда черноземов при распашке многолетней залежи // Почвоведение. 1999. № 12. С. 1474–1480.
16. Роева Т.А., Леонтьева Л.И., Леоничева Е.В. Калийный режим в агросерой почве вишневого сада при систематическом внесении минеральных удобрений // Плодородие. 2023. № 2. С. 55–58.
<https://doi.org/10.25680/S19948603.2023.131.12>
17. Савич В.И., Платонов И.Г., Духанин Ю.А., Поветкина Н.Л., Сафонов А.Ф. Комплексная оценка состояния калия в почве // Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. 2006. № 3. С. 15–28.
18. Способ определения валовых форм азота, фосфора и калия из одной навески пробы почвы. Пат. Беларусь. № 17070. 2013.
19. Сычев В.Г., Никитина Л.В. Калийный режим суглинистых дерново-подзолистых почв // Таврический вестник аграрной науки. 2021. № 2. С. 233–243.
<https://doi.org/10.33952/2542-0720-2021-2-26-233-243>
20. Тазин И.И., Ефимов О.Е., Савич В.И., Федянина Е.С. Прикорневая зона растений, как критерий плодородия почв // Плодородие. 2021. № 6. С. 9–13.
<https://doi.org/10.25680/S19948603.2021.123.03>

21. Тютюнов С.И., Навольнева Е.В., Навальнев В.В., Логгинов И.В., Литвинов А.И. Влияние основных факторов системы воспроизводства плодородия почв на содержание подвижного калия в черноземе типичном юго-западной части ЦЧР // Земледелие. 2023. № 2. С. 8–12.
<https://doi.org/10.24412/0044-3913-2023-2-8-12>
22. Убугунов Л.Л., Убугунова В.И. Калийный фонд аллювиальных почв Байкальского региона // Почвоведение. 1999. № 4. С. 530–536.
23. Филон И.И., Шеларь И.А. Содержание калия в черноземе типичном при сельскохозяйственном освоении и длительном применении минеральных удобрений // Агрохимия. 1999. № 1. С. 21–27.
24. Шаймухаметов М.Ш., Петрофанов В.Л. Влияние длительного применения удобрений на К-фиксирующую способность почв // Почвоведение. 2008. № 4. С. 494–506.
25. Шафран С.А., Ильюшенко И.В. Содержание K_2O в зависимости от обеспеченности дерново-подзолистых почв подвижным калием и применения калийных удобрений // Плодородие. 2023. № 3. С. 10–13.
<https://doi.org/10.25680/S19948603.2023.132.02>
26. Якименко В.Н. Взаимовлияние калия и магния при выращивании картофеля на серой лесной почве // Агрохимия. 2021. № 6. С. 8–15.
<https://doi.org/10.31857/S0002188121050136>
27. Якименко В.Н. Изменение содержания калия и магния в профиле почвы длительного полевого опыта // Агрохимия. 2019. № 3. С. 19–29.
<https://doi.org/10.1134/S0002188119030153>
28. Якименко В.Н. Калий в агроценозах Западной Сибири. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2003. 231 с.
29. Яковлева Л.В., Поляков В.А., Жданов С.С. Влияние длительного применения удобрений на калийный режим дерново-подзолистой почвы // Владимирский земледелец. 2018. № 4. С. 14–20.
<https://doi.org/10.24411/2225-2584-2018-10034>
30. Alhaj Hamoud Y., Wang Z., Guo X., Shaghaleh H., Sheteiwy M., Chen S., Qiu R., Elbashier M.M.A. Effect of Irrigation Regimes and Soil Texture on the Potassium Utilization Efficiency of Rice // Agronomy. 2019. V. 9. № 2. 100.
<https://doi.org/10.3390/agronomy9020100>
31. Dotaniya C.K., Lakaria B.L., Sharma Y., Meena B.P., Wanjari R.H., Shirale A.O., Dotaniya M.L. at al. Potassium fractions in black soil mediated by integrated nutrient management modules under maize-chickpea cropping sequence // PLoS One. 2023.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0292221>
32. 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. № 3. P. 237–249.
<https://doi.org/10.1007/s42860-020-00078-6>
33. Li T., Wang H., Zhou Z., Chen X., Zhou J. A new grading system for plant-available potassium using exhaustive cropping techniques combined with chemical analyses of soils // Sci Rep. 2016. V. 6/ № 37327.
<https://doi.org/10.1038/srep37327>
34. Sui N., Yu C.R., Song G.L., Zhang F., Liu R.X., Yang C.Q., Meng Y.L., Zhou Z.G. Comparative effects of crop residue incorporation and inorganic potassium fertilisation on apparent potassium balance and soil potassium pools under a wheat-cotton system // Soil research. 2017. V. 55. № 8. P. 723–734.
<https://doi.org/10.1071/SR16200>

Changes in the Potassium Regime of Soddy-Podzolic Heavy Loamy Soil During Long-Term Extensive Cultivation of Agricultural Crops and the Use of Fertilizers

M. T. Vasbieva¹, * V. R. Yamaltdinova¹, and N. E. Zavyalova¹

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

*e-mail: vasbieva@mail.ru

The change in the gross content of potassium its easily mobile (extract 0.01 M $CaCl_2$), mobile (according to Kirsanov) and non-exchangeable (according to Gedroits) compounds in a meter-long layer of soddy-podzolic heavy loamy soil (Albic Retisol (Abruptic, Aric, Loamic)) during long-term extensive cultivation was studied crops and fertilizer application. The studies were carried out in a long-term stationary experiment established in 1968 in the Perm region. We experimentally studied organic (cattle manure), mineral and organomineral fertilizer systems, leveled by nutrients (control – without fertilizers, manure 10 and 20 t/ha per year, NPK equivalent to 10 and 20 t of manure, manure 5, 10 and 20 t/ha + NPK equivalent to manure). Eight-field fallow-grain-row crop rotation. An assessment of changes in the potassium regime of arable soil was carried out in comparison with a virgin analogue (grass-forb meadow). It was established that long-term cultivation of agricultural crops (almost 50 years)

without the use of fertilizers led to a decrease in the gross reserves of potassium (by 13%), its mobile compounds (by 43%) in the 0–20 cm layer, and the reserves of easily mobile compounds (by 40%) in a meter layer. The saturation of arable land with fertilizers and the type of fertilizer system influenced the direction of changes in the potassium regime of the soil. The accumulation of easily mobile, mobile and non-exchangeable potassium compounds as a result of long-term use of fertilizers was noted maximum in the 0–40 cm layer; in deeper layers (40–100 cm), on the contrary, a tendency was observed to decrease the content of these forms of potassium (relative to the option without fertilizers). Maintenance of gross potassium reserves in the soil in a layer of 0–20 cm at the level of the virgin analogue (46 t/ha) was noted when using an organomineral fertilizer system with a manure saturation of 10 t/ha per year + NPK equivalent to manure, an increase in reserves to 49 t/ha with manure saturation 20 t/ha per year + NPK equivalent to manure.

Keywords: long-term experience, organic and mineral fertilizers, potassium balance, gross potassium content, non-exchangeable, mobile and easily mobile potassium compounds