

ВЛИЯНИЕ ДЛИТЕЛЬНОГО ПРИМЕНЕНИЯ АЗОТНЫХ, ФОСФОРНЫХ И КАЛИЙНЫХ УДОБРЕНИЙ НА СОДЕРЖАНИЕ ФОРМ СОЕДИНЕНИЙ ФОСФОРА В ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЕ ПРЕДУРАЛЬЯ

© 2024 г. М. Т. Васбиева^а, * (<http://orcid.org/0000-0003-4048-6319>),

Н. Е. Завьялова^а, Д. Г. Шишков^а

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

*e-mail: vasbievamt15@gmail.com

Поступила в редакцию 25.01.2024 г.

После исправления 26.02.2024 г.

Принята к публикации 06.03.2024

Изучено влияние длительного применения минеральных удобрений на изменение содержания в дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве (Albic Retisol (Abruptic, Agric, Loamic)) общего фосфора, его органических, минеральных и подвижных соединений. Исследования проведены в многолетнем стационарном опыте, заложенном в Пермском крае в 1978 г. Варианты – 0 (без удобрений), N90, P90, K90, N90P90, N90K90, P90K90, N90P90K90, N30P30K30, N60P60K60, N120P120K120, N150P150K150. В опыте применяли аммиачную селитру или мочевины, двойной или простой суперфосфат и калий хлористый. Установлено, что длительное применение суперфосфата в течение пяти ротаций полевого восьмипольного севооборота (P90, P90K90, N90P90, N90P90K90) привело к достоверному увеличению в пахотном слое почвы (0–20 см) общего содержания фосфора, его минеральной части в 1.3–1.8 раза, содержания подвижных соединений в 1.9–2.7 раза. Применение азотных удобрений (N90, N90K90, N90P90, N90P90K90) влияло на накопление в почве органических соединений фосфора. Достоверное увеличение в почве содержания и запасов, как минеральных соединений фосфора, так и органических, наблюдали только при применении полного минерального удобрения N90P90K90. Различное сочетание суперфосфата с азотными удобрениями и калием хлористым, а также доза удобрений влияли на интенсивность накопления подвижных соединений фосфора в почве по ротациям и изменению его количества по профилю. Внесение невысоких доз (NPK)30–60 привело к увеличению подвижных соединений фосфора в основном в пахотном слое почвы, при использовании более высоких доз (NPK)90–150 изменения отмечены в слое 0–80 см. Длительное применение азотных и калийных удобрений с течением времени приводит к увеличению в пахотном слое почвы подвижных соединений фосфора.

Ключевые слова: длительный опыт, минеральные удобрения, баланс фосфора, подвижный фосфор, органический и минеральный фосфор

DOI: 10.31857/S0032180X24080079, **EDN:** KMNRTU

ВВЕДЕНИЕ

Природных источников пополнения запаса фосфора в почве не существует. Нерациональное сельскохозяйственное использование может в значительной степени изменить фосфатный режим почвы. В ней нарушается сложившийся круговорот биогенных элементов, формируется отрицательный баланс [7, 12, 26], наблюдается уменьшение содержания доступных форм фосфора для

растений [10, 16, 17, 29]. Основной путь поддержания оптимального питания растений фосфором – внесение удобрений. При длительном систематическом применении агрохимикатов происходит трансформация структуры фосфатного фонда почвы. Это связано с изменением процессов сорбции и десорбции фосфат-ионов почвы, минерализацией органических соединений, мобилизацией фосфора из труднорастворимых соединений и воздействием других факторов [15, 21, 22, 24, 35, 36].

Цель работы — оценить влияние видов, соотношений и доз минеральных удобрений на содержание в дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве общего фосфора, его органических, минеральных и подвижных соединений.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Полевой стационарный опыт был заложен в 1978 г. на опытном поле Пермского НИИСХ (филиал ПФИЦ УрО РАН) на дерново-слабоподзолистой тяжелосуглинистой почве (Albic Retisol (Abruptic, Aric, Loamic)). Постановка полевого опыта была проведена по неполной факториальной схеме $1/9$ ($6 \times 6 \times 6$), повторений 2. Для исследований были выбраны варианты: 1 — без удобрений (контроль), 2 — N90, 3 — P90, 4 — K90, 5 — N90P90, 6 — N90K90, 7 — P90K90, 8 — N90P90K90, 9 — N30P30K30, 10 — N60P60K60, 11 — N120P120K120, 12 — N150P150K150. Общая площадь делянки — 120 м^2 . Закладок опыта во времени — 2 (1978, 1980 гг.). Исследования проводили в полевом восьмипольном парозернопропашном севообороте с чередованием культур: чистый пар, озимая рожь, картофель, яровая пшеница с подсевом клевера, клевер 1 года пользования, клевер 2 года пользования, ячмень, овес. Формы удобрений — аммонийная селитра или мочевины, двойной или простой суперфосфат, калий хлористый. Минеральные удобрения вносили под зерновые культуры и картофель, на клевере изучали последствие. Перед закладкой опыта проводили известкование по 1.0 Нг. Органические удобрения в опыте не использовали. Солома в опыте после уборки до 2013 г. отчуждалась. Агрохимическая характеристика опытного участка до закладки опыта (усредненные данные): содержание $C_{\text{орг}}$ — 1.24%, pH_{HCl} — 5.6, Нг — 2.0 смоль(экв)/кг, S — 21.0 смоль(экв)/кг, содержание подвижного калия по Кирсанову — 203 мг/кг.

Отбор образцов почвы в опыте проводили осенью, после уборки сельскохозяйственной культуры в 3–5 точках на каждой делянке, образцы смешивали. Общее содержание фосфора в почве, как и содержание его минеральных и органических соединений определяли методом прокаливания Сэндерса и Вильямса, подвижные формы фосфора по Кирсанову. Запасы фосфора рассчитывали через плотность почвы. Продуктивность севооборота в зависимости от вариантов опыта представлена в работе [11].

Исследования проводили в IV агроклиматическом районе Пермского края. В физико-географическом отношении район находится в подзоне южной тайги и хвойно-широколиственных лесов. Климат умеренно-континентальный с холодной, продолжительной, снежной зимой и теплым коротким летом. Сумма средних суточных температур выше 10°C составляет 1700–1900 $^\circ\text{C}$. Переход

среднесуточных температур воздуха через 10°C весной приходится на вторую декаду мая, осенью на конец первой — начало второй декады сентября. Длительность периода активной вегетации в среднем составляет 115 сут. С температурой выше 15°C — 60 сут. Район относится к зоне достаточного увлажнения: средний ГТК 1.4; осадков за год выпадает 470–500 мм, большая часть которых приходится на теплое полугодие — с апреля по октябрь (66–77%). Число дней со снежным покровом в среднем составляет 176 [1].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Длительное внесение суперфосфата (P90, P90K90, N90P90, N90P90K90) способствовало увеличению общего содержания фосфора и его минеральной части (относительно контрольного варианта) в пахотном слое почвы (табл. 1). В вариантах P90 и N90P90 количество минеральных соединений возросло в 1.8 раза, общее содержание фосфора — в 1.5–1.6 раза. Накопление содержания общего фосфора и его минеральной части было менее существенным при использовании фосфорно-калийных удобрений P90K90 — в 1.3–1.4 раза. Баланс фосфора во всех трех вариантах был примерно одинаков и составил 32–34 кг/га в год (табл. 2). Возможно, калий хлористый способствовал миграции соединений фосфора по профилю.

Увеличение содержания органических соединений фосфора в почве наблюдали при длительном использовании азотных удобрений N90, N90P90, N90K90, N90P90K90. Максимальное накопление органических соединений фосфора отмечено при внесении азотно-калийных удобрений N90K90 — 720 мг/кг, на 70% больше, чем в варианте без удобрений. При наличии в почве хлорид-ионов возможно их взаимодействие с органическим веществом почвы с образованием хлорорганических соединений [6]. Под воздействием азотных удобрений трансформация фосфорных соединений в почве в течение вегетационного периода могла сместиться в сторону образования органофосфатов.

Доля органофосфатов в почве при внесении N90 и N90K90 составила 49 и 54% соответственно. Соотношение минеральных и органических соединений фосфора в данных вариантах стало близким к целинным аналогам региона [5].

Достоверное накопление в почве (слой 0–20 см) содержания и запасов, как минеральных соединений фосфора, так и органических, относительно контрольного варианта наблюдали только при применении полного минерального удобрения N90P90K90. Общие запасы фосфора возросли от 2.9 (контроль) до 4.5, минерального — от 1.8 до 2.9 и органического от 1.1 до 1.6 т/га.

Таблица 1. Изменение показателей фосфатного режима дерново-подзолистой почвы при длительном применении минеральных удобрений, 0–20 см (V ротация, среднее по двум закладкам, 2016–2018 гг.)

Вариант	Содержание, мг/кг / % от общего количества			Запасы, т/га		
	общий фосфор	минеральные соединения фосфора	органические соединения фосфора	общий фосфор	минеральные соединения фосфора	органические соединения фосфора
Без удобрений	1120	700 / 63	420 / 37	2.9	1.8	1.1
N90	1200	615 / 51	585 / 49	3.1	1.6	1.5
P90	1720	1240 / 72	480 / 28	4.5	3.2	1.2
K90	1305	880 / 67	425 / 33	3.4	2.3	1.1
N90P90	1810	1245 / 69	565 / 31	4.7	3.2	1.5
N90K90	1330	610 / 46	720 / 54	3.5	1.6	1.9
P90K90	1430	960 / 67	470 / 33	3.7	2.5	1.2
N90P90K90	1745	1120 / 64	625 / 36	4.5	2.9	1.6
HCP ₀₅	305	210	200	0.8	0.5	0.5

Таблица 2. Содержание подвижных соединений фосфора в метровом слое почвы и хозяйственный баланс фосфора при длительном применении минеральных удобрений

Вариант	Содержание, мг/кг						Поступление фосфора* в сумме за 5 ротаций, кг/га	Хозяйственный вынос фосфора в сумме за 5 ротаций, кг/га	Баланс фосфора, кг/га в год, ± (среднее за 5 ротаций, 1978–2019 гг.)
	перед закладкой, 0–20	VI ротация (2021 г.)							
		0–20	20–40	40–60	60–80	80–100			
Без удобрений	239	192	167	139	236	376	60	970	–23
N90	198	188	110	175	283	337	60	1050	–25
P90	169	461	225	243	300	419	2310	945	+34
K90	152	235	194	166	207	361	60	978	–23
N90P90	203	397	153	140	250	330	2310	1030	+32
N90K90	138	185	122	119	246	410	60	1015	–24
P90K90	177	397	172	188	408	526	2310	1040	+32
N90P90K90	194	371	225	188	328	428	2310	1140	+29
N30P30K30	160	329	150	214	273	456	810	1025	–5
N60P60K60	206	339	200	174	368	454	1560	1140	+11
N120P120K120	231	446	210	199	346	461	3060	1070	+50
N150P150K150	173	530	242	252	356	423	3810	1150	+67
НСП ₀₅	—	123	41	48	91	100	—	—	—

* С удобрениями и семенами.

В вариантах N90, K90, N90K90 не наблюдали уменьшения общего содержания фосфора в почве (слой 0–20 см) относительно контроля, отмечены лишь незначительные тенденции снижения его минеральной части. Хотя в исследованиях [8], проведенных на дерново-подзолистой почве изучаемого региона, отмечается уменьшение содержания общего фосфора в пахотном слое почвы при внесении азотно-калийных удобрений. Полученные результаты можно объяснить балансом фосфора. В данных вариантах, как и в контрольном варианте, баланс изучаемого элемента был примерно одинаковым (–23...–25 кг/га в год). Кроме того, по данным [13] почвы, сформированные на материнских породах богатых подвижными фосфатами, обладают высокой буферной способностью поддерживать определенный фосфатный уровень. В почве постоянно происходит процесс переноса фосфора корнями растений из нижних в верхние горизонты [28].

На рис. 1 представлена динамика подвижных соединений фосфора ($P_{\text{подв}}$) с I по V ротации севооборота в пахотном слое почвы, в табл. 2 – изменение в метровом слое. За время проведения длительного опыта в контрольном варианте не выявлено четкой закономерности уменьшения соединений подвижного фосфора от ротации к ротации. Здесь при сложившемся высоким отрицательным балансе данного элемента за пять ротаций севооборота (–970 кг/га) запасы $P_{\text{подв}}$ в почве уменьшились всего на 80–120 кг. Исследуемая почва способна поддерживать определенный уровень подвижных соединений за счет других форм, ниже лежащих горизонтов и материнской породы.

Длительное применение азотных и калийных удобрений (N90, K90, N90K90) с течением времени привело к увеличению в пахотном слое почвы количества подвижных соединений фосфора. В вариантах N90 и N90K90 в первые две ротации севооборота наблюдали тенденции к уменьшению $P_{\text{подв}}$ в почве на 10–35% (относительно исходного уровня). В IV–VI ротациях отмечено увеличение содержания $P_{\text{подв}}$ в почве до исходного уровня или его превышение на 23–44%. В варианте K90 наблюдали в I и II ротациях сохранение содержания $P_{\text{подв}}$ на исходном уровне, в IV–VI ротациях отмечены тенденции к увеличению в 1.5–1.7 раза. При использовании азотных удобрений это может быть связано с подкислением почвы, применении калийных удобрений – влиянием высокой концентрации ионов калия и/или хлора на трансформацию минералов почвы. В работе [31] показано, что длительное применение на черноземе обыкновенном азотного, калийного и полного минерального удобрений в высокой дозе (N90–150, K150, N120P150K120) вызвало механическую дезинтеграцию почвенных частиц и трансформацию минералов. Некоторые

исследователи отмечают, что ионы хлора замещают адсорбированные фосфат-ионы в почве [9].

Также возможен перенос фосфора растениями и его потребление из ниже лежащих слоев. В вариантах N90 и N90K90 отмечено достоверное уменьшение количества $P_{\text{подв}}$ в подпахотном слое (20–40 см) на 27–34 %.

Длительное применение суперфосфата (P90, P90K90, N90P90, N90P90K90) привело к повышению содержания $P_{\text{подв}}$ на начало VI ротации севооборота в слое 0–20 см относительно исходного уровня в 1.9–2.7 раза. Различное сочетание P с N и K оказало влияние на динамику подвижного фосфора по ротациям. При внесении суперфосфата в чистом виде отмечено увеличение количества $P_{\text{подв}}$ с первой ротации севооборота, и далее наблюдали закономерный рост от ротации к ротации. Именно в варианте P90 отмечено максимальное накопление подвижных соединений фосфора в пахотном слое почвы, его запасы от исходного уровня на начало VI ротации увеличились в 3 раза (от 0.4 до 1.2 т/га). При внесении P90K90 и N90P90 в первых двух ротациях наблюдали сохранение содержания $P_{\text{подв}}$, близкое к исходному уровню, увеличение отмечено с IV ротации. При внесении полного минерального удобрения N90P90K90 рост количества $P_{\text{подв}}$ в пахотном слое почвы наблюдали со II ротации севооборота.

Различное сочетание P с N и K влияло на изменение количества $P_{\text{подв}}$ по профилю. Содержание $P_{\text{подв}}$ в почве было достоверно выше контрольного варианта при длительном применении N90P90 только в слое 0–20 см, P90 – в слое 0–60 см, N90P90K90 – в слое 0–80 см и P90K90 – в слое 0–100 см. Полученные результаты свидетельствуют о том, что калий хлористый в сочетании с суперфосфатом способствует миграции фосфора из удобрений по профилю и/или замещению фосфора из его труднодоступных соединений. Максимальное закрепление фосфора из удобрений происходило в пахотном слое почвы.

Изучение влияния возрастающих доз полного минерального удобрения (NPK)30–150 на содержание подвижных соединений фосфора показало, что в первую ротацию севооборота даже при внесении высоких доз NPK в почве не наблюдали достоверного их увеличения. При внесении фосфорных удобрений в почве происходит их быстрое закрепление. Химическая фиксация фосфатов, поступивших из внесенных удобрений, поддерживает эффективность применяемых фосфорных удобрений на относительно низком уровне и увеличивает издержки сельскохозяйственного производства. Эффективность использования фосфора из удобрений растениями в первый год применения оценивается в пределах 5–25% от внесенного количества [2, 27].

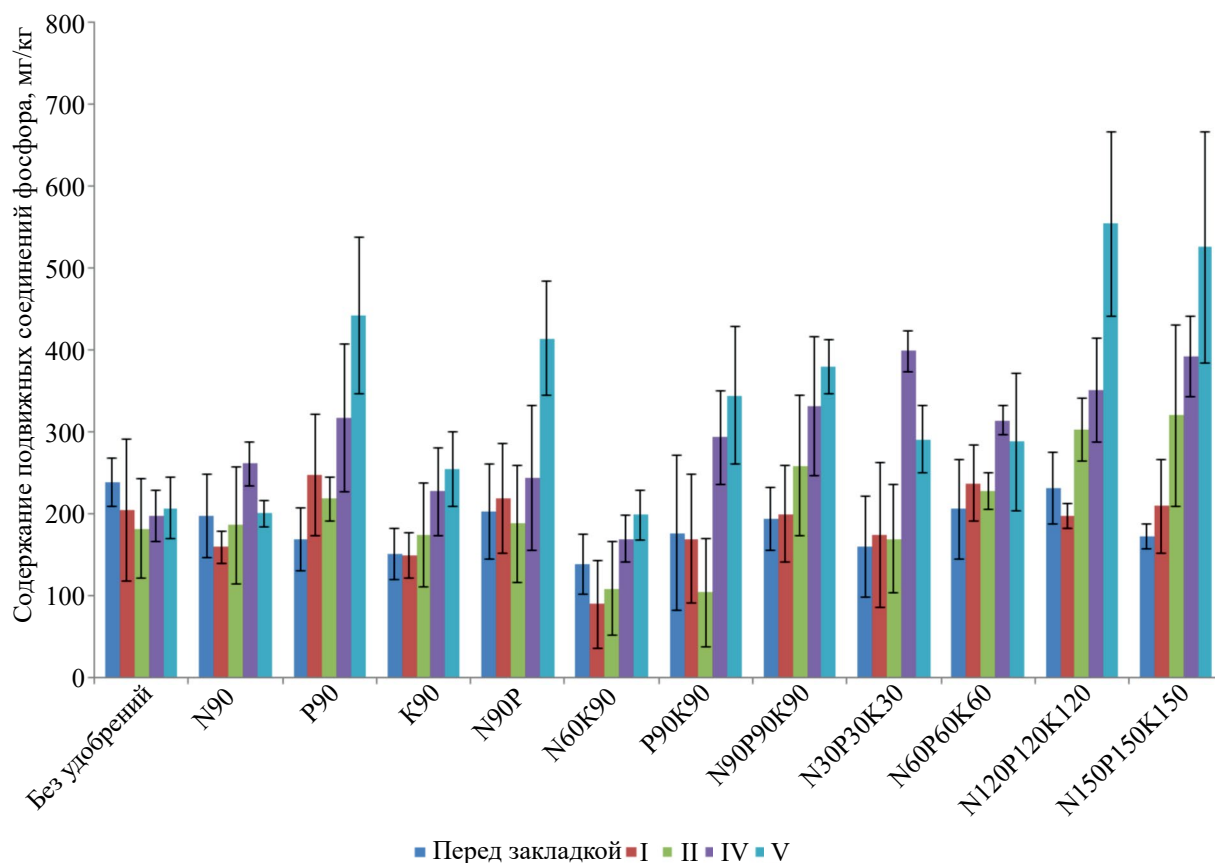


Рис. 1. Изменение содержания подвижных соединений фосфора в дерново-подзолистой почве (0–20 см) при длительном применении различных видов, доз и соотношений минеральных удобрений (I–V ротации, 1978–2019 гг.), мг/кг (“усы” на графике – доверительный интервал, $p < 0.05$).

В вариантах (NPK)90–150 достоверное увеличение количества $P_{\text{подв}}$ в почве наблюдали только со II ротации. При внесении NPK в невысоких дозах 30 и 60 кг д.в. каждого элемента/га в первые две ротации наблюдали поддержание исходного уровня подвижных соединений фосфора в почве. Содержание $P_{\text{подв}}$ стало выше относительно исходного уровня в 2–3 раза во всех вариантах (NPK)30–150 на начало VI ротации.

Содержание $P_{\text{подв}}$ в почве было выше контрольного варианта в слое 0–80 см при применении (NPK)90–150. Запасы в метровом слое почвы повысились от 3.3 до 4.5–5.2 т/га. При длительном применении фосфорных удобрений в опыте могло произойти постепенное максимально возможное насыщение данным элементом верхнего слоя почвы, что способствовало его миграции по профилю. В соответствии со сложившимся представлением, фосфор обладает низкой способностью к миграции [3, 33] вследствие его быстрой абiotической фиксации в труднорастворимых минеральных соединениях [2, 25]. Однако есть исследования, которые показывают, что фосфор способен к

перемещению вниз по профилю и в первую очередь это связывают с интенсивным и систематическим применением удобрений [4, 14, 20, 32, 34]. Миграция фосфора может быть как пассивной (в составе частиц ила, физической глины), так и активной с раствором почвенной влаги [25]. Перемещение фосфора вниз по профилю, вероятно, связано с миграцией органических соединений, с механическим воздействием (обработка почвы, рост корневой системы) [23, 32]. В работах [18, 19] отмечено, что в кислых почвах при повышенной фосфатной нагрузке образуются соединения фосфора, связанные с железом и алюминием, обладающие повышенной миграционной способностью. По данным авторов [30] анионы фосфорных удобрений (суперфосфата) оказывают разрушающее воздействие на находящиеся с ним в контакте глинистые минералы, происходит деструктирование слоистых силикатов и образование более мобильных металлоорганических соединений фосфора.

Другой причиной повышения количества $P_{\text{подв}}$ по профилю может быть увеличение кислотности почвы в результате длительного применения

азотных удобрений. В вариантах с меньшими дозами (НРК)30–60 содержание подвижного фосфора выше контроля отмечено в отдельных слоях почвы (40–60, 60–80 см), что может быть связано как с применением удобрений, так и существующей неоднородностью почвенного профиля.

Длительное применение суперфосфата привело к увеличению доли подвижного фосфора в почве (слой 0–20 см) на начало VI ротации – с 17 (контроль) до 22–32%, внесение азотно-калийных удобрений – к уменьшению до 14%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Различное сочетание азотных, фосфорных и калийных удобрений оказало влияние на изменение показателей фосфатного режима дерново-подзолистой почвы. Длительное применение суперфосфата (P90, P90K90, N90P90, N90P90K90) привело к достоверному увеличению в пахотном слое почвы общего содержания фосфора (относительно контрольного варианта/исходного уровня), его минеральной части в 1.3–1.8 раза, подвижной части в 1.9–2.7 раза. Влияние на обогащение почвы органическими соединениями фосфора оказывало применение азотных удобрений (N90, N90K90, N90P90, N90P90K90), отмечено увеличение оргофосфатов относительно контрольного варианта в 1.3–1.7 раза.

Выявлено, что в I ротацию севооборота даже при внесении высоких доз НРК в почве (0–20 см) не наблюдали достоверного повышения $P_{\text{подв}}$, так как в почве происходило его быстрое закрепление. Увеличение содержания $P_{\text{подв}}$ фиксировали со II–IV ротаций севооборота, скорость и интенсивность накопления зависели от сочетания суперфосфата с азотными и калийными удобрениями, а также дозы удобрений. Рост количества $P_{\text{подв}}$ с I ротации севооборота, наблюдали только при внесении суперфосфата в чистом виде.

Отмечено, что калий хлористый влиял на миграцию фосфора из удобрений по профилю и/или трансформацию соединений фосфора в почве. Содержание $P_{\text{подв}}$ в почве было достоверно выше контрольного варианта при длительном применении N90P90 только в слое 0–20 см, P90 – в слое 0–60 см, N90P90K90 – в слое 0–80 см и P90K90 – в слое 0–100 см. При рассмотрении возрастающих доз полного минерального удобрения установлено, что достоверное увеличение содержания $P_{\text{подв}}$ по профилю почвы (слой 0–80 см) наблюдали при внесении (НРК)90–150. При применении невысоких доз (НРК)30–60 основные изменения отмечены в пахотном слое почвы.

Длительное применение азотных и калийных удобрений (N90, K90, N90K90) с течением времени привело к увеличению в пахотном слое почвы

содержания подвижных соединений фосфора. Возможно, долговременное использование данных видов удобрений влияет на трансформацию минералов почвы, что приводит к росту подвижных соединений фосфора. Также возможен перенос фосфора растениями и его потребление из нижележащих слоев. Применение азотных удобрений и их сочетание с калием хлористым привело к обеднению подвижными соединениями фосфора пахотного слоя.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено в рамках государственного задания № FUUS-2024-0047.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

В данной работе отсутствуют исследования человека или животных.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии у них конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агроклиматические ресурсы Пермской области: справочник. М.: Гидрометеиздат, 1979. 156 с.
2. Андрианов С.Н. Формирование фосфатного режима дерново-подзолистой почвы в разных системах удобрений. М.: ВНИИА, 2004. 296 с.
3. Афанасьев Р.А., Мерзлая Г.Е. Динамика подвижных форм фосфора и калия в почвах длительных опытов // Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук. 2013. № 3. С. 30–33.
4. Бойко В.С., Гавар С.П., Морозова Е.Н., Тимохин А.Ю. Фосфатный режим длительно орошаемой лугово-черноземной почвы в лесостепи Западной Сибири // Агрохимия. 2015. № 3. С. 10–16.
5. Васбиева М.Т., Завьялова Н.Е. Фосфатный режим дерново-подзолистой почвы естественных и агрофитоценозов // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2021. № 107. С. 92–115. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2021-107-92-115>
6. Водяницкий Ю.Н., Макаров М.И. Хлорорганические соединения и биогеохимический цикл хлора в почвах (обзор) // Почвоведение. 2017. № 9. С. 1065–1073. <https://doi.org/10.7868/S0032180X17090118>
7. Волынкина О.В. Баланс питательных веществ на посевах сельскохозяйственных культур // Плодородие. 2020. № 4(115). С. 13–16. <https://doi.org/10.25680/S19948603.2020.115.04>
8. Дербенева Л.В. Фосфатный и калийный режим дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почвы

- при длительном применении удобрений в Предуралье. Автореф. дис. ... канд. с./х. наук. М., 1994. 19 с.
9. Дзюин А.Г. Фосфатный режим дерново-подзолистых почв Северо-Восточной зоны Нечерноземья. Ижевск: ИжГСХА, 2020. 207 с.
 10. Жарикова Е.А., Бурдуковский М.Л., Голодная О.М. Агрохимические параметры плодородия пахотных луговых дифференцированных почв Приморского края в условиях длительного сельскохозяйственного использования // Агрохимия. 2023. № 2. С. 3–9. <https://doi.org/10.31857/S0002188123020138>
 11. Завьялова Н.Е., Васбиева 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>
 12. Кайгородов А.Т., Пискунова Н.И. Современное состояние почвенного плодородия пахотных земель Пермского края // Достижения науки и техники АПК. 2017. № 4. С. 22–26.
 13. Калинин А.И. Агроэкологические свойства дерново-подзолистых почв и продуктивность растений. Киров, 2004. 220 с.
 14. Кириллова Г.Б., Жуков Ю.П. Изменение фосфатного режима дерново-подзолистой суглинистой почвы при сельскохозяйственном использовании // Агрохимия. 2004. № 9. С. 26–31.
 15. Козлова Н.В., Керимзаде В.В. Фосфатный статус почв при длительном применении и после отмены минеральных удобрений в чайных агроценозах влажных субтропиков России // Агрохимический вестник. 2023. № 5. С. 60–67. <https://doi.org/10.24412/1029-2551-2023-5-011>
 16. Косолапова А.И., Завьялова Н.Е., Митрофанова Е.М., Васбиева М.Т., Ямалтдинова В.Р., Фомин Д.С., Тетерлев И.С. Эффективность длительного применения удобрений на дерново-подзолистых почвах Предуралья // Агрохимия. 2018. № 2. С. 42–55. <https://doi.org/10.7868/S0002188118020047>
 17. Красницкий В.М., Шмидт А.Г., Матвейчик О.А., Бобренко И.А. Динамика подвижного фосфора в почвах лесостепи Западной Сибири // Плодородие. 2020. № 2. С. 57–60. <https://doi.org/10.25680/S19948603.2020.113.17>
 18. Кудярова А.Ю. Изменения в системе химических связей гиббсита под воздействием растворов $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ разной концентрации // Почвоведение. 2016. № 5. С. 564–573. <https://doi.org/10.7868/S0032180X16050105>
 19. Кудярова А.Ю., Алексеева Т.В. Трансформация соединений Al и Fe при зафосфачивании кислых почв как фактор, определяющий миграцию фосфора // Агрохимия. 2012. № 2. С. 25–36.
 20. Минеев В.Г., Гомонова Н.Ф. Значение фосфора в улучшении свойств дерново-подзолистой почвы при действии и последствии длительного применения минеральных удобрений // Проблемы агрохимии и экологии. 2009. № 2. С. 3–9.
 21. Наумченко Е.Т., Разумова К.Ю. Степень агрогенного воздействия на фосфатный режим луговой черноземовидной почвы // Плодородие. 2022. № 2(125). С. 40–43. <https://doi.org/10.25680/S19948603.2022.125.10>
 22. Нефедьева В.В., Варламова Л.Д. Фосфатный режим светло-серой лесной легкосуглинистой почвы в условиях длительного применения удобрений // Проблемы агрохимии и экологии. 2014. № 2. С. 29–33.
 23. Носко Б.С., Христенко А.А. Влияние состава и свойств почв на результаты определения содержания подвижного фосфора химическими методами // Агрохимия. 1996. № 4. С. 86–94.
 24. Рогова О.Б., Колобова Н.А., Иванов А.Л. Сорбционная способность серой лесной почвы в отношении фосфора в зависимости от системы удобрения // Почвоведение. 2018. № 5. С. 573–579. <https://doi.org/10.7868/S0032180X18050064>
 25. Сычев В.Г., Кирпичников Н.А. Приемы оптимизации фосфатного режима почв в агротехнологиях. М.: ВНИИА, 2009. 176 с.
 26. Сычев В.Г., Шафран С.А., Виноградова С.Б. Плодородие почв России и пути его регулирования // Агрохимия. 2020. № 6. С. 3–13. <https://doi.org/10.31857/S0002188120060125>
 27. Титова В.И. Фосфор в земледелие Нижегородской области. Нижний Новгород: Волго-Вятская академия государственной службы, 2005. 219 с.
 28. Трофимов С.Н., Коваленко А.А. Фосфатное состояние и изменение плодородия дерново-подзолистой почвы в длительных полевых опытах // Агрохимия. 2017. № 8. С. 3–15. <https://doi.org/10.7868/S0002188117080014>
 29. Цветнов Е.В., Цветнова О.Б., Макаров О.А., Марихова Н.А. Проблемы оценки нейтрального баланса деградации земель на уровне региона Российской Федерации // Земледелие. 2020. № 2. С. 3–6. <https://doi.org/10.24411/0044-3913-2020-10201>
 30. Чижикова Н.П., Годунова Е.И., Кубашев С.К. Изменение глинистых минералов в черноземах слитых глинистых под влиянием веществ различной природы в условиях модельного // Почвоведение. 2008. № 10. С. 1268–1278.
 31. Шаповалова 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(102). С. 25–31. <https://doi.org/10.25680/s19948603.2018.102.08>

32. Шустикова Е.П., Шаповалова Н.Н. Азотный режим чернозема обыкновенного и продуктивность сельскохозяйственных культур в последствии различных доз азотных удобрений // *Агрохимия*. 2014. № 2. С. 20–25.
33. Brogowski Z., Chojnicki J. Distribution of phosphorus in granulometric fractions of cambisol developed from morainic loam // *J. Elementology*. 2020. V. 25. P. 181–191.
<https://doi.org/10.5601/jelem.2019.24.3.1902>
34. Ciapparelli I.C., de Iorio A.F., Garcia A.R. Phosphorus downward movement in soil highly charged with cattle manure // *Environ. Earth Sci.* 2016. V. 75. P. 568.
<https://doi.org/10.1007/s12665-016-5284-3>
35. Fresne M., Jordan P., Fenton O., Mellander P.E., Daly K. Soil chemical and fertilizer influences on soluble and medium-sized colloidal phosphorus in agricultural soils // *Sci. Total Environ.* 2021. V. 754. P. 142112.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142112>
36. Szara E., Sosulski T., Szymanska M. Soil phosphorus sorption properties in different fertilization systems // *Plant Soil Environ.* 2019. V. 65. P. 78–82.
<https://doi.org/10.17221/696/2018-PSE>

The Effect of Long-Term Use of Nitrogen, Phosphorus and Potash Fertilizers on the Content of Forms of Phosphorus Compounds in the Sod-Podzolic Soil of the Urals

M. T. Vashieva^{1, *}, N. E. Zavyalova¹, and D. G. Shishkov¹

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

*e-mail: vashievamt15@gmail.com

The effect of long-term use of mineral fertilizers on changes in the content of total phosphorus, its organic, mineral and mobile compounds in soddy-podzolic heavy loamy soil (Albic Retisol (Abruptic, Aric, Loamic)) was studied. The studies were carried out in a long-term stationary experiment established in the Perm region in 1978. Options – 0 (without fertilizers), N90, P90, K90, N90P90, N90K90, P90K90, N90P90K90, N30P30K30, N60P60K60, N120P120K120, N150P150K150. Ammonium nitrate or urea, double or simple superphosphate and potassium chloride were used in the experiment. It was established that long-term use of superphosphate during five rotations of a field eight-field crop rotation (P90, P90K90, N90P90, N90P90K90) led to a significant increase in the total content of phosphorus in the arable soil layer (0–20 cm), its mineral part by 1.3–1.8 times, mobile connections by 1.9–2.7 times. The use of nitrogen fertilizers (N90, N90K90, N90P90, N90P90K90) influenced the accumulation of organic phosphorus compounds in the soil. A significant increase in the soil content and reserves of both mineral and organic phosphorus compounds was observed only when using complete mineral fertilizer N90P90K90. Different combinations of superphosphate with nitrogen fertilizers and potassium chloride, as well as the dose of fertilizers, influenced the intensity of accumulation of mobile phosphorus compounds in the soil by rotation and changes in its amount along the profile. The application of low doses (NPK) 30–60 led to an increase in mobile phosphorus compounds mainly in the arable soil layer; when higher doses (NPK) 90–150 were used, changes were noted in the 0–80 cm layer. Long-term use of nitrogen and potassium fertilizers over time led to an increase in mobile phosphorus compounds in the arable soil layer.

Keywords: long-term experience, mineral fertilizers, phosphorus balance, mobile phosphorus, organic and mineral phosphorus