

ИЗМЕНЕНИЕ ФРАКЦИОННОГО СОСТАВА МИНЕРАЛЬНЫХ ФОСФАТОВ, СОДЕРЖАНИЯ ПОДВИЖНОГО ФОСФОРА И СТЕПЕНИ ПОДВИЖНОСТИ ФОСФАТОВ ПО ПРОФИЛЮ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЫ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ ПРИМЕНЕНИИ УДОБРЕНИЙ

© 2021 г. М. Т. Васбиева

Пермский научно-исследовательский институт сельского хозяйства
Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН
614532 с. Лобаново, Пермский район, Пермский край, ул. Культуры, 12, Россия

E-mail: vasbievamt15@gmail.com

Поступила в редакцию 23.10.2020 г.

После доработки 03.03.2021 г.

Принята к публикации 10.04.2021 г.

Изучено влияние применения органических (навоз КРС, осадки сточных вод (ОСВ)) и минеральных удобрений на фракционный состав минеральных фосфатов (метод Гинзбург–Лебедевой), содержание подвижного фосфора и степень подвижности фосфатов в дерново-подзолистой тяжело-суглинистой почве. Исследования проведены в условиях длительного стационарного опыта, заложенного в 1976 г., в 1-метровом слое почвы. Установлено, что внесение ОСВ достоверно повысило в пахотном горизонте почвы содержание всех фракций фосфатов в 1.2–1.6 раза. Увеличение содержания фосфатов кальция наблюдали до глубины 80 см, содержания алюмо- и железосоединений – до 100 см. Применение навоза КРС в меньшей степени повлияло на минеральный состав фосфатов, чем ОСВ. Внесение НРК в течение 5-ти ротаций полевого 7-польного севооборота повысило в пахотном горизонте почвы содержание всех групп минеральных фосфатов в 1.4–3.6 раза. Отмечено увеличение фосфатов кальция по всему 1-метровому слою почвы, содержания Fe-P – в слое 0–40 см. Содержание Al-P с глубиной снизилось на 27–32%. Длительное внесение органических и минеральных удобрений оказало положительное влияние на содержание в почве подвижного фосфора и степень подвижности фосфатов. Отмечено существенное увеличение запасов подвижного фосфора в пахотном горизонте почвы и 1-метровом слое.

Ключевые слова: дерново-подзолистая почва, фракционный состав, минеральные фосфаты, подвижный фосфор, степень подвижности фосфатов, навоз, осадки сточных вод, минеральные удобрения.

DOI: 10.31857/S0002188121070115

ВВЕДЕНИЕ

Фосфор является одним из наиболее важных и дефицитных элементов минерального питания растений. Хорошая обеспеченность фосфором при оптимальном соотношении с другими макро- и микроэлементами способствует получению высоких урожаев сельскохозяйственных культур и улучшению качества продукции. Недостаток доступных растениям форм фосфора в мире наблюдается на половине площадей почв сельскохозяйственного назначения на фоне истощения легкодоступных месторождений этого элемента [1, 2]. В Пермском крае, по данным государственного центра агрохимической службы “Пермский”, в 2019 г. площадь пахотных угодий с содержанием

подвижного фосфора <100 мг/кг составила 67% (очень низкое и низкое содержание (<50 мг/кг) – 34%, среднее (50–100 мг/кг) – 33%). Средневзвешенная обеспеченность фосфором >100 мг/кг отмечена только в 9-ти из 33-х районов края [3]. С 1996 г. в некоторых районах произошло уменьшение доли пашни с высоким и очень высоким содержанием в почве фосфора в 1.5–2.0 раза [4]. В отличие от азота в природе не существует естественных источников пополнения запаса фосфора в почве. Поэтому основной путь поддержания оптимального питания растений фосфором – внесение минеральных и органических удобрений. За последние 10 лет в Пермском крае насыщенность пашни органическими удобрениями

Таблица 1. Агрохимическая характеристика *ОСВ* и навоза (усредненные данные)

Удобрение	Влажность, %	рН _{KCl}	C _{орг}	N _{общ}	P _{общ}	K _{общ}
			% от абсолютно сухого вещества			
<i>ОСВ</i>	68	6.5	64	1.5	3.1	0.5
Навоз	72	7.3	73	1.5	2.2	1.0

составила 1.1 т/га, минеральными – 12.1 кг д.в., из них на долю фосфора пришлось от 20 (под зерновые) до 30% (под картофель). По сравнению с 1980–1990 гг. применение минеральных удобрений снизилось в 8–9 раз, органических – в 3–4 раза, объемы фосфоритования уменьшились в 21 раз.

Систематическое изучение применения удобрений в длительных стационарных опытах позволяет разработать механизм их рационального применения и обеспечить сохранение почвы, ее основных свойств как особого природного тела, имеющего исключительно важное значение в поддержании жизни на Земле.

Природные запасы фосфора в почве и их распределение по профилю определяется содержанием фосфора в материнской породе и характером почвообразовательного процесса. Фосфор уникален по количеству форм и соединений, в виде которых он содержится в почве. Процессы, происходящие между внесением удобрений и образованием конечных продуктов, зависят от множества факторов. Охарактеризовать фосфатный режим почвы в полной степени позволяет определение фракционного состава минеральных фосфатов, который отражает генетические особенности почвы и влияние длительного внесения удобрений на закрепление остаточных фосфатов минеральной частью почвы [5–7].

Цель работы – изучение группового состава минеральных фосфатов, содержания подвижного фосфора и степени подвижности фосфатов дерново-подзолистой почвы Предуралья по профилю и оценка степени влияния длительного применения удобрений на процессы накопления, миграции и трансформации соединений фосфора в почве.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводили на базе длительного стационарного опыта, заложенного в 1976 г. Схема опыта, варианты: 1 – контроль, 2 – навоз КРС, 3 – осадок сточных вод (*ОСВ*), 4 – НРК (фон), 5 – фон + навоз, 6 – фон + *ОСВ*. Почва опытного участка – дерново-мелкоподзолистая тяжелосуглинистая. Агрохимическая характеристика поч-

вы на момент закладки опыта была следующей: C_{орг} – 1.28%, рН_{KCl} – 4.8, H_f – 3.7 и S – 18.1 смоль(экв)/кг, подвижный P₂O₅ и обменный K₂O (по Кирсанову) – 154 и 170 мг/кг.

Наблюдения проводили в полевом 7-польном севообороте с чередованием культур: чистый или занятый пар – озимая рожь – яровая пшеница с подсевом клевера – клевер 1-го года пользования (г.п.) – клевер 2-го г.п. – ячмень – овес. Органические удобрения вносили 1 раз в ротацию севооборота в пару. Осадки сточных вод натуральной влажности вносили в течение 1–5-й ротаций (1–2-я ротация – по 20 т/га, 3–5-я ротации – по 40 т/га). Вариант с навозом 40 т/га был введен с 3-й ротации севооборота. Минеральные удобрения (1-я ротация – N120P120K120, 2-я ротация – N90P90K90, 3–5-я ротации – N60P60K60) вносили под все зерновые культуры севооборота под предпосевную культивацию в виде N_{аа} или N_м, P_с, P_{сд} и K_х. Повторность вариантов в опыте трехкратная, расположение делянок систематическое. Общая площадь делянки 47.5 м². В опыте использовали *ОСВ* биологических очистных сооружений г. Перми. Агрохимическая характеристика *ОСВ* и навоза представлена в табл. 1. *ОСВ*, примененный в опыте, по агрохимическим показателям и содержанию ТМ соответствовал требованиям ГОСТ Р. 17.4.3.07-2001. *ОСВ* применяли после выдержки на иловых площадках не менее 3-х лет, в результате чего происходило его обеззараживание, и он соответствовал требуемым микробиологическим и паразитологическим показателям (СанПиН 2.1.7.573-96).

Для выполнения поставленной цели в конце 5-й ротации (2012–2013 гг.) осенью был проведен отбор почвенных образцов в 1-метровом слое почвы по слоям 0–20, 20–40, 40–60, 60–80, 80–100 см. Групповой состав фосфатов почвы определяли по Гинзбург–Лебедевой [8], подвижный фосфор – по Кирсанову [9], степень подвижности фосфатов – по Карпинскому и Замятиной [10]. Лабораторные исследования проводили в воздушно-сухих образцах почвы. Статистическую обработку данных проводили, используя дисперсионный и корреляционный анализы.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Метод Гинзбург–Лебедевой позволяет выделить 5 фракций минеральных почвенных фосфатов: Al-P, Fe-P и 3 фракции фосфатов кальция (Ca-P_I, Ca-P_{II}, Ca-P_{III}), различающихся по основности, степени окристаллизованности и, следовательно, по растворимости и доступности растениям: Ca-P_I – фосфаты щелочных и щелочноземельных металлов, аммония, Ca-P_{II} – разноосновные фосфаты кальция (магния), Ca-P_{III} – труднорастворимые высокоосновные фосфаты кальция типа апатита. Выделение из почвы отдельных минеральных форм фосфора, различающихся по химическому составу, растворимости и доступности растениям, позволяет получить представление о соотношении лабильных и труднодоступных форм фосфора в почве и предвидеть их превращения [11].

Исследования фракционного состава минеральных фосфатов дерново-подзолистой тяжело-суглинистой почвы показали, что наибольшую долю в составе минеральных фосфатов (контрольный вариант) по всему профилю занимали фосфаты железа (Fe-P) (43–60%), что характерно для почв подзолистого типа (табл. 2). Высокое содержание Fe-P объясняется повышенным содержанием железа в данных почвах [5–7, 11, 12]. Следующей шла фракция высокоосновных фосфатов кальция (Ca-P_{III}) – 17–34%. Фосфаты кальция 2-й группы (Ca-P_{II}) и фосфаты алюминия (Al-P) составили 12–13 и 8–9% от общего содержания минеральных фосфатов. Фосфаты кальция 1-й группы (Ca-P_I), самой доступной для растений, занимали всего 1–2%. Характер распределения каждой фракции по профилю имел свои особенности. Содержание Fe-P и Ca-P_I вниз по профилю почвы снижалось, количество Ca-P_{III} увеличивалось. Содержание Ca-P_{II} и Al-P в 1-метровом слое почвы изменялось незначительно и находилось примерно на одном уровне.

Длительное систематическое применение удобрений привело к существенному изменению долей всех групп минеральных фосфатов. Внесение органических удобрений (навоз КРС, ОСВ) повысило содержание наиболее доступных для растений групп Ca-P_I и Ca-P_{II}. Положительное действие органических веществ, внесенных с удобрениями, на увеличение подвижности фосфатов выражается уменьшением сорбции фосфора почвами, а также мобилизацией фосфора из труднорастворимых соединений [13–16]. Кроме этого, поступление в почву органических удобрений обеспечивает нормальное функционирование почвенных микроорганизмов, что является

Таблица 2. Влияние длительного применения удобрений на содержание фракций минеральных фосфатов дерново-подзолистой почвы, мг/кг

Вариант	Слой почвы, см				
	0–20	20–40	40–60	60–80	80–100
Ca-P _I					
Контроль	26	21	18	13	15
Навоз	43	19	14	12	9
ОСВ	42	30	15	13	14
НРК (фон)	95	68	85	87	80
Фон + навоз	184	90	77	82	75
Фон + ОСВ	228	159	144	92	80
НСР ₀₅	12	5	5	2	4
Ca-P _{II}					
Контроль	152	155	156	165	164
Навоз	216	215	210	161	164
ОСВ	185	187	170	167	174
НРК (фон)	241	191	199	190	211
Фон + навоз	186	200	185	189	188
Фон + ОСВ	323	224	213	213	201
НСР ₀₅	8	19	14	6	16
Al-P					
Контроль	116	121	102	101	108
Навоз	138	119	110	106	115
ОСВ	179	156	152	138	140
НРК (фон)	167	123	85	83	77
Фон + навоз	145	84	74	72	73
Фон + ОСВ	185	137	107	105	93
НСР ₀₅	14	6	10	6	10
Fe-P					
Контроль	771	722	596	596	540
Навоз	857	704	642	642	540
ОСВ	991	788	662	641	657
НРК (фон)	1106	1140	493	592	605
Фон + навоз	774	790	606	534	626
Фон + ОСВ	880	761	707	650	700
НСР ₀₅	90	96	24	38	44
Ca-P _{III}					
Контроль	224	260	335	406	422
Навоз	206	254	334	372	441
ОСВ	283	350	395	434	379
НРК (фон)	334	379	452	421	487
Фон + навоз	292	348	392	468	472
Фон + ОСВ	286	313	358	404	470
НСР ₀₅	22	51	43	28	70
Сумма минеральных фосфатов					
Контроль	1290	1280	1210	1280	1250
Навоз	1460	1310	1310	1290	1270
ОСВ	1680	1510	1390	1390	1360
НРК (фон)	1940	1900	1310	1370	1460
Фон + навоз	1580	1510	1330	1350	1430
Фон + ОСВ	1900	1590	1530	1460	1540
НСР ₀₅	110	100	100	50	70

важнейшим условием оптимизации фосфатного питания растений [17].

Увеличение содержания Са-Р_I в варианте с навозом наблюдали в пахотном горизонте почвы (в 1.6 раза), в варианте с *ОСВ* – в пахотном и подпахотном слоях почвы (в 1.4–1.6 раза). Достоверное увеличение содержания фракции Са-Р_{II} в результате применения органических удобрений наблюдали до глубины 60 см (в 1.1–1.4 раза).

При внесении *ОСВ* во всем 1-метровом слое повысилось содержание фракций Al-Р (в 1.3–1.5 раза) и Fe-Р (в 1.1–1.3 раза). Применение навоза КРС в меньшей степени повлияло на содержание фосфатов, связанных с полуторными оксидами. Отмечено увеличение содержания Al-Р в пахотном горизонте (в 1.2 раза), Fe-Р – в слоях 0–20, 40–60 и 60–80 см почвы (в 1.1 раза). Внесение *ОСВ* достоверно повысило в почве содержание Са-Р_{III} до глубины 80 см. Применение навоза не оказало существенного влияния на изменение группы высокоосновных фосфатов кальция, либо были отмечены тенденции к снижению содержания данной группы фосфатов в некоторых слоях почвы. Полученные результаты возможно связаны с разным химическим и качественным составом примененных органических удобрений. Минеральная часть осадков представлена в основном соединениями кальция, алюминия, железа и кремния. При внесении *ОСВ* в течение 5-ти ротаций в почву поступило ≈1800 кг фосфора, с навозом в почву было внесено ≈750 кг фосфора.

Общее количество минеральных фосфатов при внесении навоза достоверно возросло только в пахотном слое почвы (на 170 мг/кг или в 1.1 раза), при этом остаточный фосфор удобрения (расчеты проведены разностным методом по сравнению с контрольным вариантом) распределился между следующими фракциями: 46% – Fe-Р, 34% – Са-Р_{II}, 11% – Al-Р и 9% – Са-Р_I. Применение *ОСВ* повысило общее количество минеральных фосфатов во всем профиле: в верхних слоях почвы – на 18–30, в нижних – на 9%. Остаточный фосфор удобрения распределился между следующими фракциями: 28–74% – Fe-Р, 15–39% – Са-Р_{III}, 15–33% – Al-Р, 2–14% – Са-Р_{II} и 1–4% – Са-Р_I (в среднем в горизонтах: 47% – Fe-Р, по 22% Са-Р_{III} и Al-Р, 8% – Са-Р_{II} и 1% – Са-Р_I).

Внесение NPK в течение 5-ти ротаций полевого 7-польного севооборота (1-я ротация – N120P120K120, 2-я ротация – N90P90K90, 3–5-я ротации – N60P60K60) достоверно повысило содержание в почве фракций фосфатов, связанных с кальцием во всем 1-метровом слое: Са-Р_I – в 3.2–6.8 раза, Са-Р_{II} – в 1.2–1.6 раза, Са-Р_{III} – в

1.2–1.5 раза. Наиболее существенное увеличение отмечено для Са-Р_I, их доля в составе минеральных фосфатов возросла с 1–2% (контрольный вариант) до 4–6%. Содержание Al-Р возросло в верхнем слое (0–20 см) почвы, а затем было отмечено снижение содержания данной группы минеральных фосфатов до глубины 100 см. Количество Fe-Р существенно возросло в пахотном и подпахотном слоях почвы (в 1.4–1.6 раза). В слое 0–40 см почвы остаточные фосфаты закрепились в большей степени в виде Fe-Р и Са-Р_{III}, в слое 40–100 см – в виде всех 3-х групп Са-Р. Сумма минеральных фосфатов возросла во всем 1-метровом профиле, максимальное увеличение отмечено в пахотном и подпахотном слоях на 621–654 мг/кг (на 49–51%).

Результаты наших исследований по влиянию минеральных удобрений на фосфатный режим почвы несколько отличаются от результатов других авторов и больше сопоставимы для пахотного слоя почвы. По данным работ [6, 18–20], при длительном внесении фосфорных удобрений как с известкованием, так и без него, остаточный фосфор удобрений в большей степени превращался в фосфаты оксидов железа и алюминия в результате подкисления почвы, тогда как регулярное применение навоза создавало условия для образования высокоосновных фосфатов кальция. В работах [6, 21, 22] отмечали, что внесение водорастворимых фосфорных удобрений обеспечило увеличение доли фосфатов алюминия. Возможно, полученные нами результаты связаны с генетическими особенностями почвы. Почвообразующей породой является 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, как и сумма поглощенных оснований, увеличивается с глубиной. По данным [11], в почвах с высокой насыщенностью основаниями большая часть внесенного фосфора переходит во фракцию Са-Р. Другой причиной может являться временной фактор (опубликованные исследования проводили на различных агрохимических фонах, сложившихся во времени).

Устойчивость различных минеральных соединений фосфора (ортофосфатов Са, Al, Fe) в значительной степени зависит от почвенных условий, в частности, от величины кислотности почвенного раствора. Установлено, что фосфаты кальция наиболее устойчивы в условиях щелочной или близкой к нейтральной реакции среды, а растворимость этих соединений увеличивается с ее подкислением [5–7]. Длительное применение

минеральных удобрений в условиях нашего длительного стационарного опыта привело к существенному подкислению почвы во всем 1-метровом профиле [23], что также могло повлиять на увеличение в этом варианте содержания фосфатов, связанных с кальцием.

Применение навоза КРС при применении минеральных удобрений оказало существенное влияние на изменение содержания фракции Са-Р_I. Отмечено увеличение самой доступной для растений фракции фосфора, связанной с щелочными и щелочноземельными металлами, в слое 0–20 см почвы в 1.9 раза, в слое 20–40 см – в 1.3 раза по сравнению с вариантом внесения минеральных удобрений. Внесение *ОСВ* совместно с минеральными удобрениями достоверно повысило содержание в почве Са-Р_I и Са-Р_{II}. Изменения отмечены до глубины 80 см. Содержание Са-Р_I возросло в 1.1–2.4 раза, Са-Р_{II} – в 1.1–1.3 раза. Максимальное накопление отмечено в пахотном и подпахотном слоях почвы.

Применение разных видов органических удобрений (навоза, *ОСВ*) в сочетании с минеральными по-разному сказалось на закреплении остаточных фосфатов. При совместном внесении навоза и НРК остаточные фосфаты закрепились в виде групп Са-Р (Са-Р_I – 30–54%, Са-Р_{II} – 13–23% и Са-Р_{III} – 27–45%). Сочетание *ОСВ* и минеральных удобрений привело в большей степени к закреплению фосфатов в группах Са-Р_I (22–44%), Са-Р_{II} (13–28%) и Al-Р (12–54%).

Длительное применение удобрений привело к существенному увеличению в дерново-подзолистой почве доли подвижных фракций фосфатов (суммы Са-Р_I и Са-Р_{II}) с 14 (контрольный вариант) до 17–29%. Полученные результаты подтверждены исследованиями других авторов [6, 11, 24]. При внесении минеральных удобрений и совместном применении органических и минеральных отмечено увеличение доли подвижных фосфатов в 1-метровом слое почвы, при внесении навоза – до глубины 60 см.

Об особенностях фосфатного режима почв можно судить по соотношению суммы фосфатов кальция Са-Р_I + Са-Р_{II} и суммы фосфатов полуторных оксидов (Al-Р + Fe-Р). Чем больше эта величина, тем доступнее фосфор растениям [25]. По нашим данным, величина соотношения в контрольном варианте пахотного горизонта составила 0.20 и увеличивалась вниз по профилю до 0.28. Длительное внесение навоза, минеральных удобрений повысило это соотношение в пахотном горизонте почвы до 0.26, применение органо-минеральной системы

удобрения (навоз + НРК, *ОСВ* + НРК) обеспечило увеличение величины соотношения до 0.40–0.52. При внесении минеральных удобрений в чистом виде и их сочетании с органическим наблюдали повышение данного соотношения во всем метровом профиле, в варианте с навозом – до глубины 60 см. В варианте с *ОСВ* соотношение суммы фосфатов кальция Са-Р_I + Са-Р_{II} и суммы фосфатов Al-Р + Fe-Р сохранилось на уровне контроля во всех слоях почвы.

Установлена прямая сильная и средняя корреляционная зависимость фракций Са-Р_I, Са-Р_{II} и Al-Р с содержанием органического углерода в почве как в пахотном горизонте почвы, так и в метровом слое ($r = 0.5–0.9$) (табл. 3). Отмечена обратная связь содержания фосфатов кальция 1-й и 2-й группы с кислотностью почвы ($r = 0.6–0.8$).

Изучали влияние длительного применения удобрений на содержание подвижного фосфора в почве и степень подвижности фосфатов (рис. 1). Содержание подвижного фосфора в контрольном варианте увеличивалось вниз по профилю со 126 (0–20 см) до 305 мг/кг (80–100 см). Количество подвижного фосфора в пахотном горизонте соответствовало повышенному уровню – 100–150 мг/кг. Известно, что внесение удобрений в первую очередь увеличивает содержание подвижных, доступных для растений форм фосфора в почве [26, 27], что подтвердили результаты и наших исследований. Внесение *ОСВ* существенно повысило содержание подвижного фосфора в почве до глубины 60 см (на 66–130 мг/кг), с увеличением глубины степень влияния *ОСВ* снижалась. Содержание подвижного фосфора в пахотном горизонте составило 233 мг/кг, что соответствовало высокому уровню (150–250 мг/кг). Запасы подвижного фосфора в пахотном слое почвы увеличились с 0.3 (контрольный вариант) до 0.6, в 1-метровом слое – с 3.1 до 3.9 т/га.

Осадки сточных вод содержат значительное количество фосфора и поэтому их можно рассматривать как возможный альтернативный источник данного элемента [28–31]. При правильном выборе доз *ОСВ* длительное время могут обеспечивать бездефицитный баланс фосфорного питания [28, 32, 33]. Содержание общего фосфора в сухой массе *ОСВ* может достигать 8%. Доступность фосфора в различных осадках не одинакова. Доля биологически и химически связанного фосфора зависит от технологий, применяемых на очистных сооружениях и вида *ОСВ*. По данным [34], во вторичном и сброженном иле фосфор был на 92 и 63% представлен минеральной формой, в первичном иле – на 72% органической формой.

Таблица 3. Закономерности изменения фосфатного режима в зависимости от агрохимических свойств почвы (коэффициент корреляции)

Показатель	$C_{орг}, \%$		pH_{KCl}		S		V		$P_2O_5, \text{мг/кг}$	
	слой почвы, см									
	0–20	0–100	0–20	0–100	0–20	0–100	0–20	0–100	0–20	0–100
Ca-P _I , мг/кг	0.9	0.6	–0.8	–0.7	0.1*	–0.4	–0.7	–0.5	0.9	0.6
Ca-P _{II} , мг/кг	0.7	0.5	–0.6	–0.6	0.0*	–0.4	–0.5	–0.5	0.7	0.4
Al-P, мг/кг	0.6	0.7	–0.4*	0.0*	0.6	–0.6	–0.2*	–0.6	0.7	–0.2*
Fe-P, мг/кг	–0.2*	0.7	–0.2*	–0.5	0.5	–0.7	–0.1*	–0.8	0.3	–0.1*
Ca-P _{III} , мг/кг	0.3*	–0.7	–0.7	0.1*	0.6	0.8	–0.7	0.7	0.8	0.6
Сумма минеральных фосфатов, мг/кг	0.5	0.7	–0.7	–0.6	0.5	–0.6	–0.6	–0.7	0.8	0.4
P_2O_5 , мг/кг	0.8	–0.1*	–0.8	–0.4	0.4*	0.2*	–0.8	0.1*	–	–
Степень подвижности фосфатов, мг/л	0.9	0.7	–0.8	–0.5	0.0*	–0.5	–0.8	–0.6	0.9	0.4

*Несущественно.

Содержание биодоступного фосфора было больше во вторичном и сброженном иле в 3–4 раза, чем в первичном. В работе [35] отмечено, что в сырых *ОСВ* фосфор более доступен для растений, чем после его подсушивания на иловых картах. Извлечение фосфорных соединений из *ОСВ* является предметом многочисленных научных исследований, разработано множество технологий (окисление озоном, химическое осаждение, нанофильтрация, термическая обработка, ультразвуковое растворение и др.). В статье [36] представлен способ низкотемпературной обработки *ОСВ* при различном насыщении кислородом (20, 60, 100%), который обеспечивает увеличение общего содержания фосфора в зольном остатке на 45.6%, повышение биодоступности фосфора в 3 раза. Исследования [37] показали, что при извлечении фосфора из *ОСВ* эффективно применение нанофильтрации. После кислотного растворения *ОСВ* и фильтрации на специально разработанной мембране извлекали до 90% от исходного содержания фосфора. Однако, учитывая их сложность и высокую стоимость, большинство технологий были протестированы только в лабораторных условиях или существуют в качестве пилотных проектов [30, 31].

При внесении навоза отмечены только тенденции к повышению содержания подвижного фосфора в почве в пахотном и подпахотном слоях на 32–40 мг/кг. Запасы подвижного фосфора в пахотном слое почвы увеличились до 0.4, в 1-метровом слое – до 3.4 т/га.

Важный показатель оценки обеспеченности сельскохозяйственных культур фосфором – степень подвижности фосфатов (концентрация фосфат-ионов, находящихся в почвенном растворе) [10]. По данным [38], минимальная концентрация фосфора, при которой растения могут его усваивать, составляет 0.01–0.03 мг P_2O_5 /л.

Степень подвижности фосфатов в пахотном горизонте дерново-подзолистой почвы контрольного варианта составила 0.03 мг/л, что соответствовало низкому уровню содержания легкодоступного фосфора для растений (<0.04 мг/л). Степень подвижности фосфатов уменьшалась с глубиной и составила 0.01 мг/л в слое 80–100 см. Применение навоза и *ОСВ* достоверно повысило степень подвижности фосфатов только в пахотном слое с 0.03 до 0.06 и до 0.09 мг/л соответственно. В результате почва перешла в разряд средней обеспеченности доступным фосфором для растений.

Длительное внесение минеральных удобрений (всего в почву поступило ≈2 т фосфора) способствовало существенному увеличению в пахотном слое дерново-подзолистой почвы содержания подвижного фосфора до 331 мг/кг (очень высокое содержание >250 мг/кг), его количество увеличилось на 205 мг/кг почвы.

Как указывали в работе [19], несмотря на то что в почве основная часть неиспользованного фосфора минеральных удобрений превращалась со временем в фосфаты оксидов железа и алюминия, в систематически удобряемой почве резко

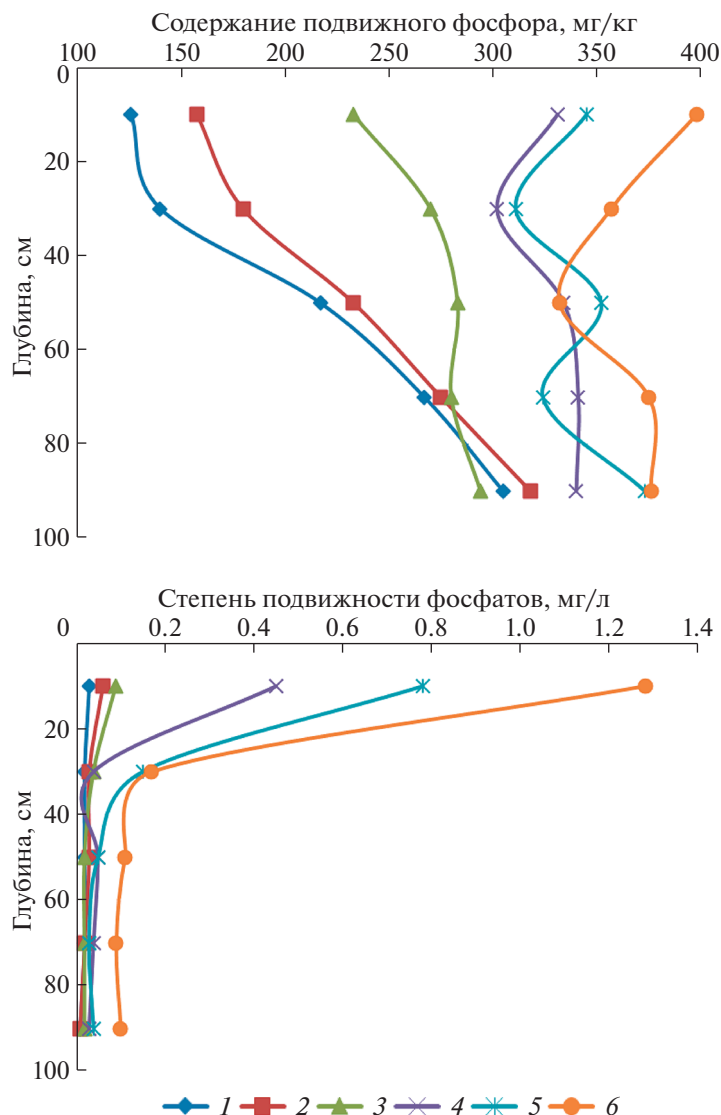


Рис. 1. Влияние длительного применения удобрений на содержание подвижного фосфора и степень подвижности фосфатов дерново-подзолистой почвы. Варианты: 1 – контроль без удобрений, 2 – навоз, 3 – *ОСВ*, 4 – *НРК* – фон, 5 – фон + навоз, 6 – фон + *ОСВ*.

возрастает степень подвижности фосфатов и, следовательно, доступность их для растений. По результатам наших исследований, степень подвижности фосфатов при длительном внесении *НРК* возросла в 15 раз (до 0.45 мг/л), что соответствовало высокому уровню обеспеченности растений легкодоступным фосфором.

Влияние минеральных удобрений на содержание подвижного фосфора и степень подвижности фосфатов наблюдали до глубины 100 см. Запасы подвижного фосфора возросли до 0.8 т/га, в 1-метровом слое – до 4.8 т/га.

Применение органо-минеральной системы удобрения в большей степени оказало влияние на степень подвижности фосфатов, чем содержание

подвижного фосфора. Степень подвижности фосфатов достоверно возросла во всем 1-метровом профиле при совместном внесении минеральных удобрений и *ОСВ* (по сравнению с вариантом минеральных удобрений). Максимальное увеличение отмечено в пахотном слое с 0.45 до 1.28 (в 2.8 раза) и подпахотном – с 0.04 до 0.17 мг/л (в 4.3 раза). Применение навоза совместно с минеральными удобрениями достоверно повысило степень подвижности фосфатов в пахотном и подпахотном слоях до 0.78 и 0.15 мг/л. Содержание подвижного фосфора возросло при совместном внесении минеральных удобрений и *ОСВ* только в верхнем слое (0–20 см) почвы, его количество увеличилось до 398 мг/кг. Дополнительное

применение навоза на фоне применения NPK не оказало существенного влияния на изменение данного показателя. Установлена прямая сильная корреляционная связь между степенью подвижности фосфатов и содержанием подвижного фосфора в пахотном горизонте почвы ($r = 0.9$) и средняя ($r = 0.4$) для 1-метрового слоя.

Результаты длительного стационарного опыта свидетельствовали об изменении фосфатного режима дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почвы в результате применения минеральных удобрений и *ОСВ* до глубины 1 м. В соответствии со сложившимся представлением, фосфор обладает низкой способностью к миграции вследствие быстрой абиотической фиксации фосфора в труднорастворимых минеральных соединениях [5, 7], фосфор слабо передвигается из пахотного слоя в нижележащие слои [39, 40]. Однако есть исследования, которые показали, что фосфор способен к перемещению вниз по профилю, и в первую очередь это связывают с интенсивным и систематическим применением удобрений [41–45]. Миграция фосфора может быть как пассивной (в составе частиц ила, физической глины), так и активной в растворе почвенной влаги [6]. Перемещение фосфора вниз по профилю может быть связано с миграцией органических соединений, с механическим воздействием (обработкой почвы, ростом корневых систем) [21, 43]. В работах [46–48] отмечено, что в кислых почвах при повышенной фосфатной нагрузке образуются соединения фосфора, связанные с железом и алюминием, обладающие повышенной миграционной способностью. По данным [49], анионы фосфорных удобрений (суперфосфата) оказывают разрушающее воздействие на находящиеся с ними в контакте глинистые минералы, происходит деструктирование слоистых силикатов и образование более мобильных металлоорганических соединений фосфора.

ВЫВОДЫ

1. В дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве Предуралья в составе минеральных фосфатов фракция Fe-P занимала 43–60, Ca-P – 31–48, Al-P – 8–9%. В фосфатах кальция 56–70% приходилось на фракцию Ca-P_{III} – труднорастворимых высокоосновных фосфатов типа апатита. Фосфаты кальция первой группы – самой доступной для растений – занимали всего 1–2% от общего количества минеральных фосфатов. Содержание фракций Fe-P и Ca-P_I вниз по профилю почвы снижалось, количество Ca-P_{III} увеличивалось.

Содержание Ca-P_{II} и Al-P изменяется незначительно.

2. Внесение нетрадиционного органического удобрения осадка сточных вод (*ОСВ*) достоверно повысило в пахотном слое почвы содержание всех фракций фосфатов в 1.2–1.6 раза, сумма минеральных фосфатов возросла на 30%. Увеличение количества фосфатов кальция наблюдали до глубины 80 см, содержания алюмо- и железосоединений – до 100 см. Применение *ОСВ* повысило общее количество минеральных фосфатов во всем профиле. Внесение навоза КРС в меньшей степени повлияло на минеральный состав фосфатов. Достоверные изменения отмечены в пахотном слое почвы. Содержание фракций Ca-P_I, Ca-P_{II}, Al-P и Fe-P возросло в 1.1–1.6 раза, количество минеральных фосфатов – на 13%. Полученные результаты в первую очередь обусловлены разным химическим составом изученных органических удобрений. Также следует отметить, что остаточный фосфор удобрения при внесении *ОСВ* в большей степени закрепился в виде Fe-P, Al-P и Ca-P_{III}, при использовании навоза – в виде Fe-P и доступных для растений фракций Ca-P_{II}, Ca-P_I.

3. Длительное внесение NPK повысило в пахотном слое почвы содержание всех групп минеральных фосфатов в 1.4–3.6 раза. Отмечено увеличение содержания фосфатов кальция во всем 1-метровом слое почвы, содержания Fe-P – в слое 0–40 см. Содержание Al-P с глубиной снизилось на 27–32%. В слое 0–40 см почвы остаточные фосфаты закрепились в виде Fe-P и Ca-P_{III}, в слое 40–100 см – в виде всех 3-х групп Ca-P. Применение навоза КРС совместно с минеральными удобрениями существенно повысило содержание в почве фракции Ca-P_I, внесение *ОСВ* – Ca-P_I и Ca-P_{II}. Максимальное увеличение наблюдали в пахотном и подпахотном слоях почвы.

4. Длительное внесение органических и минеральных удобрений оказало положительное влияние на содержание в почве подвижного фосфора и степень подвижности фосфатов. Отмечено увеличение запасов подвижного фосфора в пахотном слое почвы и в 1-метровом слое.

5. При систематическом внесении удобрений в почве происходило существенное накопление остаточного пула фосфора, который может быть потенциально мобилизован с помощью различных технологий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Cramer M.D.* Phosphate as a limiting resource // *Plant Soil*. 2010. V. 334. № 1. С. 10.
<https://doi.org/10.1007/s11104-010-0497-9>
2. *Богдевич И.М., Путятин Ю.В., Станилевич И.С., Ломонос О.Л.* Изменение обеспеченности фосфором пахотных и луговых почв Беларуси // *Почвовед. и агрохим.* 2019. № 2. С. 68–78.
3. *Кайгородов А.Т., Пискунова Н.И.* Современное состояние почвенного плодородия пахотных земель Пермского края // *Достиж. науки и техн. АПК*. 2017. Т. 31. № 4. С. 22–26.
4. *Мудрых Н.М.* Динамика агрохимических показателей плодородия пахотных почв Пермского края // *Рос. журн. прикл. экол.* 2019. № 2. С. 27–31.
5. *Андрианов С.Н.* Формирование фосфатного режима дерново-подзолистой почвы в разных системах удобрений. М.: ВНИИА, 2004. 296 с.
6. *Титова В.И., Шафранов О.Д., Варламова Л.Д.* Фосфор в земледелии Нижегородской области. Н. Новгород: ВВАГС, 2005. 219 с.
7. *Сычёв В.Г., Кирпичников Н.А.* Приемы оптимизации фосфатного режима почв в агротехнологиях. М.: ВНИИА, 2009. 176 с.
8. *Гинзбург К.Е., Лебедева Л.С.* Методика определения минеральных форм фосфатов почвы // *Агрохимия*. 1971. № 1. С. 125–136.
9. Практикум по агрохимии: Учеб. пособ. / Под ред. Минеева В.Г. М.: Изд-во МГУ, 2001. 639 с.
10. *Карпинский Н.П., Замятина В.Б.* Фосфатный уровень почвы // *Почвоведение*. 1958. № 11. С. 27–39.
11. *Гинзбург К.Е.* Фосфор основных типов почв СССР. М.: Наука, 1981. 244 с.
12. *Соколов А.В.* Агрохимия фосфора. М.: Изд-во АН СССР, 1950. 150 с.
13. *Донских И.Н., Копылова Л.А.* Влияние высоких доз органических удобрений на фракционный состав фосфатов в дерново-подзолистых почвах // *Агрохимия*. 1982. № 4. С. 55–63.
14. *Rogova O.B., Kolobova N.A., Ivanov A.L.* Phosphorus sorption capacity of gray forest soil as dependent on fertilization system // *Euras. Soil Sci.* 2018. V. 51. № 5. P. 536–541.
<https://doi.org/10.1134/S1064229318050101>
15. *Menezes-Blackburn D., Giles C., Darch T., George T.S., Blackwell M., Stutter M., Shand C., Lumsdon D., Cooper P., Wendler R.* Opportunities for mobilizing recalcitrant phosphorus from agricultural soils: a review // *Plant and Soil*. 2018. V. 427(1–2). P. 5–16.
<https://doi.org/10.1007/s11104-017-3362-2>
16. *Szara E., Sosulski T., Szymanska M.* Soil phosphorus sorption properties in different fertilization systems // *Plant Soil Environ.* 2019. V. 65(2). P. 78–82.
<https://doi.org/10.17221/696/2018-PSE>
17. *Фокин А.Д., Раджабова П.А.* Биологическая мобилизация фосфора из минеральных соединений // *Изв. ТСХА*. 1994. Вып. 2. С. 72–79.
18. *Никифорова Л.И., Лебединская В.Н.* Формы и подвижность фосфатов в серой оподзоленной почве в связи с длительным применением удобрений // *Агрохимия*. 1983. № 10. С. 89–96.
19. *Хлыстовский А.Д., Князева К.П.* Влияние длительного применения различных форм фосфорных удобрений на фракционный состав минеральных фосфатов дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почвы // *Агрохимия*. 1969. № 6. С. 15–21.
20. *Хлыстовский А.Д., Касицкий Ю.И.* Последствие фосфора, оптимальные фосфатные уровни в дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве и применение фосфорных удобрений // *Агрохимия*. 1987. № 5. С. 10–14.
21. *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.
22. *Лыскова И.В., Рылова О.Н., Веселкова Н.А., Лыскова Т.В.* Влияние удобрений и извести на агрохимические показатели и фосфатный режим дерново-подзолистой среднесуглинистой почвы // *Аграр. наука Евро-Северо-Востока*. 2015. № 2(45). С. 27–31.
23. *Васбиева М.Т.* Изменение агрохимических показателей дерново-подзолистой почвы Предуралья при длительном применении удобрений // *Почвоведение*. 2021. № 1. С. 90–99.
<https://doi.org/10.31857/S0032180X21010135>
24. *Li C.L., Zhang P., Zhang J.J., Zhu P., Wang L.C.* Forms, transformations and availability of phosphorus after 32 years of manure and mineral fertilization in a Mollisol under continuous maize cropping // *Arch. Agron. Soil Sci.* 2020. V. 66. P. 552–558.
<https://doi.org/10.1080/03650340.2020.1787385>
25. *Ubugunov L.L., Merkusheva M.G., Enkhtuyaa B.* The content of available mineral phosphorus compounds in chestnut soils of Northern Mongolia upon application of different forms of phosphorite // *Euras. Soil Sci.* 2015. V. 48. № 6. P. 634–642.
<https://doi.org/10.1134/S1064229315060113>
26. *Касицкий Ю.И.* Общие вопросы установления оптимального содержания подвижного фосфора в почвах // *Агрохимия*. 1988. № 10. С. 129–140.
27. *Минеев В.Г., Гомонова Н.Ф.* Действие и последствие удобрений на плодородие дерново-подзолистой среднесуглинистой почвы // *Агрохимия*. 2005. № 1. С. 5–13.
28. *Пахненко Е.П.* Осадки сточных вод и другие нетрадиционные органические удобрения. М.: БИНОМ, Лаборатория знаний, 2007. 311 с.
29. *Ott C., Rechberger H.* The European phosphorus balance // *Resources, Conservation and Recycling*. 2012. V. 60. P. 159–172.
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.12.007>
30. *Gao M., Qiu L.P., Xie K., Zhang S.B., Wang J.B.* Phosphorus recovery from excess sludge: Possibility and future. Proceedings of the 2015 4th International conference on sustainable energy and environmental engineering // *Adv. Engin. Res.* 2016. V. 53. P. 488–491.
31. *Kecskesova S., Imreova Z., Kozarova B., Drtil M.* Phosphorus recovery from the sewage sludge and sewage sludge ash // *Chemicke listy*. 2020. V. 114. № 5. P. 341–348.
32. Стратегия использования осадков сточных вод и компостов на их основе в агрокультуре / Под ред. Милащенко Н.З. М.: Агроконсалт, 2002. 140 с.
33. *Vasbieva M.T., Kosolapova A.I.* Changes in fertility parameters and contents of heavy metals of soddy-podzolic soils upon the long-term application of sewage

- sludge // *Euras. Soil Sci.* 2015. V. 49. P. 518–523.
<https://doi.org/10.1134/S1064229315030138>
34. Zhang S.X., Cui W.Z., Liu D.F., Huang W.L. Identification of phosphorus species and bio-availability in primary, secondary and digested sludge // *Appl. Ecol. Environ. Res.* 2019. V. 17. Is. 6. P. 14391–14402.
https://doi.org/10.15666/aecr/1706_1439114402
 35. Покровская С.Ф., Касатиков В.А. Использование осадков городских сточных вод в сельском хозяйстве. М.: ВНИИТЭИ агропром, 1987. 56 с.
 36. Meng X.D., Huang Q.X., Gao H.P., Tay K.R., Yan J.H. Improved utilization of phosphorous from sewage sludge (as fertilizer) after treatment by low-temperature combustion // *Waste Manag.* V. 80. P. 349–358.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.09.034>
 37. Thong Z.W., Cui Y., Ong Y.K., Chung T.S. Molecular design of nanofiltration membranes for the recovery of phosphorus from sewage sludge // *ACS Sustain. Chem. Engin.* 2016. V. 4(10). P. 5570–5577.
<https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.6b01299>
 38. Клечковский В.М. Об усвоении растениями поглощенных почвой фосфатов // Докл. ТСХА. 1945. № 11. С. 11–14.
 39. Афанасьев Р.А., Мёрзлая Г.Е. Динамика подвижных форм фосфора и калия в почвах длительных опытов // Докл. РАСХН. 2013. № 3. С. 30–33.
 40. Brogowski Z., Chojnicki J. Distribution of phosphorus in granulometric fractions of cambisol developed from morainic loam // *J. Elementol.* 2020. V. 25. Is. 1. P. 181–191.
<https://doi.org/10.5601/jelem.2019.24.3.1902>
 41. 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. Is. 7. № P. 568.
<https://doi.org/10.1007/s12665-016-5284-3>
 42. 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.
 43. 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.
 44. Кириллова Г.Б., Жуков Ю.П. Изменение фосфатного режима дерново-подзолистой суглинистой почвы при сельскохозяйственном использовании // *Агрохимия.* 2004. № 9. С. 26–31.
 45. Минеев В.Г., Гомонова Н.Ф. Значение фосфора в улучшении свойств дерново-подзолистой почвы при действии и последствии длительного применения минеральных удобрений // *Пробл. агрохим. и экол.* 2009. № 2. С. 3–9.
 46. Кудеярова 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.
 47. Kudeyarova A.Yu. Changes in the system of chemical bonds in gibbsite under the impact of $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ solutions of different concentrations // *Euras. Soil Sci.* 2016. V. 49. P. 519–528.
<https://doi.org/10.1134/S1064229316050094>
 48. Аргунова В.А. Исследование форм и миграции фосфора в подзолистых почвах: Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. М., 1974. 18 с.
 49. Chizhikova N.P., Godunova E.I., Kubashev S.K. Changes in clay minerals of vertic chernozems under the impact of different ameliorants in a model experiment // *Euras. Soil Sci.* 2008. V. 41. P. 1124–1134.
<https://doi.org/10.1134/S1064229308100153>

Changes in the Fractional Composition of Mineral Phosphates, Content of Mobile Phosphorus and Degree of Mobility of Phosphates along the Profile of Sod-Podzolic Soil of Long-Term Application of Fertilizers

M. T. Vasbieva

*Perm Agricultural Researcher Institute of Perm Federal Research Center Ural Branch RAS
 ul. Kultury 12, Perm region, Perm district, s. Lobanovo 614532, Russia*

E-mail: vasbievamt@gmail.com

The effect of the use of organic (cattle manure, sewage sludge) and mineral fertilizers was studied on the fractional composition of mineral phosphates (Ginzburg–Lebedeva method), the content of mobile phosphorus, and the degree of mobility of phosphates in sod-podzolic heavy loamy soil. The studies were carried out under conditions of a long-term stationary experiment, laid down in 1976, in a meter layer of soil. The introduction of sewage sludge significantly increased the content of all phosphate fractions in the arable soil horizon by 1.2–1.6 times. An increase in calcium phosphates was observed up to a depth of 80 cm, the content of aluminum and iron phosphates up to 100 cm. The use of cattle manure had a lesser effect on the mineral composition of phosphates than sewage sludge. The application of NPK during five rotations of the field seven-field crop rotation increased the content of all groups of mineral phosphates in the plow horizon of the soil by 1.4–3.6 times. An increase in calcium phosphates was noted throughout the entire 1-meter soil layer, the Fe-P content in the 0–40 cm layer. The Al-P content decreased by 27–32% with depth. Long-term application of organic and mineral fertilizers had a positive effect on the content of mobile phosphorus in the soil and the degree of phosphate mobility. An increase in the reserves of mobile phosphorus was noted in the arable soil horizon and the meter layer.

Key words: sod-podzolic soil, fractional composition of mineral phosphates, mobile phosphorus, degree of phosphate mobility, manure, sewage sludge, mineral fertilizers.