УДК 631.8:631.445.4
DOI: 10.17238/issn2071-2243.2020.4.183

ВЛИЯНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ УДОБРЕНИЙ И МЕЛИОРАНТОВ НА СОДЕРЖАНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ФОРМ ФОСФОРА В ЧЕРНОЗЁМЕ ВЫЩЕЛОЧЕННОМ В УСЛОВИЯХ ДЛИТЕЛЬНОГО СТАЦИОНАРНОГО ОПЫТА

Дмитрий Игоревич Бережнов
Елена Сергеевна Гасанова
Константин Егорович Стекольников

Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I

Исследования по изучению влияния применения минеральных и органических удобрений, а также кальциевого мелиоранта на содержание различных форм фосфора проводились в условиях длительного стационарного опыта кафедры агрохимии, почвоведения и агроэкологии Воронежского ГАУ. Опытный участок расположен в условиях лесостепной зоны ЦЧР. Почвенный покров представлен чернозёмом выщелоченным. Были изучены варианты с различными дозами вносимых минеральных удобрений, навоза и дефеката, а также контрольный вариант. В отобранных образцах определяли формы фосфора (общий, минеральный и органический) по методу Сендерса-Вильямса. В результате проведённых исследований было установлено, что интенсивное сельскохозяйственное использование способствовало повышению содержания изучаемых форм фосфора под всеми возделываемыми культурами севооборота как в пределах пахотного горизонта, так и до глубины 1 м. Распределение общего, минерального и органического фосфора по профилю характеризуется элювиально-иллювиальным типом. Кальциевый мелиорант (дефекат) стабилизирует фосфорный режим почв и увеличивает содержание минерального фосфора по почвенному профилю по сравнению с неизвесткованными вариантами. Установлено, что фосфорный режим находится в тесной зависимости от условий увлажнения. В годы с дефицитом влаги и под культурами интенсивного выноса элементов питания снижается содержание общего и минерального фосфора. Наибольшее влияние дефицит влаги оказывает на снижение содержания органического фосфора. При изучении взаимосвязи содержания общего и минерального фосфора с характеристиками гранулометрического состава выявлено, что общий и минеральный фосфор слабо связаны с содержанием крупных гранулометрических фракций, органофосфаты имеют преимущественно слабую связь с более тонкими фракциями.
КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: фосфор общий, минеральный, органический, характер распределения по профилю, удобрения, дефекат.

EFFECT OF APPLICATION OF FERTILIZERS AND AMELIORANTS ON THE CONTENT OF VARIOUS FORMS OF PHOSPHORUS IN LEACHED CHERNOZEM UNDER CONDITIONS OF LONG-TERM STATIONARY EXPERIMENT

Dmitriy I. Berezhynov
Elena S. Gasanova
Konstantin E. Stekolnikov

Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great

Studies on the effect of mineral and organic fertilizers application, as well as calcium ameliorant on the content of various forms of phosphorus were conducted in the conditions of long-term stationary experiment of the Department of Agrochemistry, Soil Science and Agroecology of Voronezh State Agrarian University. The experimental plot is located in the conditions of the forest-steppe zone of the Central Chernozem Region. The soil is represented by leached chernozem. Variants with different doses of applied mineral fertilizers, manure and defecate were studied, as well as a control variant. In the selected samples, the forms of phosphorus (total, mineral, and organic) were determined by the Sanders-Williams method. As a result of the conducted studies, it was found that intensive agricultural use contributed to an increase in the content of the studied forms of phosphorus under all cultivated cultures of the crop rotation both within the arable horizon and to a depth of 1 m.

The distribution of total, mineral, and organic phosphorus along the profile was characterized by an eluvio-illuvial type. Calcium ameliorant (defecate) stabilized the phosphorus regime of soils and increased the content of mineral phosphorus in the soil profile in comparison with the variants without liming. It is established that the phosphorus regime is closely dependent on the humidification conditions. In years with a lack of moisture and under crops of intensive removal of food elements, the content of total and mineral phosphorus decreases. The greatest impact of the lack of moisture has on the reduction of the content of organic phosphorus. When studying the relationship between the content of total and mineral phosphorus and the characteristics of the granulometric composition, it was found that total and mineral phosphorus are weakly related to the content of large granulometric fractions, organophosphates have a predominantly weak relationship with finer fractions.
KEYWORDS: total phosphorus, mineral, organic, distribution pattern by profile, fertilizers, defecate.

Введение

Фосфор, один из числа распространённых элементов, был открыт Х. Брэндом в 1669 г., а А.Л. Лавуазье много позже доказал, что фосфор является самостоятельным химическим элементом. Ж.Л. Пруст и М. Клапрот показали, что фосфор широко распространён в земной коре, главным образом в виде фосфата кальция. Фосфор, подобно углероду, водороду и азоту, – необходимая составная часть всех живых клеток животных и растений (особенно богаты органическими соединениями фосфора мозг и нервные клетки). В силу своей химической активности фосфор в природе в свободном виде не встречается. Главным образом он встречается в виде фторапатитов, фосфоритов, трифилитов [4, 8, 9].

Фосфор является уникальным элементом, что обусловлено количеством реакций и форм, в виде которых он находится в почве. Содержание фосфора на планете составляет 10^{19} т, из них 10^{15} т сосредоточено в земной коре, донных отложениях мирового океана и гумусовых горизонтах почв. Основной природный источник фосфора – горные породы, из которых в процессе выветривания фосфаты первичных минералов вовлекаются в биологический круговорот – переходят в раствор, поглощаются живыми организмами и способствуют образованию в почве его вторичных форм, которые обладают подвижностью и доступностью для растений и являются наиболее ценной частью почвенных фосфатов [8].

Фосфор – незаменимый элемент питания живых организмов, который определяет процессы энергообмена в клетках. Работы, направленные на изучение содержания фосфора и превращения его соединений в педосфере, были начаты еще в XIX веке. В то же время основополагающие аспекты миграции фосфора, мобилизации микроорганизмами и концентрации фосфора в системе почва – растения недостаточно изучены.

Современным поборникам биологического земледелия очень полезно напомнить слова первого русского доктора по агрономии А.В. Советова, который считал, что навоз может быть единственным удобрением, позволяющим обходиться в земледелии без минеральных туков. Ещё в 1869 г. в рецензии на монографию А.В. Советова «О разведении кормовых трав на полях» П.А. Костычев написал по этому поводу, что такой взгляд – «совершенно не верен… хозяйство никогда не может иметь собственных средств *для полного возврата веществ в почву* и должно прибегнуть для этого или к помощи технических средств, или к покупке искусственных удобрений». А в заключение своей рецензии он отметил: «Везде навозу придаётся какое-то мистическое значение, а между тем не сказано, как изменяется круговорот питательных веществ при травосеянии, сравнительно с трёхпольной системой» [6]. Здесь ведь речь идёт о включении в севооборот многолетних трав, с помощью которых надеялись покрыть дефицит элементов питания. Начинающий учёный в середине XIX века осознавал значение возврата элементов питания в почву, а современным учёным, земледелам и растениеводам надо это доказывать и объяснять, так как они не признают круговорот элементов питания.

В настоящее время проблема фосфорного питания растений стоит очень остро. Наиболее достоверную информацию о режиме фосфора в почве можно получить в длительных опытах с удобрениями. Именно поэтому представленные исследования вы-

полнены в условиях длительного стационарного опыта с различными дозами удобрений и мелиоранта.

Целью исследований является изучение влияния длительного применения минеральных и органических удобрений, а также дефеката на количество различных форм фосфора и характер их распределения по почвенному профилю за ротацию зернопаропропашного севооборота на чернозёме выщелоченном в условиях лесостепи ЦЧР.

Объект и методы исследований. Исследования выполнены на стационаре кафедры агрохимии, почвоведения и агроэкологии Воронежского ГАУ.

Почвенный покров стационара представлен чернозёмом выщелоченным малогумусным среднемощным тяжелосуглинистым. Подробно схема опыта и исходные характеристики объекта исследований представлены в работе [2].

Были изучены следующие варианты опыта:

1 – контроль;

2 – фон (40 т/га навоза);

3 – фон + $N_{60}P_{60}K_{60}$;

5 – фон + $N_{120}P_{120}K_{120}$;

13 – фон + 21 т/га дефеката;

15 – фон + дефекат + $N_{60}P_{60}K_{60}$.

Отбор почвенных образцов осуществлялся послойно с шагом 20 см до глубины 1 м.

При выполнении работы определялось содержание различных форм фосфора по методу Сендерса-Вильямса.

Результаты и их обсуждение

Фосфор является макроэлементом минерального питания, при этом он существенно отличается от калия и азота по доступности растениям. Коэффициент использования азота и калия из почвы и удобрений составляет 40–70%, фосфора – всего 7–21%.

Подвижность и соответственно доступность соединений фосфора растениям зависят от реакции среды, гранулометрического, минералогического состава и содержания органического вещества в почве. При pH ниже 4,5 фосфор закрепляется железом, в диапазоне 4,5–6,0 он связывается с алюминием, а при pH 7–9 осаждается кальцием. Диапазон максимальной доступности фосфора находится в пределах pH 6–7. Таким образом, при подкислении почв, как это ни странно, существенно повышается доступность соединений фосфора растениям, несмотря на то что при этом существенно ухудшаются свойства почвы. Именно поэтому в конце 90-х годов прошлого столетия агрохимической службой ЦЧР было отмечено резкое снижение применения минеральных удобрений, при этом обеспеченность пашни данного региона подвижными формами фосфора существенно увеличилась. Это противоречивое явление требовало объяснения. И оно есть. За период с 1970 по 1990 г. дозы минеральных удобрений в ЦЧР возросли в среднем с 40–60 до 120–150 кг/га. Если в 1988 г. в СССР было внесено 13,3 млн т минеральных удобрений, то в 1996 г. в России – всего 1,2, т. е. в 10 раз меньше. Произошло существенное подкисление пахотных почв в результате длительного применения высоких доз минеральных удобрений. Следствием этого стало значительное повышение обеспеченности почв подвижными формами фосфора на фоне низких доз внесения минеральных удобрений.

Почва территории, на которой расположен длительный стационар факультета агрономии, агрохимии и экологии Воронежского государственного аграрного университета, характеризуется повышенной кислотностью как в исходном состоянии, так и за исследуемый период, поэтому содержание общего фосфора в опыте высокое, хотя и неодинаковое по вариантам. Данные, характеризующие содержание общего фосфора и его изменение за ротацию севооборота на вариантах опыта, представлены в таблице 1 и на рисунке 1.

Таблица 1. Содержание общего фосфора под культурами севооборота

Варианты опыта	Слой, см	Содержание общего фосфора, мг/кг почвы					
		2015 г., озимая пшеница	2016 г., ячмень	2017 г., пар	2018 г., озимая пшеница	2019 г., сахарная свёкла	2020 г., вико-овсяная смесь
1	0–20	252	712	522	562	207	330
	20–40	220	690	413	518	155	250
	40–60	172	562	460	355	191	272
	60–80	134	456	343	252	215	255
	80–100	174	435	228	217	243	283
2	0–20	296	804	610	459	293	355
	20–40	404	722	550	405	267	394
	40–60	367	700	404	294	237	296
	60–80	150	456	342	231	289	252
	80–100	228	419	281	265	276	194
3	0–20	363	850	624	602	320	506
	20–40	244	570	684	435	307	344
	40–60	169	469	427	289	276	228
	60–80	134	438	363	259	307	244
	80–100	146	440	333	233	217	276
5	0–20	287	916	776	634	283	516
	20–40	346	726	750	569	259	307
	40–60	313	402	536	409	280	350
	60–80	309	465	335	252	250	278
	80–100	355	410	304	235	207	241
13	0–20	270	806	570	502	335	318
	20–40	244	664	566	454	296	259
	40–60	233	556	427	217	278	307
	60–80	204	522	421	248	209	305
	80–100	235	394	355	107	171	204
15	0–20	415	802	600	241	396	386
	20–40	392	558	298	289	280	315
	40–60	261	438	465	348	315	367
	60–80	254	604	413	257	305	324
	80–100	243	552	350	261	298	333

Как следует из данных таблицы 1, содержание общего фосфора очень сильно варьирует в течение всего времени наблюдений и имеет различный характер его распределения по профилю почвы. Максимальное содержание общего фосфора наблюдалось под ячменём в 2016 г., а минимальное – под сахарной свёклой в 2019 г. Содержание этой формы фосфора в пахотном слое в 2016 г. составляло соответственно 712, 804, 850, 916, 806 и 802 мг/кг по вариантам опыта, а в 2019 г. – 207, 293, 320, 283, 335 и 396 мг/кг. Отмечено снижение содержания общего фосфора в 2019 г. по отношению к 2016 г. в 2,5–3,5 раза, что обусловлено высоким выносом фосфора с урожаем сахарной свёклы при низкой урожайности ячменя (табл. 2).

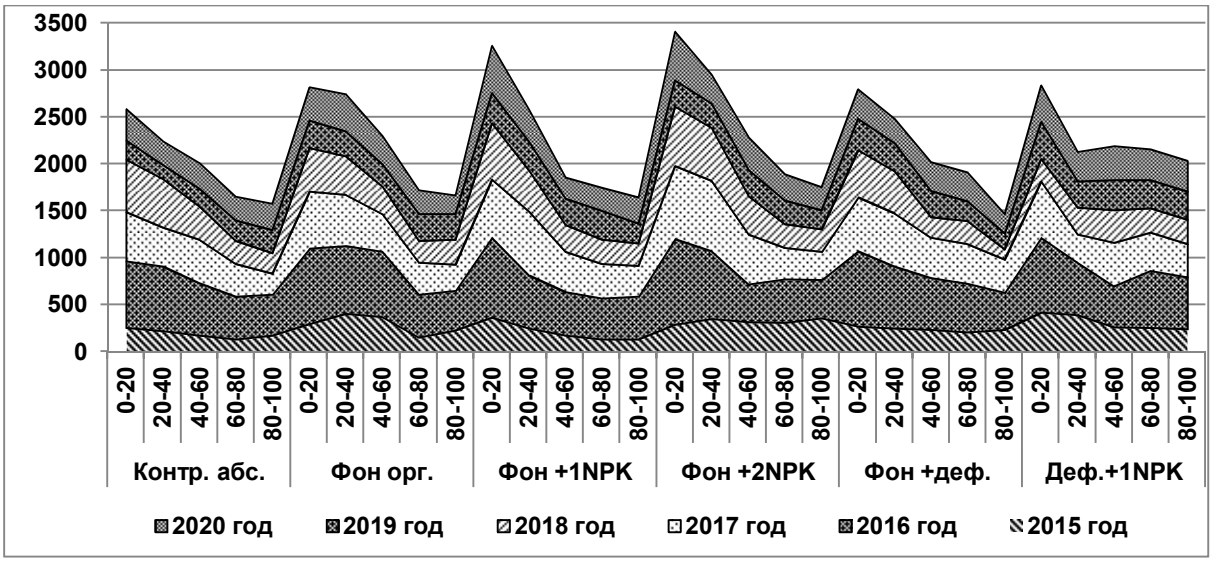

Рис. 1. Содержание и характер дифференциации общего фосфора по годам и вариантам опыта, мг/кг почвы

Как уже отмечалось выше, содержание общего фосфора зависит от многих параметров почвы. Есть связь его содержания и с урожайностью возделываемых в опыте сельскохозяйственных культур (табл. 2).

Таблица 2. Урожайность сельскохозяйственных культур, т/га

Вариант опыта	2015 г., озимая пшеница + овёс, з/м	2016 г., ячмень	2017 г., пар	2018 г., озимая пшеница	2019 г., сахарная свёкла	2020 г. вико-овсяная смесь, з/м
1	13,90	2,23	-	3,73	32,1	-
2	15,36	2,32	-	4,22	37,4	-
3	16,62	3,18	-	5,06	42,2	-
5	18,75	3,75	-	5,13	43,7	-
13	14,64	2,71	-	3,71	35,1	-
15	18,21	3,39	-	4,64	42,8	-
НСР0,95, т/га	-	0,41	-	0,8	4,38	-
Sx, %	-	4,7	-	6,5	3,81	-

Урожайность по годам наблюдений была неодинаковой и определялась главным образом условиями увлажнения вегетационных периодов. Весной 2015 г. посевы озимой пшеницы из-за засухи были сильно изреженными, что послужило основанием для подсева овса. В связи с неодновременным развитием озимой пшеницы и овса было принято решение об уборке на зелёный корм. Такая же ситуация сложилась и на варианте вико-овсяной смеси в 2020 г., скошенной на зелёный корм без учёта урожая.

Известно, что ячмень способен удовлетворительно использовать последействие минеральных и органических удобрений. Тем не менее засуха вегетационного периода 2015 г. не позволила сработать на урожай внесённым под озимую пшеницу минеральным удобрениям. Июнь и июль 2016 г. характеризовались резким дефицитом влаги, гидротермический коэффициент (ГТК) – соответственно 0,76 и 0,56, что и обусловило низкую урожайность ячменя. Чем же в таком случае объяснить столь высокое содержание общего фосфора под культурой ячменя? Скорее всего, это обусловлено высоким содержанием органического фосфора, что подтверждается нашими данными (табл. 4).

Следует отметить, что помимо разного содержания общего фосфора на вариантах опыта за исследуемый период мы наблюдаем и различный характер его дифференциации по профилю анализируемой почвы (рис. 1). Только на контрольном варианте распределение общего фосфора по профилю соответствует прогрессивно убывающему типу, на остальных вариантах, особенно при совместном применении минеральных и органических туков, он элювиально-иллювиальный. Минимальная степень выраженности подобного типа распределения общего фосфора наблюдается на вариантах органического фона (вариант 2), с мелиорантом по фону навоза (вариант 13) и совместно с одинарной дозой минеральных удобрений (вариант 15).

Данные, характеризующие содержание и характер распределения по профилю минерального фосфора, представлены в таблице 3 и на рисунке 2.

Таблица 3. Содержание минерального фосфора под культурами севооборота

Варианты опыта	Слой, см	Содержание минерального фосфора, мг/кг почвы					
		2015 г., озимая пшеница	2016 г., ячмень	2017 г., пар	2018 г., озимая пшеница	2019 г., сахарная свёкла	2020 г., вико-овсяная смесь
1	0–20	211	259	211	167	193	237
	20–40	146	187	205	164	122	235
	40–60	126	171	126	117	126	246
	60–80	121	228	103	114	126	248
	80–100	98	187	102	105	141	246
2	0–20	250	361	252	189	231	285
	20–40	141	270	146	157	119	330
	40–60	148	218	141	117	122	274
	60–80	100	226	126	105	131	194
	80–100	136	228	133	105	143	172
3	0–20	257	352	285	235	217	318
	20–40	218	241	267	171	129	254
	40–60	133	204	136	131	112	169
	60–80	114	211	121	103	100	204
	80–100	78	244	128	124	136	167
5	0–20	276	438	309	250	248	326
	20–40	239	326	268	274	133	237
	40–60	300	198	133	148	114	193
	60–80	276	224	124	100	100	217
	80–100	235	205	112	103	187	198
13	0–20	246	357	233	189	202	300
	20–40	218	244	146	145	187	211
	40–60	169	243	124	100	121	143
	60–80	133	211	121	109	95	136
	80–100	128	276	141	79	105	171
15	0–20	280	350	259	213	205	365
	20–40	226	224	110	171	114	280
	40–60	146	233	133	128	124	187
	60–80	152	250	121	119	134	165
	80–100	146	243	90	109	115	143

Как следует из данных таблицы 3, содержание минерального фосфора заметно различается как по вариантам опыта, так и по годам наблюдений. Максимальное содержание минерального фосфора отмечается под ячменём, а минимальное – под озимой пшеницей. Высокое содержание минерального фосфора обусловлено тем, что после избыточного увлажнения в апреле и мае (ГТК соответственно 5,44 и 1,62) в период активного развития ячменя сложился резкий дефицит влаги: ГТК в июне и июле составлял 0,76 и 0,56. Это, как уже отмечалось выше, способствовало низкой продуктивности ячменя и незначительному выносу фосфора с урожаем.

Вегетационный период в 2018 г. был более благоприятным для формирования хорошего урожая озимой пшеницы (3,73–5,13 т/га, табл. 2) и соответственно более высокого выноса фосфора с урожаем.

Характер распределения по профилю минерального фосфора наглядно представлен на рисунке 2.

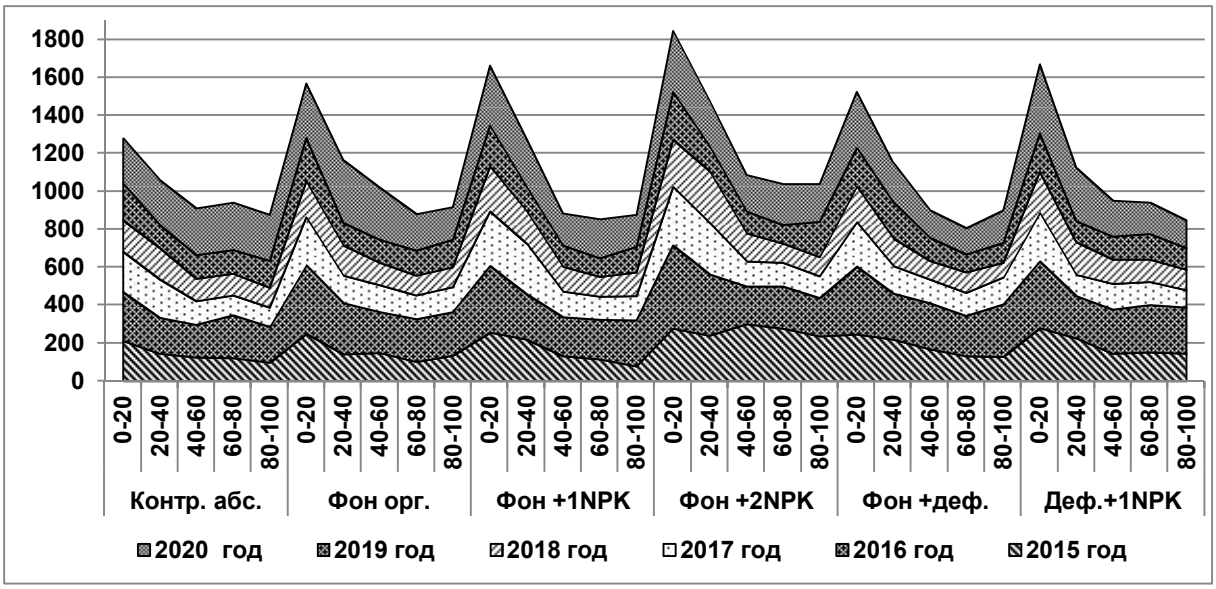

Рис. 2. Особенности дифференциации минерального фосфора по почвенному профилю, мг/кг почвы

Что касается минерального фосфора, то в отношении этой формы сохраняются особенности распределения по профилю, выявленные для общего фосфора: на абсолютном контроле – прогрессивно убывающий тип, а на остальных вариантах опыта – преимущественно элювиально-иллювиальный. Как следует из данных таблицы 3 и рисунка 2, содержание минерального фосфора очень динамично как по годам наблюдений, так и по вариантам опыта. Максимальное содержание его по всему профилю изучаемой почвы наблюдалось в 2016 г. под культурой ячменя, т. е. так же, как и общего фосфора. Минимальное содержание отмечается в 2018 г. под озимой пшеницей, размещённой по чистому пару.

Применение удобрений приводит к существенному возрастанию содержания минерального фосфора во всей почвенной толще. Общей закономерностью в распределении минерального фосфора является повышение его содержания в нижней части профиля. Может возникнуть вполне закономерный вопрос, с чем связано высокое содержание минерального азота в нижней части профиля почвы? Тем более что в науке и практике сложилось устойчивое мнение о низкой миграционной способности соединений минерального фосфора. Дать прямой и обоснованный ответ пока нельзя, так как в старейшем аграрном вузе нет необходимого оборудования для исследования минералогического состава почв. Знание о содержании и характере распределения минералов этой группы позволяет оценить валовое содержание фосфора, а следовательно, и его доступность растениям, направление и характер перераспределения по профилю. Ведь в естественных почвах минералы группы апатита являются единственным источником фосфора для растений.

Считаем, что это может быть обусловлено тем, что в нижней части профиля реакция среды смещается в щелочной диапазон, тем более что в отдельные годы в этой части профиля могут появляться подвижные карбонаты. В данном случае даже временно формирующийся карбонатный горизонт играет роль биогеохимического барьера для подвижных форм фосфора. В этом отношении представляют особый интерес данные, полученные на вариантах с мелиорантом.

Выше отмечалось, что мы изучаем не прямое действие кальциевого мелиоранта, а его последействие. Однако даже последействие дефеката приводит к возрастанию содержания минерального фосфора по почвенному профилю по сравнению с неизвесткованными вариантами.

Показатели дифференциации органического фосфора представлены в таблице 4 и на рисунке 3. Прежде всего, отметим очень высокое (в 3–10 раз выше) содержание органического фосфора в 2016–2018 гг. под ячменём, в паровом поле и под озимой пшеницей. Максимальное содержание этой формы фосфора наблюдалось в 2016 г. Основной причиной мы считаем самые благоприятные условия увлажнения вегетационного периода этого года по сравнению с остальными годами наблюдений. Так, ГТК вегетационного периода был равен 1,36, в апреле – 5,44, мае – 1,62, но уже с июня наблюдалась засуха, наиболее резко проявившаяся в июле, т. е. в период максимального формирования урожая (ГТК = 0,56). Это, несомненно, сказалось на низкой продуктивности ячменя (табл. 2)

Таблица 4. Содержание органического фосфора под культурами севооборота

Варианты опыта	Слой, см	Содержание органического фосфора, мг/кг почвы					
		2015 г., озимая пшеница	2016 г., ячмень	2017 г., пар	2018 г., озимая пшеница	2019 г., сахарная свёкла	2020 г., вико-овсяная смесь
1	0–20	41	453	311	395	14	93
	20–40	74	503	208	354	33	15
	40–60	46	391	334	238	67	26
	60–80	13	228	240	138	89	7
	80–100	76	248	226	112	102	37
2	0–20	46	443	358	270	62	70
	20–40	263	452	404	248	148	64
	40–60	219	482	363	177	115	22
	60–80	50	230	216	126	158	58
	80–100	92	291	148	160	133	22
3	0–20	106	498	339	367	103	188
	20–40	26	329	417	264	178	90
	40–60	36	265	281	158	164	59
	60–80	20	227	242	156	207	40
	80–100	68	196	205	109	81	109
5	0–20	11	478	467	304	35	190
	20–40	107	400	482	295	126	70
	40–60	13	204	403	261	166	157
	60–80	33	241	211	152	150	61
	80–100	120	205	192	132	20	43
13	0–20	24	449	367	313	133	18
	20–40	26	420	420	309	109	48
	40–60	64	313	303	117	157	164
	60–80	71	311	300	139	114	169
	80–100	107	118	214	28	66	33
15	0–20	135	452	341	28	191	21
	20–40	166	334	188	118	166	35
	40–60	115	205	332	220	191	180
	60–80	102	354	292	138	171	159
	80–100	97	309	260	152	183	190

Для понимания процессов накопления и минерализации органических соединений фосфора необходимо учитывать несколько обстоятельств. К. Блек (1973) при изу-

чении влияния азота на растения установил, что с возрастанием вносимых доз удобрений урожай надземной массы возрастает более интенсивно, чем вес корневой системы: людям – самые вершки, почве – все остальное [4]. С урожаем зерновых и однолетних трав отчуждается 60–65% от биомассы, кукурузы – 70–73%, сена многолетних трав – 40%. Оставшаяся часть биомассы поступает в почву и подвергается процессам гумификации или минерализации.

Основные сельскохозяйственные культуры по количеству накопленных растительных остатков располагаются следующим образом: в Нечернозёмной зоне – многолетние травы (100%), кукуруза (56%), озимые (50%), яровые зерновые (39%), зернобобовые (28%); в Центрально-Чернозёмном регионе – многолетние травы (100%), озимая пшеница (48%), кукуруза (38%), яровые зерновые (37%), подсолнечник (36%), зернобобовые (35%), сахарная свёкла (31%).

На чернозёме обыкновенном юго-восточной степи Украины после выращивания озимой пшеницы в почве аккумулировалось 3,2–3,8 т/га органического вещества, после кукурузы – 2,0–2,4, ячменя – 1,3–1,8 т/га. В севооборотах Центрального Предкавказья формировалось 3,8–4,2 т/га пожнивно-корневых остатков, внесение удобрений способствовало увеличению их массы на 5,9–9,7% [5].

Установлено, что с ростом урожайности сельскохозяйственных культур количество корневых и пожнивных остатков увеличивается. Однако их процентное содержание в общей биомассе снижается. Количество растительных остатков озимых зерновых при урожаях 1,0–1,5 т/га составляет 2,3 т/га, яровых – 1,8, в то время как при урожаях 3,0–4,0 т/га – соответственно 4,5 и 3,5 т/га. В то же время количество органического углерода в пожнивных и корневых остатках перед уборкой растений меньше, чем его образуется в течение всей вегетации. Это связано с тем, что значительное количество органического вещества поступает в почвенную толщу с прижизненными выделениями и отмершими корнями.

Отмершие корни образуют 20% от веса живых корней, корневые выделения – 10%, слизистые выделения зерновых культур могут достигать сотен кубических метров и приближаться к высокому урожаю зерна.

Процентное отношение отчуждаемой массы корневых и пожнивных остатков зависит от почвенно-климатических условий, уровня урожайности, ботанических особенностей культуры и агротехники ее выращивания. Например, в аридных районах масса корневых остатков в общей массе всего растения выше [3, 4]. Видимо, эта особенность проявила себя в случае с ячменем.

В условиях неблагоприятного минерального питания и при дефиците влаги рост надземной части растений тормозится, а корней – усиливается. При оптимальных условиях увлажнения и минерального питания интенсивнее развивается надземная часть растений. Недостаток влаги и элементов питания обусловил усиленный рост корневой системы на абсолютном контроле, а на удобренных вариантах накопилось больше надземной биомассы, в том числе пожнивных остатков.

Известно давно, что в почву с растительными остатками возвращается значительная часть основных (и не только основных) элементов. По данным Ф.И. Левина [11], в почву возвращается 27,0–60,5% азота, 18,5–51,7% фосфора, 16,7–48,1% калия, 27,6–54,0% кальция (% от их общего количества в урожае). Это даёт основание для утверждения, что высокое содержание органофосфатов под ячменём в значительной мере обусловлено возвратом фосфора с побочной продукцией, особенно на удобренных вариантах.

Следует отметить, что на вариантах с дефекатом мы наблюдаем высокое содержание органофосфатов, и это притом, что дефекат не вносился. Дефекат даже в последействии оказывает существенное влияние на накопление органофосфатов. Низкое содержание органофосфатов под сахарной свёклой обусловлено высоким выносом фосфора с урожаем и незначительным возвратом с побочной продукцией. Низкое содержание органофосфатов под вико-овсяной смесью связано с засухой и низкой продуктивностью.

Особенности профильного распределения органофосфатов представлены на рисунке 3. Как и в случае с общим и минеральным фосфором, характер распределения по профилю органофосфатов на варианте контроля соответствует прогрессивно убывающему типу, а на остальных – элювиально-иллювиальному. Удобрения способствуют существенной дифференциации почвенного профиля по содержанию органофосфатов, а внесение дефеката снижает её.

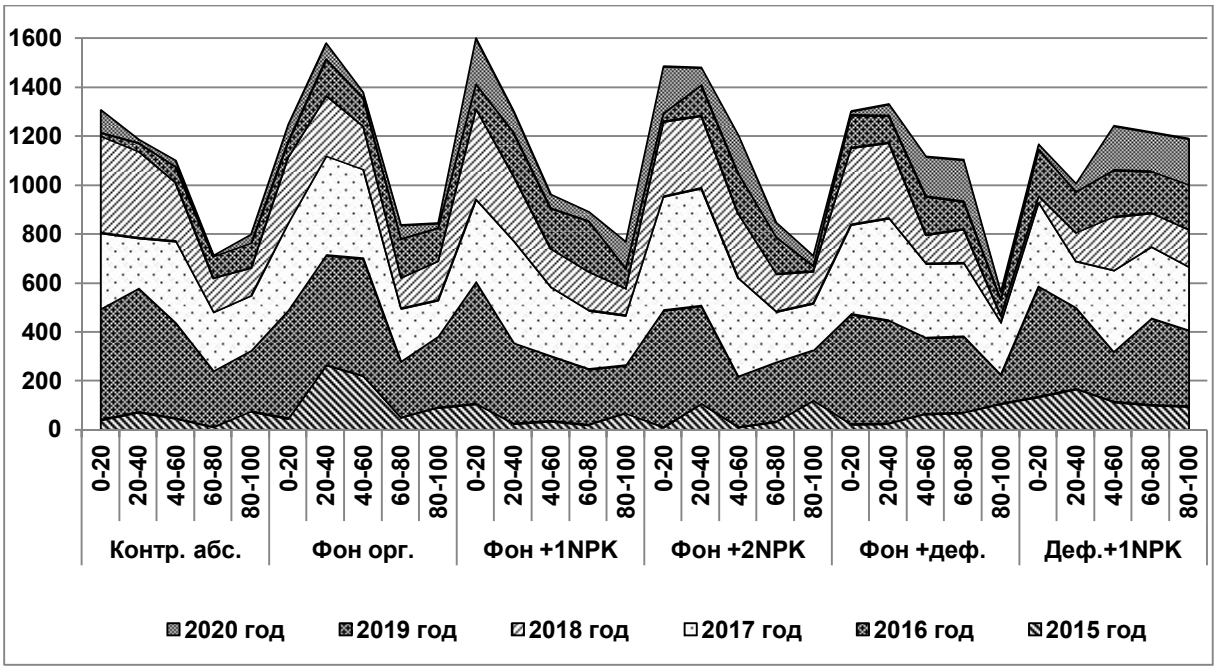

Рис. 3. Особенности дифференциации органического фосфора по почвенному профилю, мг/кг почвы

Для выявления особенностей накопления наиболее доступных для сельскохозяйственных культур форм фосфора мы выразили содержание минерального и органического фосфора в % от содержания общего фосфора. Результаты представлены в таблице 5 и на рисунках 4 и 5.

Как следует из данных таблицы 5, относительное содержание минерального фосфора очень динамично как по годам наблюдений, так и по вариантам опыта. Максимальное накопление его наблюдается в 2015 г. под озимой пшеницей с подсевом овса – 67,47–96,17%, а также в 2020 г. под вико-овсяной смесью – 62,85–94,56%. Минимальное содержание минерального фосфора наблюдается под озимой пшеницей, размещённой по пару в 2018 г., – 29,71–88,38%. Внесение органических и минеральных удобрений в целом обеспечивает более высокое содержание минерального фосфора по всему профилю в сравнении с вариантом абсолютного контроля.

Содержание органического фосфора имеет закономерно обратный характер. Годам с максимальным содержанием минерального фосфора соответствуют годы с минимальным содержанием органического фосфора. Как и в случае с минеральным фосфором, внесение органических и минеральных удобрений обеспечивает более высокое относительное содержание органического фосфора и более равномерное его распределение по профилю. Засуха проявилась в снижении накопления органофосфатов в 2015 и 2020 гг. Это хорошо подтверждается полученными нами данными по относительному содержанию органофосфатов. Особо критическое положение складывается на варианте абсолютного контроля в 2020 г., когда относительное содержание органофосфатов снижалось от 28,18% в пахотном слое до 2,75% в слое 60–80 см. Это самое низкое содержание за весь период наблюдений.

Как уже отмечалось выше, максимальное содержание минерального фосфора наблюдается в засушливые 2015 и 2020 гг. (рис. 4). Следует отметить, что характер распределения относительного содержания минерального фосфора на всех вариантах опыта соответствует элювиально-элювиальному типу (табл. 5). Минимальная степень дифференциации профиля наблюдается на всех изучаемых вариантах опыта, за исключением варианта с двойной дозой минеральных удобрений по фону навоза (вариант 5).

Отметим, что известкованные варианты в течение всех лет наблюдений отличаются от остальных вариантов опыта существенно меньшей степенью дифференциации профиля, что позволяет сделать предварительный вывод о том, что даже в последействии дефекат способен стабилизировать фосфатный режим изучаемой почвы.

Таблица 5. Содержание минерального и органического фосфора под культурами севооборота, % от общего

Варианты опыта	Слой, см	P_2O_5 минеральный, % от общего P_2O_5						P_2O_5 органический, % от общего P_2O_5					
		2015 г.	2016 г.	2017 г.	2018 г.	2019 г.	2020 г.	2015 г.	2016 г.	2017 г.	2018 г.	2019 г.	2020 г.
1	0–20	83,73	36,38	42,42	29,71	93,24	71,82	16,27	63,62	57,58	70,29	6,76	28,18
	20–40	66,36	27,10	49,64	31,66	78,71	94,00	33,64	72,90	50,36	68,34	21,29	6,00
	40–60	73,26	30,43	27,39	32,96	65,97	90,44	26,74	59,57	72,61	67,04	34,03	9,56
	60–80	90,30	50,00	30,03	45,24	58,60	97,25	9,70	50,00	69,97	54,76	41,40	2,75
	80–100	56,32	42,99	44,74	48,39	58,02	86,93	43,68	51,01	55,26	51,61	41,98	13,07
2	0–20	84,46	44,90	41,31	41,18	78,84	80,28	15,54	55,40	58,69	58,82	21,16	19,72
	20–40	65,10	37,40	26,54	38,76	44,57	83,76	34,90	62,60	73,46	61,24	55,43	16,24
	40–60	59,67	31,14	34,90	39,80	51,48	92,57	40,33	68,86	65,10	60,20	48,52	7,43
	60–80	66,67	49,56	36,84	45,45	45,33	76,98	33,33	50,44	63,16	54,55	54,67	23,02
	80–100	59,65	54,41	47,33	39,62	51,81	88,66	40,35	45,59	52,67	60,38	48,19	11,34
3	0–20	70,80	41,41	45,67	39,04	67,81	62,85	29,20	58,59	54,33	60,96	32,19	37,15
	20–40	89,34	42,28	39,03	39,31	42,02	73,84	10,66	57,72	60,97	60,69	57,98	26,16
	40–60	78,70	43,50	31,85	45,33	40,58	74,12	21,20	56,50	68,15	54,67	59,42	25,88
	60–80	85,07	48,17	33,33	39,77	32,57	83,61	14,93	51,83	66,67	60,23	67,43	16,39
	80–100	53,42	55,45	38,44	52,22	62,67	60,51	46,58	44,55	61,56	47,78	37,33	39,49
5	0–20	96,17	47,82	39,82	39,43	87,63	63,18	3,83	52,18	60,18	60,57	12,37	36,82
	20–40	69,07	44,90	35,73	48,15	51,35	77,20	30,93	55,10	64,27	51,85	48,65	22,80
	40–60	95,85	49,25	24,81	36,19	40,71	55,14	4,15	50,75	75,19	63,81	59,29	54,86
	60–80	89,32	48,17	37,01	39,68	40,00	78,06	10,68	51,83	62,99	60,32	60,00	21,94
	80–100	66,20	50,00	36,84	43,83	90,34	82,16	33,80	50,00	63,16	56,17	9,66	17,84
13	0–20	91,11	44,29	40,88	37,65	60,30	94,34	8,89	55,71	59,12	62,35	39,70	5,66
	20–40	89,34	36,75	25,79	31,94	63,18	81,47	10,66	63,25	74,21	68,06	36,82	18,53
	40–60	72,53	43,70	29,04	46,08	43,52	46,58	27,47	56,30	70,96	53,92	56,48	53,42
	60–80	65,20	40,42	28,74	43,95	45,45	44,59	34,80	59,58	71,26	56,05	54,55	55,41
	80–100	54,47	70,05	39,72	73,83	61,40	83,82	45,53	29,95	60,28	26,17	38,60	6,18
15	0–20	67,47	43,64	43,17	88,38	51,77	94,56	32,53	56,36	56,83	11,62	48,23	5,44
	20–40	57,65	40,14	36,91	59,17	40,71	88,89	42,35	59,86	63,09	40,83	59,29	11,11
	40–60	55,94	53,20	28,60	36,78	39,36	50,95	44,06	46,80	71,40	63,22	60,64	49,05
	60–80	59,84	41,39	29,30	46,30	43,93	50,93	40,16	58,61	70,70	53,70	56,07	49,07
	80–100	60,08	44,02	25,71	41,76	38,59	42,94	39,92	55,98	74,29	58,24	61,41	57,06

Как следует из данных таблицы 5, максимальное относительное содержание органического фосфора отмечалось в 2016 и 2018 гг. Это годы с относительно стабильным увлажнением. Тем более что в 2018 г. поле было под озимой пшеницей, размещённой по пару, в котором было внесено 40 т/га навоза, что обусловило повышение содержания органического фосфора. Минимальное относительное содержание органи-

ческого фосфора выявлено в 2015 и 2020 гг. Наибольшая степень дифференциации по относительному содержанию органического фосфора наблюдалась в 2020 г. под викоовсяной смесью. В значительной степени это обусловлено малым количеством корневых остатков предшественника – сахарной свёклы.

Данные, характеризующие распределение по профилю относительного содержания минерального и органического фосфора, представлены на рисунках 4 и 5.

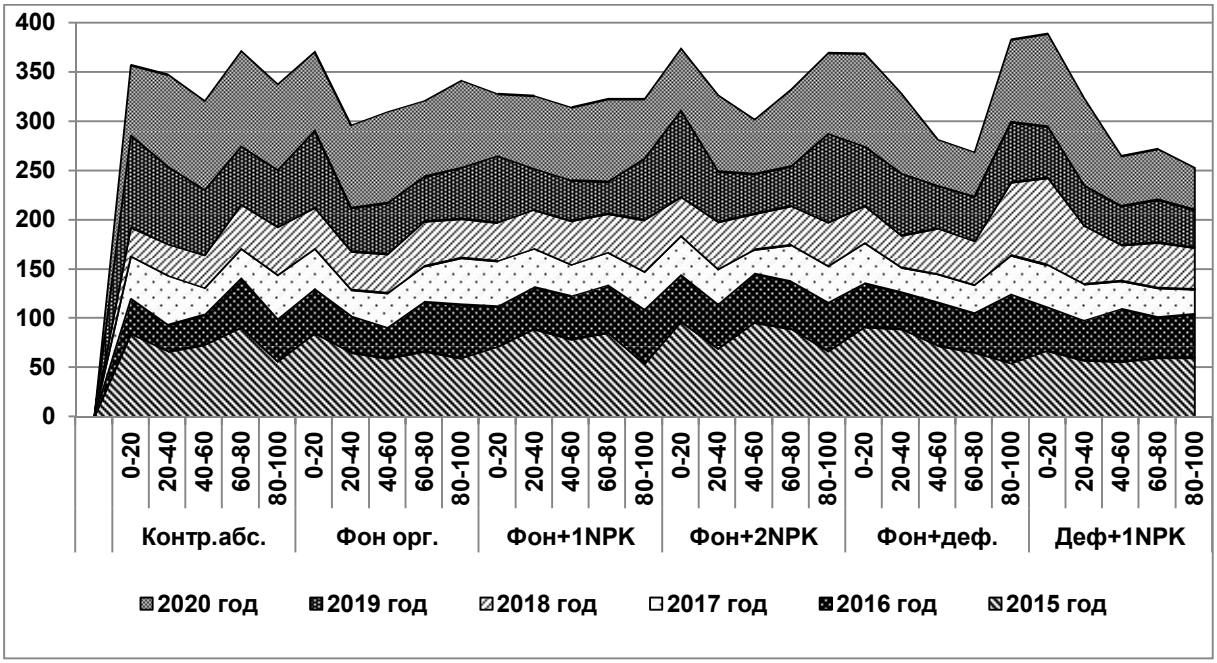

Рис. 4. Особенности распределения по профилю минерального фосфора, % от общего фосфора

Как следует из полученных данных, распределение по профилю относительного содержания минерального фосфора на всех вариантах опыта, за исключением мелиорируемых вариантов, элювиально-иллювиальное, а на вариантах с дефекатом − прогрессивно убывающее.

На рисунке 5 представлено содержание и характер распределения относительного содержания органического фосфора.

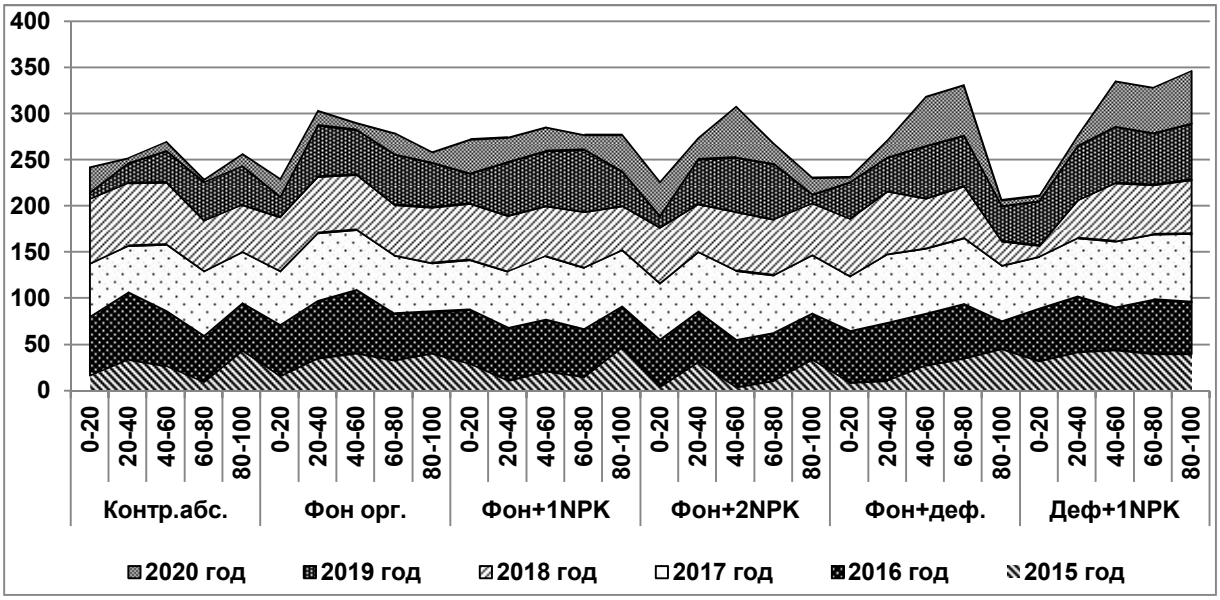

Рис. 5. Особенности распределения по профилю органического фосфора, % от общего фосфора

Как следует из данных рисунка 6, в годы с относительно стабильным уровнем увлажнения наблюдается накопление органофосфатов. Особенностью распределения по профилю является более выраженная дифференциация содержания P_2O_5 практически на всех вариантах опыта, особенно в 2019 и 2020 гг. Характер распределения по профилю соответствует элювиально-иллювиальному типу.

В литературе отмечается возможность закрепления фосфатов за счёт сорбции твёрдой фазой. В исследованиях [1, 10] показано, что поглощение фосфатов почвами зависит от гранулометрического состава: чем тяжелее гранулометрический состав почвы, тем выше её поглотительная способность, в том числе и способность поглощать фосфор. Значительное влияние на поглощение фосфатов почвой тесно связано с её минералогическим и гранулометрическим составом, что отмечается в исследованиях К.К. Гедройца, Я.В. Пейве, Н.И. Горбунова [7, 12] и др. Нами рассчитаны коэффициенты корреляции содержания различных форм фосфора с гранулометрическими фракциями исследуемой почвы. Данные приведены в таблице 6.

Таблица 6. Коэффициенты корреляции содержания различных форм фосфора с гранулометрическими фракциями

Формы фосфора	Годы, с.-х. культуры	Коэффициенты корреляции, r							
		1–0,25	0,25–0,05	0,05–0,01	0,01–0,005	0,005–0,001	< 0,001	> 0,01	< 0,01
Общий	2015 г., озимая пшеница + овёс	0,018	0,196	–0,214	0,126	0,079	–0,079	–0,076	0,086
	2016 г., ячмень	0,344	–0,179	0,097	0,320	0,082	–0,345	0,008	–0,038
	2017 г., пар	0,393	–0,219	0,134	0,219	0,099	–0,321	0,108	–0,070
	2018 г., озимая пшеница	0,186	–0,421	0,359	0,343	–0,179	–0,138	0,113	–0,063
	2019 г., сахарная свёкла	0,047	0,097	–0,204	0,274	0,454	–0,354	–0,360	0,271
	2020 г., вико-овсяная смесь	0,335	–0,177	0,039	0,333	0,081	–0,108	–0,149	0,106
Минеральный	2015 г., озимая пшеница + овёс	0,166	–0,227	0,192	0,123	0,043	–0,196	0,101	–0,067
	2016 г., ячмень	0,605	–0,161	0,045	0,263	0,157	–0,437	0,068	–0,098
	2017 г., пар	0,442	–0,345	0,222	0,332	0,007	–0,281	0,111	–0,036
	2018 г., озимая пшеница	0,294	–0,315	0,257	0,233	–0,060	–0,217	0,158	–0,107
	2019 г., сахарная свёкла	0,335	–0,218	0,140	0,253	0,068	–0,300	0,060	–0,054
	2020 г., вико-овсяная смесь	0,176	–0,254	0,201	0,247	–0,204	–0,017	0,158	–0,034
Органический	2015 г., озимая пшеница + овёс	–0,153	0,512	–0,498	0,040	0,063	0,102	–0,213	0,190
	2016 г., ячмень	0,098	–0,153	0,084	0,346	0,023	–0,191	–0,096	0,077
	2017 г., пар	0,256	–0,118	–0,050	0,163	0,140	–0,237	0,027	–0,007
	2018 г., озимая пшеница	0,023	–0,380	0,338	0,374	–0,198	–0,087	0,058	–0,008
	2019 г., сахарная свёкла	–0,215	0,251	–0,303	0,066	0,381	–0,105	–0,391	0,301
	2020 г., вико-овсяная смесь	0,233	0,038	–0,150	0,153	0,297	–0,231	–0,333	0,161

Рассмотрим корреляционные связи различных форм фосфора по культурам. Так, под озимой пшеницей с подсевом овса не выявлено связи содержания общего и минерального фосфора ни с одной фракцией гранулометрического состава. В отношении органического фосфора установлена средняя связь – r = 0,512 с фракцией мелкого песка и слабая отрицательная – с фракцией крупной пыли – r = –0, 98.

Под ячменём установлена слабая связь общего фосфора с фракцией среднего песка r = 0,344, с тонкой пылью – r = 0,320 и слабая отрицательная с фракцией ила – r = –0,345. Для минерального фосфора под ячменём выявлена средняя связь с содержанием среднего песка – r = 0,605 и слабая отрицательная с фракцией ила – r = –0,437, а для органического фосфора – слабая связь с фракцией тонкой пыли – r = 0,346.

Под паром выявлена слабая связь общего фосфора с фракцией среднего песка – r = 0,393 и слабая отрицательная с содержанием ила – r = –0,321. Содержание минерального фосфора имеет слабую связь с содержанием фракции среднего песка – r = 0,442 и слабую отрицательную с фракцией мелкого песка – r = –0,345. Для органического фосфора связей с гранулометрическими фракциями не выявлено.

Под озимой пшеницей установлена слабая отрицательная связь содержания общего фосфора с фракцией мелкого песка – r = –0,421 и слабая с фракциями крупной и средней пыли – соответственно r = 0,359 и r = 0,343. Для минерального фосфора выявлена слабая отрицательная связь с фракцией мелкого песка r = –0,315, а для содержания органического фосфора установлена слабая отрицательная связь с фракцией мелкого песка – r = –0,380 и слабая с фракциями крупной и средней пыли – соответственно r = 0,338 и r = 0,374.

Под сахарной свёклой установлена слабая связь общего фосфора с фракцией тонкой пыли – r = 0,454 и слабая отрицательная связь с фракцией ила и физического песка – соответственно r = –0,354 и r = –0,360. Для минерального фосфора выявлена слабая связь с фракцией среднего песка – r = 0,355 и слабая отрицательная с фракцией ила – r = 0,300. Для органического фосфора выявлена слабая отрицательная связь с фракцией крупной пыли – r = –0,303 и слабая с илом – r = 0,381 и слабая отрицательная с физическим песком – r = –0,391.

Под вико-овсяной смесью установлена слабая связь общего фосфора с фракцией среднего песка – r = 0,335 и слабая связь с фракцией тонкой пыли – r = 0,333. Для минерального фосфора связей не выявлено. Для органического фосфора выявлена слабая отрицательная связь с физическим песком – r = –0,333.

Результаты проведённых исследований не всегда согласуются с ранее опубликованными литературными данными. Совершенно иные зависимости выявлены по корреляции различных форм фосфора с гранулометрическими фракциями по вариантам опыта, что будет проанализировано в дальнейшем.

Выводы

1. Длительное применение органических и минеральных удобрений существенно повышает содержание всех форм фосфора. Содержание их варьирует в широких пределах как по годам наблюдений, так и по вариантам опыта. На этот показатель оказывают влияние не только удобрения и дефекат, но и условия вегетационных периодов и, как следствие, урожайность сельскохозяйственных культур, возделываемых в опыте.

2. В годы с дефицитом влаги и под культурами интенсивного выноса элементов питания снижается содержание общего и минерального фосфора. Наибольшее влияние дефицит влаги оказывает на снижение содержания органического фосфора.

3. Известкованные варианты не уступают вариантам с использованием минеральных туков по содержанию всех анализируемых форм фосфора. Выявлено, что использование кальциевого мелиоранта приводит к равномерному распределению анализируемых форм фосфора по почвенному профилю.

4. Содержание различных форм фосфора связано с гранулометрическим составом. Установлено, что общий и минеральный фосфор слабо связаны с содержанием крупных гранулометрических фракций, органофосфаты имеют преимущественно слабую связь с более тонкими фракциями.

Библиографический список

1. Бутяйкин В.В. Динамика фосфатного режима черноземной почвы под влиянием антропогенных факторов / В.В. Бутяйкин // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. – 2014. – № 2 (26). – С. 17–21.

2. Гасанова Е.С. Влияние удобрений и мелиоранта на качество органического вещества чернозема выщелоченного : автореф. дис. ... канд. с.-х. наук : 06.01.03 / Е.С. Гасанова. – Воронеж, 2006. – 24 с.

3. Дёмкин В.И. Воспроизводство плодородия почвы в зернопаропропашных севооборотах Центрального Предкавказья : автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук : 06.01.03 / В.И. Дёмкин. – Краснодар, 1999. – 50 с.

4. Кирюшин В.И. Агрономическое почвоведение : учебник / В.И. Кирюшин.– Санкт-Петербург : КВАДРО, 2013.– 679 с.

5. Кирюшин В.И. Экологизация земледелия и технологическая политика / В.И. Кирюшин. – Москва : Изд-во МСХА, 2000. – 473 с.

6. Костычев П.А. Рецензия на книгу г. Советова «О разведении кормовых трав на полях» / П.А. Костычев // Земледельческая газета. – 1869. – № 32. – С. 506–508.

7. Мартынова Н.А. Химия почв: органическое вещество почв : учебно-методическое пособие / Н.А. Мартынова. – Иркутск : Изд-во ИГУ, 2011. – 255 с.

8. Орлов Д.С. Химия почв : учебник для студентов вузов, обучающихся по специальности «Агрохимия и почвоведение» / Д.С. Орлов, Л.К. Садовникова, Н.И. Суханова. – Москва : Высшая школа, 2005. – 557 с.

9. Федотов Г.Н. Гелевые структуры в почвах : автореф. дис. … д-ра биол. наук : 03.00.27 / Г.Н. Федотов. – Москва, 2006. – 32 с.

10. Христенко А.А. Уровень динамического равновесия фосфатных систем пахотных почв / А.А. Христенко // Агрохимия. – 2004. – № 5. – С. 78–84.

11. Чуян О.Г. Формирование физико-химических свойств пахотных почв лесостепи Центрального Черноземья и пути их регулирования : дис. … д-ра биол. наук : 03.02.13 / О.Г. Чуян. – Воронеж, 2010. – 350 с.

12. Эмирусейнов Э.С. Современные представления о почвенных коллоидах и методах их изучения / Э.С. Эмирусейнов, В.А. Хрисониди // Наука XXI века: проблемы, перспективы и актуальные вопросы развития общества, образования и науки : материалы Международной межвузовской осенней науч.-практ. конф. (Россия, Республика Адыгея, пос. Яблоновский, 25 сентября 2020 г.). – Краснодар : ФГБУ «Российское энергетическое агентство» Минэнерго России Краснодарский ЦНТИ, 2020. – С. 329–333.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ
Принадлежность к организации

Дмитрий Игоревич Бережнов – аспирант кафедры агрохимии, почвоведения и агроэкологии ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», Россия, г. Воронеж, e-mail: agrohimi@agronomy.vsau.ru.

Елена Сергеевна Гасанова – кандидат сельскохозяйственных наук, зав. кафедрой агрохимии, почвоведения и агроэкологии ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», Россия, г. Воронеж, e-mail: upravlenieopm@mail.ru.

Константин Егорович Стекольников – доктор сельскохозяйственных наук, профессор кафедры агрохимии, почвоведения и агроэкологии ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», Россия, г. Воронеж, e-mail: agrohimi@agronomy.vsau.ru.

Дата поступления в редакцию 18.11.2020 Дата принятия к печати 26.12.2020

AUTHOR CREDENTIALS
Affiliations

Dmitriy I. Berezhynov, Postgraduate Student, the Dept. of Agrochemistry, Soil Science and Agroecology, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Russia, Voronezh, e-mail: agrohimi@ag.vsau.ru.

Elena S. Gasanova, Candidate of Agricultural Sciences, the Dept. of Agrochemistry, Soil Science and Agroecology, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Russia, Voronezh, e-mail:upravlenieopm@mail.ru.

Konstantin E. Stekolnikov, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, the Dept. of Agrochemistry, Soil Science and Agroecology, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Russia, Voronezh, e-mail: agrohimi@ag.vsau.ru.

Received November 18, 2020 Accepted after revision December 26, 2020