

Фосфатазная активность чернозёма выщелоченного и режим фосфатов в стационарном опыте

К.Е. Стекольников, д.с.-х.н., профессор, А.В. Комова, магистрант, ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ

Одним из необходимых для растений макроэлементов является фосфор, но в отличие от азота и калия он гораздо меньше используется ими из почвы и удобрений. Коэффициент использования фосфора варьирует в очень узком диапазоне и составляет для разных растений 7–21%. В науке и практике давно утвердилось мнение, что дефицит азота определяет уровень плодородия чернозёмов. Вместе с тем ещё в первой половине XX в. академик Д.Н. Прянишников отмечал, что в чернозёмах имеется «... большой запас азота, пока хватит и калия: нужно добавить только один элемент — фосфор, чтобы обновить чернозём, истощённый многовековой культурой без удобрений». Стоит вспомнить и мнение академика А.Е. Ферсмана: «Фосфор — «элемент жизни и мысли» — он будет нужен человечеству всегда, и это необходимо иметь в виду, как сегодня, так и особенно в будущем». Однако запасы фосфорного сырья исчерпаемы в отличие от углеводов, новые месторождения которых открывают и в настоящее время. Ситуация с мировой потребностью в фосфоре определяется сейчас двумя фактами: потребностью в фосфоре любого человеческого организма и его фактическим уровнем использования в современном сельском хозяйстве.

Материал и методы исследования. Фосфатазы относятся к группе ферментов, катализирующих гидролиз ортофосфорных эфиров различных спиртов и фенолов, фосфорорганических соединений, составляющих 20–80% всех запасов фосфора почвы. Фосфатазы осуществляют биохимическую мобили-

зацию органического фосфора — он переводится в доступные для растений формы. Гидролиз идёт по фосфорно-эфирным связям с отщеплением остатков ортофосфорной кислоты. В почве присутствуют кислые (оптимум pH 4,5–5,5) и щелочные (оптимум pH 8,9–9,6) фосфатазы, гидролизующие моноэфиры с образованием минерального фосфора и органического радикала субстрата.

Исследование выполнено в 2012–2016 гг. на стационаре кафедры агрохимии, заложенном в 1987 г. на опытной станции Воронежского ГАУ. Основная характеристика почвы стационара и схема опыта описаны подробно в ранее опубликованных работах [1]. Опыт включал 15 вариантов. Размещение делянок двухъярусное систематизированное. Все культуры севооборота выращивались с учётом агротехнических требований их возделывания в условиях Воронежской области. Минеральные удобрения вносились ежегодно под культуры севооборота. Применялась аммиачная селитра, двойной суперфосфат, хлористый калий. Навоз и фекал вносили один раз за ротацию севооборота под сахарную свёклу.

Дефекат в дозе 28 т/га был внесён в чёрном пару под озимую пшеницу в 1987 г. и повторно в дозе 20 т/га в 1999 г. (начало третьей ротации севооборота) на 13 и 15 вариантах. В 2005 г. (начало четвёртой ротации севооборота) было внесено по 22 т/га дефеката на тех же вариантах. В 2011 г. в паровом поле были внесены только навоз — 40 т/га и минеральные удобрения по схеме опыта. Дефекат не вносился. Поэтому новая ротация севооборота началась без внесения дефеката, что, несомненно, сказалось на динамике почвенных процессов.

Как и в предыдущие годы, для проведения исследования были выбраны шесть вариантов: 1 – контроль абсолютный, 2 – контроль фон (40 т/га навоза), 3 – фон + N₆₀P₆₀K₆₀, 5 – фон + N₁₂₀P₁₂₀K₁₂₀, 13 – фон + 21 т/га дефекаата, 15 – фон + дефекаат + N₆₀P₆₀K₆₀.

Образцы почвы отбирали в июле послойно с шагом 20 см до глубины 1 м. В образцах почвы определяли водорастворимый фосфор по методу Шахтшабеля, подвижные и обменные формы фосфора – по методу Брейя – Куртца, активность фосфатазы, нейтральной, кислой и щелочной [2]. Водорастворимый фосфор является самой доступной его формой, но на практике его определяют достаточно редко. Методом Брейя – Куртца извлекаются подвижные и обменные фосфаты при достаточно низком соотношении почва:раствор, равном 1:7. В методах определения подвижных форм это соотношение достигает 1:20 и более. При этом используются достаточно жёсткие экстрагенты, что, по нашему мнению, приводит к завышенным результатам. Метод Брейя – Куртца рекомендован для анализа кислых, нейтральных и карбонатных почв, что обусловило его использование в исследовании. Ведь изучаемая почва в исходном состоянии имела повышенную кислотность, а в ходе опыта она смещалась как в более кислый диапазон на вариантах абсолютного контроля и с удобрениями, так и в подщелачивание – на вариантах с дефекаатом.

Результаты исследования. В своё время на основе анализа многочисленных данных по соотношению C:N:P в почвах и по зависимости фосфатазной активности почв от концентрации минерального ортофосфата была предложена концепция биохимической минерализации фосфора [3]. Согласно

этой концепции фосфорорганические соединения могут минерализоваться независимо от углерода и азота в результате действия фосфатаз корневых систем растений, активность которых контролируется концентрацией лабильных минеральных фосфатов. Фосфатазы продуцируются при недостатке фосфора и ингибируются при повышении его доступности. Из представленной ранее классической схемы выделяют несколько факторов и составляющих процесса поглощения фосфора почвами [4], для нас интересен последний – поглощение фосфат ионов глинистыми и неглинистыми алюмо-железосиликатами на внешней и внутренней поверхности минералов. Эту возможную связь мы можем косвенно подтвердить коэффициентами корреляции.

В таблице 1 приведены данные определений активности фосфатазы по вариантам опыта за ротацию 6-польного севооборота.

Как уже было отмечено выше, фосфатазы продуцируются при недостатке фосфора и ингибируются при повышении его доступности. Нами получены результаты, вполне согласующиеся с вышеуказанной закономерностью. Для наглядности выявленных закономерностей мы активность на варианте абсолютного контроля принимаем за 100%, а активность фосфатазы на других вариантах выражаем в относительных процентах к абсолютному контролю.

В паровом поле 2011 г. были внесены удобрения по схеме опыта, а дефекаат не вносился. Так как эта работа была выполнена осенью, а образцы почвы отбирали в июле, это сказалось на активности нейтральной фосфатазы. Варианты абсолютного контроля и с минеральными удобрениями ока-

1. Активность нейтральной фосфатазы, P₂O₅, мг/кг

Вариант	Год											
	2011		2012		2013		2014		2015		2016	
	P ₂ O ₅	%	P ₂ O ₅	%	P ₂ O ₅	%	P ₂ O ₅	%	P ₂ O ₅	%	P ₂ O ₅	%
Контроль абсолютный	75	100	83	100	92	100	51	100	50	100	68	100
Фон, 40 т/га навоза	79	105	79	95	62	67	12	23	37	74	60	88
Фон + N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀	75	100	75	90	84	91	44	86	57	115	68	100
Фон + N ₁₂₀ P ₁₂₀ K ₁₂₀	75	100	75	90	84	91	66	129	53	106	68	100
Фон + дефекаат	81	108	82	99	92	100	64	125	70	140	81	119
Дефекаат + N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀	88	117	93	112	101	110	86	169	78	156	72	106
НСР _{0,95}	11,37											

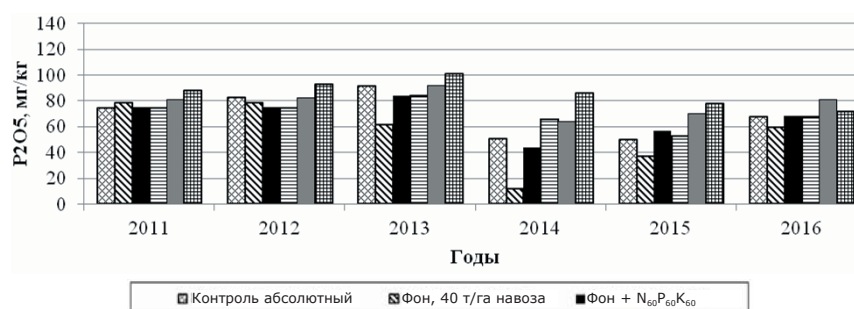


Рис. 1 – Активность нейтральной фосфатазы, P₂O₅, мг/кг

зались одинаковыми по активности нейтральной фосфатазы, а на органическом фоне и вариантах с дефекатом она была выше, т.к. ни навоз, ни дефекаат и одинарная доза не были ещё внесены. Следует отметить, что активность нейтральной фосфатазы варьировала по вариантам опыта в довольно широких пределах: 50–90, 12–79, 44–84, 53–84, 64–92 и 72–101 мг P₂O₅ соответственно. Минимальный дефицит доступного фосфора наблюдался на варианте с органической системой удобрения в 2013–2016 гг. Варианты органо-минеральной системы удобрения по всем годам наблюдений практически не различались, и это при том, что применены были одинарная и двойная дозы минеральных удобрений. Несколько нелогичен результат на вариантах с дефекатом, ведь дефицит доступного фосфора был выше на варианте с дефекатом совместно с одинарной дозой минеральных удобрений. Хотя этому есть и логичное объяснение: скорее всего, на варианте с дефекатом по органическому фону дефицит доступного фосфора в какой-то мере покрывался навозом.

Все закономерности, выявленные нами, хорошо подтверждаются рисунком 1. Отметим, что в

первые три года варианты опыта были мало контрастны по активности нейтральной фосфатазы, а в последующие три года различия проявились довольно резко. Это обусловлено помимо внесения удобрений условиями вегетационных периодов, а они заметно различались.

В таблице 2 приведены данные, характеризующие гидротермические условия за изучаемый период.

Если вегетационный период 2011 г. был резко засушлив, то в последующие 2012 и 2013 гг. – избыточно увлажнён, и с дефицитом увлажнения в 2014 и 2015 гг. Ротация севооборота закончилась в 2016 г. нормальным увлажнением. Именно в годы с засушливым вегетационным периодом мы наблюдаем наибольшую контрастность в активности нейтральной фосфатазы. Дефицит влаги влияет на активность фосфатазы.

Несколько иные закономерности наблюдаются по активности кислой фосфатазы (табл. 3, рис. 2).

Отметим, что максимальные различия активности кислой фосфатазы по вариантам опыта наблюдались в первые три года, а не в последние, как по нейтральной фосфатазе, что хорошо видно

2. Гидротермические условия по годам исследования

Год	Σ t > 10°C					Σ осадков					ГТК				
	вегетац. период	V	VI	VII	VIII	вегетац. период	V	VI	VII	VIII	вегетац. период	V	VI	VII	VIII
2011	2929	530	615	735	629	85	9	22	17	32	0,29	0,17	0,36	0,23	0,51
2012	3518	570	603	623	635	495	22	116	64	185	1,41	0,38	1,93	1,03	1,01
2013	2844	604	636	623	632	506	41	18	83	86	1,78	0,68	0,28	1,34	1,36
2014	2509	564	558	691	676	227	42	99	2	47	0,90	0,74	1,77	0,03	0,69
2015	3037	621	654	612	528	204	51	35	30	29	0,67	0,82	0,53	0,49	0,55
2016	2601	456	546	623	583	289	44	69	67	53	1,11	0,96	1,26	1,07	0,91

3. Активность кислой фосфатазы (рН 5.3), P₂O₅, мг/кг

Вариант	Год											
	2011		2012		2013		2014		2015		2016	
	P ₂ O ₅	%	P ₂ O ₅	%	P ₂ O ₅	%	P ₂ O ₅	%	P ₂ O ₅	%	P ₂ O ₅	%
Контроль абсолютный	66	100	67	100	81	100	82	100	107	100	108	100
Фон, 40 т/га навоза	64	97	56	84	55	58	104	127	112	105	104	96
Фон + N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀	58	88	61	91	57	70	102	124	115	107	83	77
Фон + N ₁₂₀ P ₁₂₀ K ₁₂₀	57	86	47	70	79	97	115	140	114	106	104	96
Фон + дефекаат	89	135	95	142	96	118	121	148	100	93	119	110
Дефекаат + N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀	85	129	99	148	88	109	95	116	111	108	127	118
НСР _{0,95}	14,44											

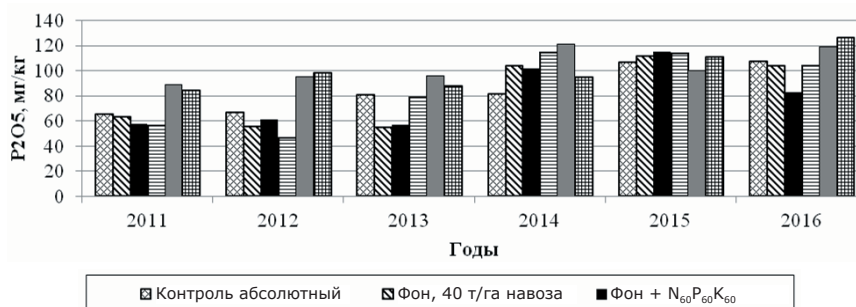


Рис. 2 – Активность кислой фосфатазы (рН 5.3), P₂O₅, мг/кг

на рисунке 2. Но проявилась и общая закономерность – максимальная активность кислой фосфатазы наблюдалась на вариантах с дефекатом. Дефицит доступных форм фосфора на вариантах с дефекатом в первые три года был выражен очень резко. В последующие три года возрос дефицит доступного фосфора и на варианте с органической системой удобрения, что связано с разложением навоза.

Совершенно иные закономерности наблюдались в активности щелочной фосфатазы (табл. 4; рис. 3).

Сразу же отметим, что самая низкая активность щелочной фосфатазы наблюдалась на вариантах с дефекатом. Это вполне логично, ведь на этих вариантах наблюдалась и самая низкая кислотность. Практически по всем годам наблюдений максимальный дефицит доступных форм фосфора был отмечен на варианте органо-минеральной системы удобрения, что обусловлено самым интенсивным подкислением. Наиболее изменчивой активность щелочной фосфатазы была в первые три года (рис. 3), что, скорее всего, связано с засушливостью в начале вегетационного периода: в 2011, 2013 и 2013 гг. ГТК в мае составлял соответственно 0,17; 0,38 и 0,68 В условиях относительно нормального увлажнения 2014–2016 гг. различия активности по вариантам опыта были незначительны.

Представляет интерес и диапазон изменения активности фосфатазы на вариантах опыта и амплитуда колебаний (табл. 5).

На удобренных вариантах активность кислой фосфатазы варьировала в широких пределах с максимальной амплитудой, что обусловлено влия-

нием удобрений. Пределы изменений активности нейтральной и щелочной фосфатазы различаются в несколько раз, однако амплитуда остаётся примерно одинаковой. Следует отметить, что на варианте абсолютного контроля амплитуда колебаний активности всех форм фосфатазы была практически одинаковой, и это вполне объяснимо: удобрения на этом варианте не применялись. Только на вариантах с дефекатом амплитуда колебаний всех форм фосфатазы была в 1,5–2 раза ниже, чем на остальных вариантах опыта.

Уровень активности всех форм фосфатазы определяется содержанием доступного фосфора, и прежде всего самого динамичного во времени – водорастворимого (табл. 6). Содержание водорастворимого фосфора было неодинаковым как по вариантам опыта, так и по годам наблюдений. При резких колебаниях содержания водорастворимого фосфора на варианте абсолютного контроля проявилась явно выраженная тенденция к снижению его в пахотном слое. Внесение органических и минеральных удобрений существенно повышает содержание водорастворимого фосфора. Содержание этой формы фосфора на вариантах с дефекатом было ниже, чем на удобренных вариантах, но поддерживалось на более высоком уровне по отношению к абсолютному контролю. Как уже отмечалось, водорастворимый фосфор является самой его доступной формой. Это убедительно доказывает и корреляционный анализ (табл. 7).

Связь активности кислой фосфатазы с содержанием водорастворимого фосфора была средняя отрицательная. Наиболее тесная связь выявлена

4. Активность щелочной фосфатазы (рН 9.0), P₂O₅, мг/кг

Вариант	Год											
	2011		2012		2013		2014		2015		2016	
	P ₂ O ₅	%	P ₂ O ₅	%	P ₂ O ₅	%	P ₂ O ₅	%	P ₂ O ₅	%	P ₂ O ₅	%
Контроль абсолютный	34	100	42	100	45	100	64	100	69	100	74	100
Фон, 40 т/га навоза	35	103	52	124	50	111	73	114	67	97	75	101
Фон + N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀	49	144	73	174	88	195	64	100	91	132	75	101
Фон + N ₁₂₀ P ₁₂₀ K ₁₂₀	63	185	79	188	93	207	76	119	72	104	84	113
Фон + дефекаат	39	115	38	90	36	80	75	117	78	113	74	100
Дефекаат + N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀	43	126	54	129	48	107	71	111	76	110	73	99
НСР _{0,95}	12,41											

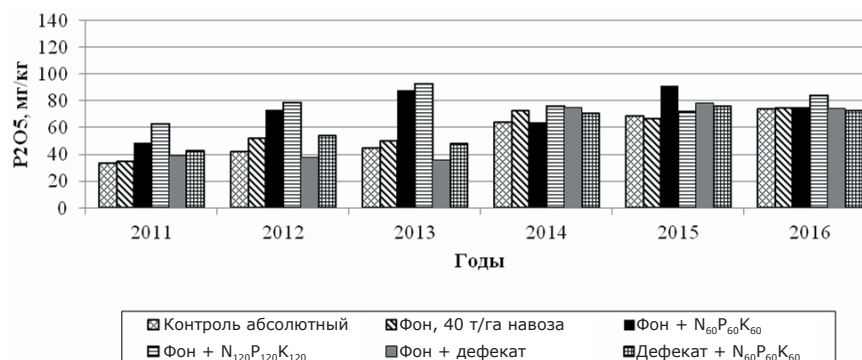


Рис. 3 – Активность щелочной фосфатазы (рН 9.0), P₂O₅, мг/кг

на варианте абсолютного контроля, внесение удобрений и особенно дефеката ослабили её. Связь нейтральной фосфатазы с содержанием водорастворимого фосфора была средняя, а щелочной – средняя отрицательная. На варианте абсолютного контроля установлен максимальный дефицит водорастворимого фосфора, тесная связь всех форм фосфатазы.

В таблице 8 приведены данные по определению подвижного и обменного фосфора. Профиль изучаемой почвы на всех вариантах опыта был резко дифференцирован по содержанию подвиж-

ных и обменных форм фосфора и соответствовал прогрессивно убывающему типу распределения.

Максимальное содержание этих форм фосфора в пахотном слое наблюдалось на вариантах с органической и органо-минеральной системой удобрения. Для этих вариантов было характерно и высокое содержание подвижного и обменного фосфора в подпахотном слое. На этих же вариантах наблюдалась максимальная нисходящая миграция подвижных форм фосфора, а на вариантах с дефекатом она была существенно ниже. Следует отметить и то, что на вариантах с дефекатом содержание

5. Пределы варьирования и амплитуды колебаний активности фосфатазы по вариантам опыта

Вариант	Кислая		Нейтральная		Щелочная	
	пределы варьирования	амплитуда колебаний	пределы варьирования	амплитуда колебаний	пределы варьирования	амплитуда колебаний
Контроль абс.	66–108	42	50–92	42	34–74	40
Фон, 40 т/га навоза	55–112	57	12–79	67	35–75	40
Фон + NPK ₆₀	57–115	58	44–84	40	49–91	42
Фон + NPK ₁₂₀	47–115	68	53–84	41	63–93	30
Фон + дефекат	89–121	32	64–92	28	36–78	42
Дефекат + NPK ₆₀	85–127	42	72–102	29	43–76	33

6. Водорастворимый фосфор по Шахтшабелю (P₂O₅, мг/кг)

Вариант	Слой, см	Год					
		2011	2012	2013	2014	2015	2016
Контроль абс.	0–20	34	42	42	23	10	20
	20–40	16	20	26	22	8	25
	40–60	14	18	14	18	9	16
Фон, 40 т/га навоза	0–20	28	49	35	41	11	34
	20–40	21	35	27	26	33	36
	40–60	10	14	15	21	7	21
Фон + NPK ₆₀	0–20	30	80	72	38	24	84
	20–40	28	33	35	24	10	61
	40–60	11	17	17	23	6	21
Фон + NPK ₁₂₀	0–20	63	84	97	43	16	44
	20–40	52	25	44	28	22	29
	40–60	16	18	21	23	12	26
Фон + дефекат	0–20	38	33	38	30	15	32
	20–40	26	22	22	27	11	58
	40–60	13	12	18	15	4	57
Дефекат + NPK ₆₀	0–20	42	60	43	34	14	32
	20–40	20	23	17	28	9	34
	40–60	13	12	12	17	8	49
НСР _{0,95}		14,1					

7. Коэффициенты корреляции активности фосфатазы с водорастворимым фосфором

Вариант	Водорастворимый P ₂ O ₅		
	кислая	нейтральная	щелочная
Контроль абсолютный	-0,82	0,90	-0,84
Фон, 40 т/га навоза	-0,49	0,20	-0,06
Фон + N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀	-0,50	0,52	0,24
Фон + N ₁₂₀ P ₁₂₀ K ₁₂₀	-0,75	0,96	0,48
Фон + дефекат	-0,21	0,65	-0,73
Дефекат + N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀	-0,46	0,65	-0,71
\bar{r} , r+, r-	0,54; -0,54	0,65; 0,65	0,51; 0,36; -0,58

Примечание: \bar{r} – средний коэффициент корреляции; r+ – средний положительный коэффициент корреляции, r- – средний отрицательный коэффициент корреляции

8. Подвижный и обменный фосфор по Брейя и Куртцу (P₂O₅, мг/кг)

Вариант	Слой, см	Год					
		2011	2012	2013	2014	2015	2016
Контроль абс.	0–20	113	103	116	137	94	53
	20–40	76	59	85	79	51	24
	40–60	53	64	70	31	22	3
Фон, 40 т/га навоза	0–20	163	135	156	167	103	59
	20–40	109	100	104	115	283	36
	40–60	47	84	51	63	58	21
Фон + NPK ₆₀	0–20	179	172	168	171	230	88
	20–40	131	52	133	127	125	19
	40–60	42	71	60	73	98	2
Фон + NPK ₁₂₀	0–20	189	205	181	188	117	147
	20–40	118	71	143	143	178	69
	40–60	59	72	51	56	107	2
Фон + дефека	0–20	139	110	138	160	107	88
	20–40	75	83	51	81	73	34
	40–60	35	45	31	36	15	2
Дефека + NPK ₆₀	0–20	159	60	158	186	114	82
	20–40	97	76	79	86	88	23
	40–60	47	48	48	73	12	5

9. Коэффициенты корреляции активности фосфатазы с подвижным и обменным фосфором

Вариант	P ₂ O ₅ по Брейя – Куртцу		
	кислая	нейтральная	щелочная
Контроль абсолютный	-0,64	-0,01	-0,48
Фон, 40 т/га навоза	-0,53	-0,07	-0,53
Фон + N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀	0,30	-0,20	0,19
Фон + N ₁₂₀ P ₁₂₀ K ₁₂₀	-0,70	0,75	0,03
Фон + дефека	-0,04	-0,22	-0,22
Дефека + N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀	-0,64	0,31	-0,19
r_{P} , г+, г-	0,37; 0,30; -0,46	0,26; 0,65; -0,12	0,27; 0,11; -0,35

подвижного и обменного фосфора было выше, чем на абсолютном контроле, и сравнимо с таковым на варианте с органической системой удобрения.

Активность фосфатазы определяется содержанием доступных форм фосфора, поэтому мы определили коэффициенты корреляции активности фосфатазы с подвижными и обменными формами фосфора (табл. 9).

Связь активности фосфатазы с содержанием подвижного и обменного фосфора средняя отрицательная у кислой фосфатазы, средняя у нейтральной и средняя отрицательная у щелочной. Только на варианте с двойной дозой минеральных удобрений наблюдается тесная отрицательная связь активности нейтральной фосфатазы с содержанием подвижного и обменного фосфора.

Выводы. Выявлена средняя связь различных форм фосфатазы с содержанием водорастворимого,

подвижного и обменного фосфора. Органическая и органо-минеральная системы удобрения повышают содержание доступных форм фосфора. На дефекарированных вариантах содержание доступных форм фосфора выше, чем на абсолютном контроле, и находится на одном уровне с органической системой удобрения. Определение активности фосфатазы позволяет оперативно выявлять дефицит доступных форм фосфора, и её можно использовать для диагностики фосфатного режима почв.

Литература

1. Стекольников К.Е., Ярцева С.С., Комова А.В. Влияние систем применения удобрений на режим фосфатов чернозёма выщелоченного // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2015. № 4 (47). Ч. 2. С. 34–41.
2. Практикум по агрохимии / Под ред. В.Г. Минеева. М.: Изд-во МГУ, 2001. 387 с.
3. Горбунов Н.И. Минералогия и физическая химия почв. М.: Наука. 1978. 294 с.
4. Макаров М.И. Фосфор органического вещества почв. М.: ГЕОС. 2009. 397 с.