

хозяйственных культур и эффективности использования элементов питания растениями // Питание растений: Вестник Международного института питания растений, 2010, №1. – с. 2-7.

Иванова С.Е., Логинова И.В., Танделл Т. Фосфор: механизмы потерь из почвы и способы их снижения // Питание растений: Вестник Международного института питания растений, 2011, №2. – с. 9-12.

Аристархов А.Н. и др. Действие микроудобрений на урожайность, сбор белка и качество продукции зерновых и зернобобовых культур // Агрохимия, 2010, №2. – с. 36-49.

Страпеняни Р.А., Новиков А.И., Стребков И.М., Шапиро Л.З., Кирикой Я.Т. Моделирование закономерностей действия минеральных удобрений на урожай // Вестник с.-х. науки, 1980, № 12. – с. 34-43.

Федосеев А.П. Погода и эффективность удобрений. Ленинград: Ги-

дрометиздат, 1985. – 144 с.

Юркин С.Н., Пименов Е.А., Макаров Н.Б. Влияние почвенно-климатических условий и удобрений на расход основных элементов питания урожая пшеницы // Агрохимия, 1978, № 8. – С. 150-158.

Державин Л.М. Применение минеральных удобрений в интенсивном земледелии. М.: Колос, 1992. – 271 с.

Гармаш Н.Ю., Гармаш Г.А., Берестов А.В., Морозова Г.Б. Микроэлементы в интенсивных технологиях производства зерновых культур // Агрохимический вестник, 2011, № 5. – С. 14-16.

Авторы выражают благодарность вице-президенту МИПР по Восточной Европе и Центральной Азии, кандидату биологических наук Ивановой С.Е. за помощь в подготовке статьи.

Эффективное использование фосфорных удобрений в земледелии

Дж. Джонстон, П. Фиксен и П. Поултон

Для разных типов почв двух континентов была проведена оценка эффективности использования фосфора из удобрений растениями. При этом результаты проведенных в Англии полевых опытов были объединены с агрегированными данными, полученными для отдельных штатов США. Проведенное обобщение позволяет сделать вывод о том, что поведение фосфора в почве и его доступность растениям можно охарактеризовать исходя из «простых» закономерностей. Это согласуется с концепцией, предполагающей существование четырех групп неорганических соединений фосфора в почве.

Фосфор – основной элемент, без которого немислимо существование всех живых организмов. При этом доступные запасы фосфатной руды в мире ограничены. Более 80% добываемых фосфатов после переработки используются для производства продуктов питания. Следовательно, от того, насколько рационально используется фосфор в земледелии зависит, как быстро будут исчерпаны мировые запасы фосфатного сырья. Это особенно важно с учетом растущего потребления фосфорных удобрений вследствие увеличения численности населения. Неэффективное использование фосфора в земледелии служит причиной убытков сельхозпроизводителей.

Поведение фосфора в почве

Свой вклад в решение вопроса о повышении эффективности использования фосфора в земледелии внесли Сайерс с соавт. (Syers и др., 2008), которые пересмотрели сложившиеся представления о поведении фосфора в почве. Они доказали, что существовавшая долгое время точка зрения о необратимой фиксации фосфора почвой несостоятельна для большинства типов почв. По мнению авторов, можно выделить четыре группы неорганических соединений фосфора в почве в зависимости от их доступности для поглощения корневой системой растений и извлекаемости из почв при использовании общепринятых аналитических методов (рис. 1). Первые две группы – это фосфор почвенного рас-

твора (группа 1: очень малое количество фосфора) и легкодоступный растениям фосфор (группа 2). Данные группы составляют незначительную часть от валового содержания фосфора в почве, и их количественная оценка может быть проведена с помощью стандартных вытяжек, широко используемых при проведении массовых агрохимических анализов.

Доступность и экстрагируемость фосфора различных групп в значительной степени определяется природой и прочностью его связи с органо-минеральными компонентами почвы. Важная особенность, отмеченная на рис. 1 для первых трех групп, – это обратимость перехода фосфора из одной группы в другую, что ранее было подробно описано в работе Сайерса с соавт. (Syers и др., 2008). Согласно вышеуказанной концепции, существует критический уровень содержания доступного растениям фосфора, который представлен группами 1 и 2. Оптимальная урожайность сельскохозяйственных культур не достигается при содержании доступного растениям фосфора ниже данного критического уровня. С другой стороны, если содержание доступного растениям фосфора превышает указанный уровень, вносить в почву фосфорные удобрения нецелесообразно (неэффективно).

Эффективность использования фосфора из удобрений растениями

Определить точное количество фосфора, поглощенное растениями из удобрений, можно только

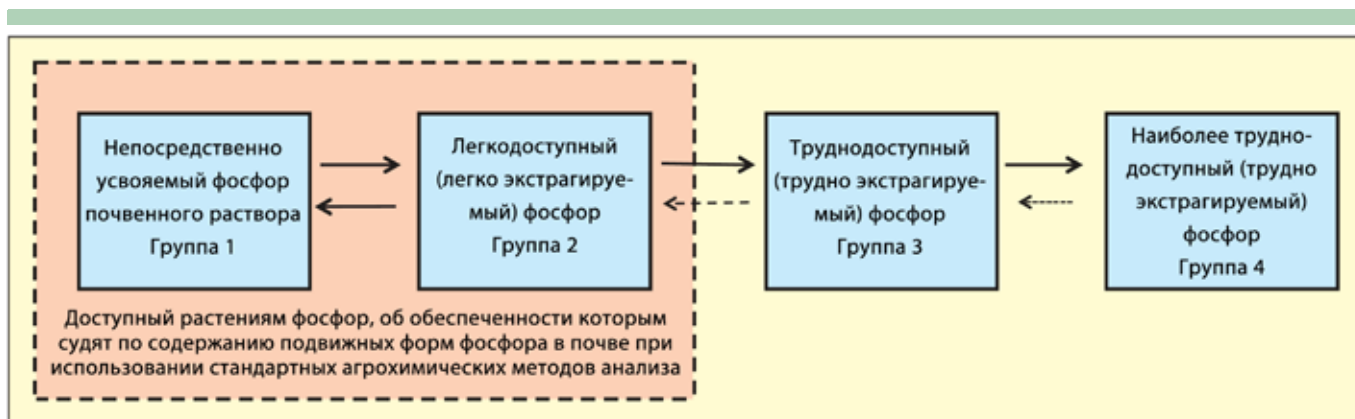


Рис. 1. Концептуальная блок-схема для описания неорганических соединений фосфора в почве, различающихся по доступности растениям и экстрагируемости вытяжками при анализе почв.

с помощью изотопной метки ^{32}P . Однако это дорогостоящее исследование, и, кроме того, изотоп ^{32}P имеет короткий период полураспада. Поэтому, как правило, коэффициент использования фосфора из удобрений растениями (%) определяют разностным методом по следующей формуле:

$$\left(\frac{U_p - U_0}{F_p}\right)100,$$

где U_p и U_0 – вынос фосфора надземной биомассой растений в вариантах с внесением и без внесения фосфорных удобрений соответственно, F_p – доза внесенных фосфорных удобрений.

Согласно литературным данным, коэффициент использования фосфора из удобрений растениями, как правило, находится в диапазоне 10-15% и редко превышает 25%. При столь малых значениях данного показателя применение фосфорных удобрений принято считать неэффективным.

Если в растения переходит лишь незначительное количество фосфора из «свежевнесенных» минеральных и органических удобрений, то остальная его часть должна поступать из почвенных запасов.

Наличие данных резервов может быть связано как с высоким уровнем естественного плодородия почвы, так и с предшествующим внесением фосфора с минеральными и органическими удобрениями. В работе Сайерса с соавт. (Syers и др., 2008) высказано предположение о том, что при возмещении поглощенного растениями фосфора из почвенных запасов достигается столь же эффективное использование «свежевнесенного» фосфора, как и при его непосредственном поглощении растениями. Данная точка зрения базируется на том, что при дозах фосфорных удобрений, близких к выносу фосфора с урожаем основной продукции, суммарное количество фосфатов 1-й и 2-й групп остается неизменным во многих типах почв (рис. 1). Таким образом, для оценки эффективности использования фосфора растениями приемлемо использовать такой показатель, как отношение выноса фосфора с урожаем основной продукции к поступлению фосфора с удобрениями (так называемый балансовый коэффициент использования фосфора из удобрений и почвы), особенно совместно с данными по содержанию доступного растениям фосфора в почве.

Таблица 1. Поддержание содержания подвижного фосфора в почве при возмещении выноса фосфора с урожаем зерна за счет внесения с удобрениями: 4-х летний период полевого опыта по бессменному возделыванию озимой пшеницы (Ротамстедская опытная станция, 2005-2008 гг.).

Показатель	Содержание подвижного фосфора (по методу Олсена) в 2004 г., мг P/кг почвы**				
	9	14	20	23	31
Средняя урожайность зерна за 4 года, т/га	7.6	8.3	8.1	8.5	8.5
Внесение фосфора с удобрениями (всего), кг P/га*	80	80	80	80	80
Вынос фосфора с урожаем зерна (всего), кг P/га	56	68	66	77	75
Баланс фосфора, кг P/га	24	12	14	3	5
Содержание подвижного фосфора (по методу Олсена) в 2008 г., мг P/кг почвы**	8	13	18	24	31
Балансовый коэффициент использования фосфора из удобрений и почвы, %	70	85	82	96	94

* Осеннее внесение 20 кг P/га ежегодно.
** Образцы почвы отбирали осенью.

Эффективность использования фосфора из удобрений при содержании доступного растениям фосфора в почве близком к критическому уровню

Эффективность использования растениями внесенного в почву фосфора, оцененная с помощью балансового коэффициента использования фосфора из удобрений и почвы, зачастую превышает 80% при применении фосфорных удобрений с учетом поддержания содержания подвижных форм фосфора в почве на критическом уровне. В полевом опыте, проведенном на Ротамстедской опытной станции (Великобритания) на пылевато-иловатом суглинке с разной обеспеченностью доступным фосфором (с содержанием подвижных форм фосфора 9-31 мг P/кг почвы по методу Олсена), в течение четырех лет изучали «поддерживающее» внесение фосфорных удобрений под озимую пшеницу (20 кг P/га каждую осень). При увеличении содержания подвижных форм фосфора в почве наблюдалось повышение урожайности зерна (в среднем за годы исследова-

ний), а также выноса фосфора основной и побочной продукцией. Соответственно, снижалась интенсивность баланса фосфора. При максимальной урожайности и внесении доз фосфора, близких к его выносу с урожаем зерна, эффективность использования растениями внесенного в почву фосфора, оцененная с помощью балансового коэффициента использования фосфора из удобрений и почвы, превышала 90% (табл. 1). Аналогичные полевые опыты по поддержанию содержания доступного растениям фосфора в почве на критическом уровне при компенсации выноса фосфора с урожаем за счет внесения фосфорных удобрений проводились и ранее (Halvorson, Black, 1985; McCollum, 1991).

Взаимосвязь между балансовым коэффициентом использования фосфора из удобрений и почвы и содержанием доступного растениям фосфора в почве

Содержание доступного растениям фосфора в почве должно изменяться в зависимости от величины балансового коэффициента использования фосфора из удобрений и почвы. Если величина данного балансового коэффициента равна единице¹, наблюдается баланс между выносом фосфора с урожаем основной продукции и поступлением с удобрениями. При этом содержание доступного растениям фосфора в почве меняется незначительно. Если величина балансового коэффициента больше единицы, вынос фосфора с урожаем основной продукции превышает поступление с удобрениями, и в результате этого происходит истощение запасов данного элемента питания в почве. При содержании доступного растениям фосфора в почве, равном или меньше критического уровня, возрастает риск недополучения урожая сельскохозяйственных культур. Если величина балансового коэффициента меньше единицы (то есть вынос фосфора с урожаем основной продукции ниже поступления с удобрениями), в большинстве типов почв происходит накопление фосфора. При достижении либо незначительном превышении критического уровня содержания доступного растениям фосфора в почве внесение фосфорных удобрений в большинстве случаев следует снизить до доз, компенсирующих вынос фосфора с урожаем основной продукции.

Международный институт питания растений (IPNI) разработал ГИС-систему для оценки использования элементов питания в земледелии (NuGIS: <http://www.ipni.net/nugis>) с целью получения данных о балансе фосфора и сопоставления с содержанием доступного растениям фосфора в почве (Fixen и др., 2010; личные контакты с автором). Например, данные IPNI для северной части Великих равнин США свидетельствуют о том, что в тех штатах, где величина балансового коэффициента использования фосфора из удобрений и почвы была близка к единице, медианное содержание подвижного фосфора

¹ Или 100% при выражении в процентах (примечание редактора).

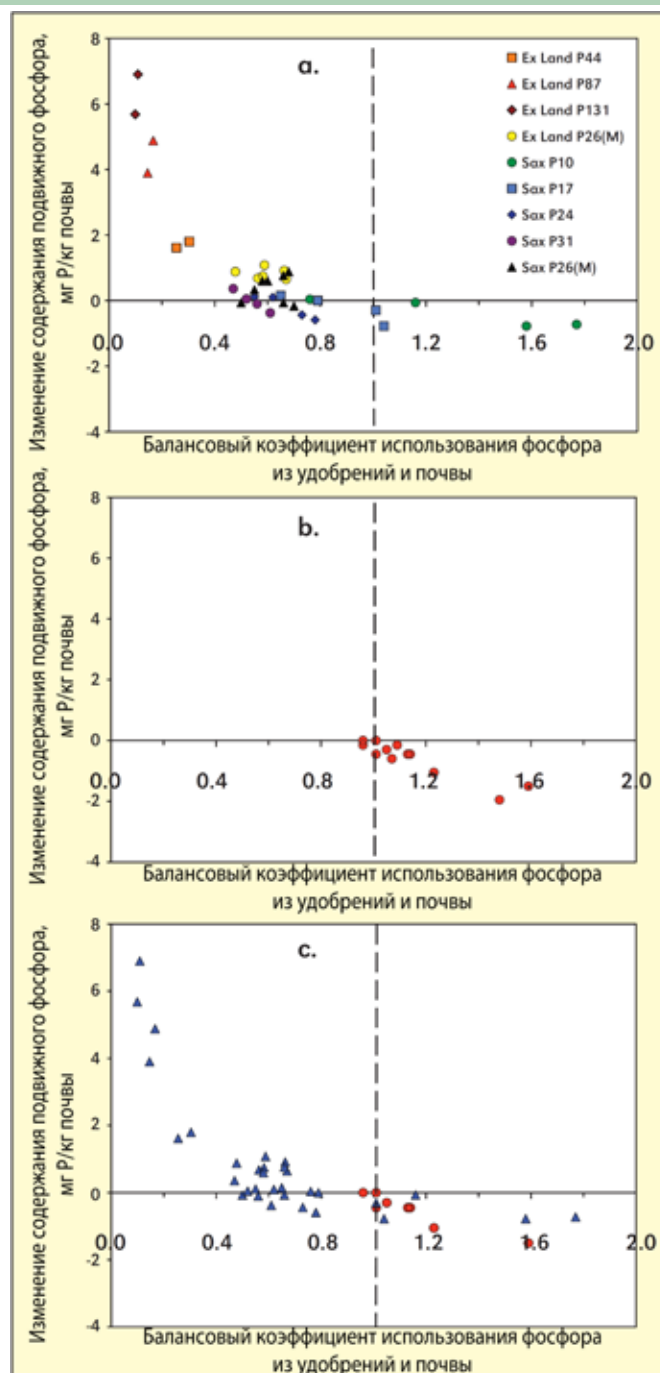


Рис. 2. Среднегодовое изменение содержания подвижного фосфора в почве (по методу Олсена) в зависимости от величины балансового коэффициента использования фосфора из удобрений и почвы (отношение выноса фосфора с урожаем основной продукции к поступлению фосфора с удобрениями):

- a – данные двух многолетних полевых опытов, проводимых в Великобритании [P44 и т.д. – ежегодная доза фосфора; M – доза фосфора, компенсирующая вынос с урожаем основной продукции];
- b – данные для 12-ти штатов США (П. Фиксен, личные контакты);
- c – объединенные данные для США (●) и Великобритании (▲).

Ex Land = Бессменная озимая пшеница
Sax = Опыт в Саксмундхаме

в почве по методу «Брей-1» оставалось практически неизменным (в 340 тыс. почвенных образцах, проанализированных в данных штатах за три года). Данные табл. 1 (Ротамстедская опытная станция) и

Таблица 2. Балансовый коэффициент использования фосфора из удобрений и почвы и содержание подвижного фосфора (по методу «Брей-1») в трех штатах США.

Штат	Балансовый коэффициент использования фосфора из удобрений и почвы			Медианное содержание подвижного фосфора, мг P/кг почвы		
	2002	2007	Среднее	2001	2005	2010
Монтана	0.97	1.04	1.01	12	14	14
Северная Дакота	1.07	0.94	1.01	10	11	11
Южная Дакота	1.02	0.91	0.97	11	14	13

Примечание: поступление фосфора с удобрениями учитывало его использование из внесенного навоза; таблица подготовлена исходя из базы данных NuGIS по состоянию на 12.01.2012 (см. пояснения в тексте).

табл. 2 (США) свидетельствуют о том, что при величине балансового коэффициента использования фосфора из удобрений и почвы, близком к единице, и практически неизменном содержании доступного растениям фосфора в почве достигается очень высокая эффективность использования фосфорных удобрений, о чем ранее сообщалось Сайерсом с соавт. (Syers и др., 2008).

На рис. 2а представлены балансовые коэффициенты использования фосфора из удобрений и почвы (в основном они были менее единицы), а также изменения в содержании подвижного фосфора в почве по методу Олсена, полученные в двух длительных полевых опытах Ротамстедской опытной станции. Между двумя вышеуказанными показателями наблюдается тесная нелинейная зависимость, описываемая полиномиальной функцией со значением коэффициента детерминации $R^2 = 0.84$.

На рис. 2б аналогичным образом представлена зависимость между изменением в содержании доступного растениям фосфора в почве и величиной балансового коэффициента использования фосфора из удобрений и почвы для 12-ти штатов «кукурузного пояса» США, исходя из базы данных NuGIS. При этом поступление фосфора рассчитывалось с учетом его использования из внесенного в почву навоза. Кроме того, путем умножения на коэффициент 0.75 данные по содержанию подвижного фосфора, полученные при использовании метода «Брей-1», были переведены в соответствующие им величины по содержанию подвижного фосфора по методу Олсена. Несмотря на некоторую неточность единичных наблюдений, связанную с принятыми допущениями, в результате усреднения большого количества индивидуальных значений для каждого штата была получена приемлемая аппроксимация, представленная одной точкой на рис. 2б. Между рассматриваемыми показателями наблюдается линейная зависимость ($R^2 = 0.85$). В большинстве случаев величина балансового коэффициента использования фосфора из удобрений и почвы была больше единицы (то есть наблюдался отрицательный баланс фосфора и происходило истощение почвенных запасов фосфора).

Визуальное сравнение представленных на рис. 2а и рис. 2б результатов указывает на схожий характер зависимостей, поэтому нам представляется особенно интересным объединение обеих совокупностей данных, как это сделано на рис. 2с. Мы специально не стали показывать на графике аппроксимирующую линию, поскольку возможны два

варианта анализа данных. Согласно первому варианту, полученная зависимость может быть описана логарифмической функцией ($R^2 = 0.84$). Согласно второму подходу, можно выделить два прямолинейных участка, а именно: первый (нижний массив данных) – для почв с небольшим поступлением фосфора ($R^2 = 0.63$) и второй – для шести типов почв с высоким поступлением фосфора ($R^2 = 0.84$). Независимо от выбранного подхода к математическому описанию полученной зависимости, следует обратить внимание на то, что она объединяет данные для совершенно разных типов почв двух континентов – результаты полевых опытов, проведенных в Англии, а также агрегированные показатели по штатам США. Возможность использования единой модели для описания комбинированных данных – это убедительный аргумент в пользу того, что поведение фосфора в изученных почвах и его доступность растениям можно охарактеризовать исходя из «простых» закономерностей. Это согласуется с концепцией, предполагающей существование четырех групп неорганических соединений фосфора в почве. Данная концепция была предложена Сайерсом с соавт. (Syers и др., 2008) и в дальнейшем детально рассмотрена Джонстоном с соавт. (Johnston и др., 2014).

Дж. Джонстон – старший научный сотрудник Фонда Лооза (Lawes Trust), П. Поултон – приглашенный научный сотрудник Ротамстедской опытной станции, г. Харпенден, Великобритания; e-mail: johnny.johnston@rothamsted.ac.uk.

Д-р Фиксен – старший вице-президент и директор по НИР Международного института питания растений; e-mail: pfixen@ipni.net

Литература

- Fixen, P.E., T.W. Bruulsema, T.L. Jensen, R. Mikkelsen, T.S. Murrell, S.B. Phillips, Q. Rund, and W.M. Stewart. 2010. *Better Crops with Plant Food* 94(4):6-8.
- Halvorson, A.D. and A.L. Black. 1985. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49:933-937.
- Johnston, A.E., P.R. Poulton, P.E. Fixen, and D. Curtin. 2014. *Adv. Agron.* 123:177-228.
- McCollum, R.E. 1991. *Agron. J.* 83:77-85.
- Syers, J. K., A.E. Johnston, and D. Curtin. 2008. *FAO Fertilizer and Plant Nutrition Bulletin* 18. FAO-UN. 107pp.

Редактирование перевода с английского: В.В. Носов.