

(Heffer, 2009). Таким образом, производство пшеницы потребляет около 15% от общего количества применяемых минеральных удобрений в мире, при этом 83% минеральных удобрений под пшеницу были внесены в 10 ведущих странах-производителей.

В период между 1991 и 1995 гг. Франция и Германия начали сокращать применение минеральных удобрений, и в настоящее время вносят удобрений меньше, чем в начале 90-х годов 20-го века на 34 и 23% соответственно. (рис. 5). Австралия также сократила применение удобрений под пшеницу на 18% по сравнению с 2000 г. Самый значительный рост в применении удобрений произошел в Индии, Пакистане, России и Китае – на 40–46% за последние 15 лет (рис. 5). В Канаде и Турции применение удобрений в последние годы остается почти стабильным, а в США оно сократилось на 6% по сравнению с периодом 1996–2000 гг. Из-за отсутствия данных по внесению минеральных удобрений по каждой с/х культуру, невозможно сделать вывод о том, под какие культуры были снижены дозы внесения.

В Китае, Пакистане и России периоды роста урожайности совпадают с периодами роста применения минеральных удобрений, что подтверждает значительную роль достаточного питания растений для достижения стабильной урожайности пшеницы. Однако соотношение между увеличением количества применяемых минеральных удобрений и соответствующим ростом урожайности зерна пшеницы свидетельствует о неоптимальном уровне применения удобрений в этих странах в настоящее время. Дозы удобрений – только один из компонентов стратегии «4-х правил применения удобрений», которая включает внесение необходимых видов удобрений в оптимальной дозе, наиболее подходящем способом в нужное место и время. Эти правила зависят друг от друга, и если хоть одно из них нарушено, то и другие не могут быть выполнены.

Заключение

Основным фактором, определявшим рост производства зерна пшеницы в мире, было увеличение урожайности, а не посевных площадей. Среди мер, направленных на улучшение технологии возделывания пшеницы и способствовавших росту урожайности, было увеличение применения минеральных удобрений. Благодаря этому урожайность возросла, но для поддержания высокого уровня производства зерна пшеницы в мире будет необходимо постоянно пересматривать дозы внесения минеральных удобрений. Вызов будет состоять в том, чтобы добиться увеличения производства продуктов питания в будущем, применяя минеральные удобрения рационально.

Д-р Филлипс – региональный директор программы IPNI по юго-востоку США; sphillips@ipni.net.

Д-р Нортон – региональный директор программы IPNI по Австралии и Новой Зеландии; e-mail: rnorton@ipni.net.

Литература

- Braun, H.J., G. Atlin, and T. Payne. 2010. In: Reynolds, C.R.P. (ed.). *Climate change and crop production*, CABI, London, UK.
- FAOSTAT. 2012. [online] available at <http://faostat.fao.org>.
- Heffer, P. 2009. *International Fertilizer Industry Association*. Paris, France
- IFADATA, 2012. [online] available at <http://www.fertilizer/Homepage/STATISTICS>.
- Rosegrant, M.W. and M. Agcaoili. 2010. *International Food Policy Research Institute*, Washington, D.C., USA.

Перевод с английского и адаптация: Иванова С.Е.

Использование результатов многолетних полевых опытов, проводимых в зерновых севооборотах, для повышения плодородия почв и совершенствования агротехники возделывания пшеницы

Б. Арналл, Ф. Гарсия

Многолетние полевые опыты проводятся по всему миру, и их результаты широко используются. К сожалению, по разным причинам количество длительных полевых опытов постоянно сокращается. Получаемые в этих опытах ценнейшие данные можно сравнить с «золотыми самородками», так как они позволяют совершать новые интересные открытия. В данной статье приведено несколько подобных примеров – проанализированы результаты многолетних полевых опытов с пшеницей, которые проводятся в Канаде, США и Аргентине.

Север Великих равнин

В 1967 г. на юго-востоке провинции Саскачеван (Канада) вблизи г. Свифт-Каррент был заложен полевой опыт, который называют «Ста-

рым севооборотом» («Old Crop» rotation). Свифт-Каррент расположен в наиболее засушливой части канадских прерий, где вегетационный период очень короткий из-за длительных и холодных зим (Pelton et al. 1967). В данной статье рассматривает-

ся четыре из 12-ти вариантов, изначально заложенных в 1967 г.: внесение азотно-фосфорных и одних фосфорных удобрений под бессменную пшеницу («монокультура-NP», «монокультура-P») и в севообороте пар – пшеница – пшеница («севооборот-NP», «севооборот-P»). В вариантах с внесением фосфорных удобрений в почву ежегодно поступает 9-10 кг P/га. Приводимые ниже данные и графические зависимости были опубликованы Селлесом с соавт. (Selles et al., 2011).

Для анализа временных трендов полученные данные были сгруппированы по трем периодам, выделенным с учетом степени дефицита влаги: 1967-1979, 1980-1993 и 1994-2005 гг. Содержание подвижного фосфора (в слое почвы 0-15 см), определяемого по методу Олсена, достоверно изменялось по вариантам опыта за вышеуказанные три периода. В течение первых 12-ти лет между рассматриваемыми вариантами не было различий. Они

появились во время 2-го периода – содержание подвижного фосфора в почве достоверно повысилось под бессменной пшеницей по сравнению с севооборотом, поскольку в первом случае фосфорные удобрения применялись чаще. В 3-ем периоде содержание подвижного фосфора в почве было достоверно ниже в варианте «севооборот-NP» по сравнению с остальными вариантами опыта. Положительный баланс фосфора (внесение с удобрениями минус вынос с зерном) был значительно выше при монокультуре пшеницы, чем в севообороте. За рассматриваемый период под бессменную пшеницу было внесено на 43 кг P/га больше по сравнению с севооборотом. Баланс фосфора в севообороте значительно ухудшился во 2-ом периоде, если сравнивать с 1-ым периодом, и также был значительно хуже, чем под бессменной пшеницей. К 3-ему периоду варианты «севооборот-P» и «монокультура-NP» характеризовались одинаково положительным балансом фосфора, а наиболее высокие показатели баланса наблюдались в варианте «монокультура-P». В рассматриваемом периоде баланс фосфора стал отрицательным в варианте «севооборот-NP», однако содержание подвижного фосфора в почве все еще достоверно превышало исходное значение при закладке опыта.

Для запасов подвижного фосфора в почве (метод Олсена) были также проанализированы временные изменения (рис. 1). В течение первых 20-ти лет опыта во всех вариантах наблюдался линейный положительный тренд. В дальнейшем восходящий тренд сохранился только при внесении одних фосфорных удобрений – в вариантах «монокультура-P» и «севооборот-P». При этом запасы подвижного фосфора в почве увеличивались соответственно на 0.68 и 0.45 кг P/га/год. При внесении азотно-фосфорных удобрений восходящий линейный тренд, наблюдавшийся в течение первых 20-ти лет опыта, обеспечивал прирост на 0.64 и 0.56 кг P/га/год соответственно в вариантах «монокультура-NP» и «севооборот-NP», а затем запасы подвижного фосфора в почве стабилизировались (рис. 1).

Во многих длительных полевых опытах за счет расщепления опытных делянок можно ввести дополнительные варианты, что и было сделано в опыте «Старый севооборот». В 1993 г. исследователи решили расщепить делянки вариантов с внесением фосфорных удобрений, чтобы добавить новые варианты – без последующего внесения фосфора. Прекращение применения фосфорных удобрений не отразилось на урожайности зерна пшеницы, возделываемой в севообороте, однако при бессменном выращивании урожайность зерна снизилась на 10% (табл. 1). Селлес с соавт. (Selles et al., 2011) отмечали, что снижение урожайности при бессменных посевах не было постоянным, однако как в варианте «монокультура-NP», так и в варианте «монокультура-P» при прекращении внесения фосфора было 2 года, когда урожайность снизилась более чем на 35%.

Результаты опыта свидетельствуют о том, что остаточный фосфор удобрений, накопленный в по-

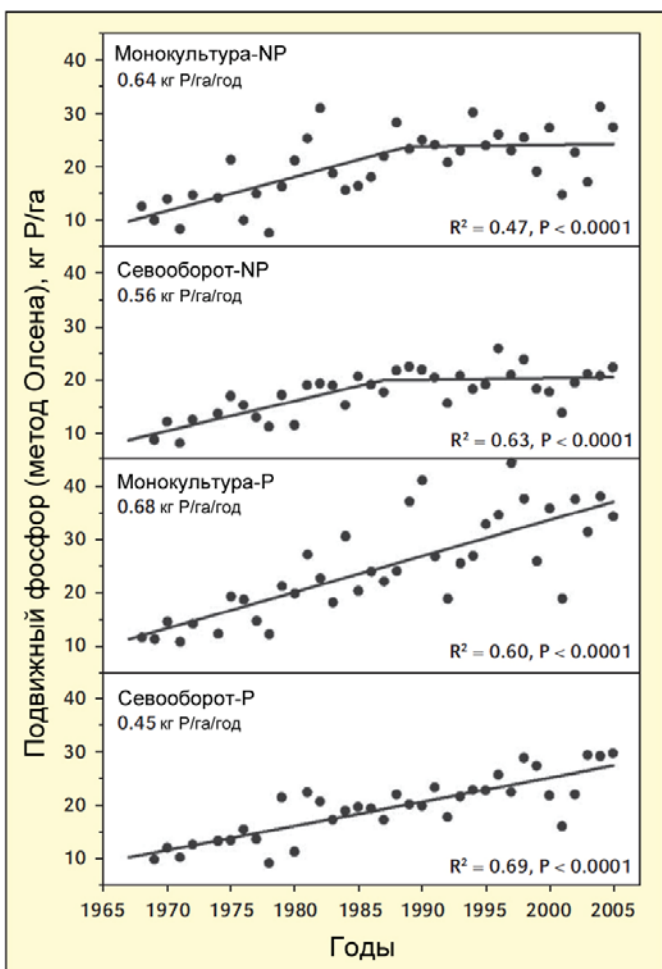


Рис. 1. Тенденции изменения запасов подвижного фосфора в почве (метод Олсена) за 1967-2005 гг. в изначально заложенных вариантах многолетнего опыта (Канада). [Уравнения зависимостей: «монокультура-NP» при ≤ 22 лет: $y = 9.9 + 0.64 \times \text{количество лет}$, далее: $y = 9.9 + 0.64 \times \text{количество лет} - 0.61 \times (\text{количество лет} - 22)$; «севооборот-NP» при ≤ 20 лет: $y = 8.9 + 0.56 \times \text{количество лет}$, далее: $y = 8.9 + 0.56 \times \text{количество лет} - 0.59 \times (\text{количество лет} - 20)$; «монокультура-P»: $y = 11.5 + 0.68 \times \text{количество лет}$; «севооборот-P»: $y = 10.4 + 0.45 \times \text{количество лет}$]. Рисунки из публикации Селлеса с соавт. (Selles et al., 2011).

Таблица 1. Изменение суммарного сбора зерна пшеницы за период 1994-2005 гг. после прекращения внесения фосфорных удобрений в многолетнем опыте (Канада).

Вариант опыта	Сбор зерна, т/га	
	Фосфор продолжал вноситься	Фосфор перестал вноситься
Монокультура-NP	29.1	26.3*
Монокультура-P	19.8	18.7*
Севооборот-NP	21.3	21.0
Севооборот-P	18.0	16.8
НСР	1.8	

* Достоверные различия между вариантами с внесением и прекращением внесения фосфора при $P < 0.05$.

чве в течение предыдущих 27-ми лет (1967-1993 гг.), оставался в легкодоступных для растений формах. Это подтверждает вывод, согласно которому невнесение фосфорных удобрений на почвах с высокими остаточными запасами фосфора редко ведет к снижению продуктивности сельскохозяйственных культур (Selles et al., 2011).

Центр Великих равнин

В штате Оклахома (США) проводится несколько длительных полевых опытов с озимой пшеницей, включая так называемые «делянки Магрюдера» (Magruder Plots). Это старейший длительный полевой опыт с пшеницей на Западе США – регионе, расположенном к западу от р. Миссисипи. Приводимые ниже данные были получены в многолетнем полевом опыте с внесением NPK под бессменную озимую пшеницу, заложенном на северо-западе штата Оклахома в 1971 г. В своем обобщении мы остановимся на результатах, полученных в 6-ти вариантах опыта с внесением возрастающих доз азота – от 0 до 112 кг/га с шагом 22.4 кг. В каждом варианте ежегодно вносится 20 кг P/га и 56 кг K/га.

За более чем 30-летний период урожайность зерна в варианте без внесения азота изменялась в диапазоне 0.75-2.84 т/га, составив в среднем 1.78 т/га. В варианте с внесением 112 кг N/га (самая высокая доза азота) минимальная урожайность составила 1.42 т/га, а максимальная – 5.94 т/га при среднем значении за 30 лет, равном 2.96 т/га. Стандартное отклонение урожайности в указанных двух вариантах опыта составило соответственно 0.55 и 1.00 т/га. Для того, чтобы показать общие тенденции, мы сгруппировали результаты опыта по 5-летним периодам. В первую очередь рассмотрим прибавку урожайности при применении азотных удобрений, которая рассчитывалась как разница в урожайности между вариантами с внесением и без внесения азота. Прибавка урожайности от внесения азота увеличивалась со временем, за исключением начала 1980-х гг. (рис. 2). Если для каждого 5-летнего периода сопоставить максимальную урожайность, полученную в благоприятный год (вариант

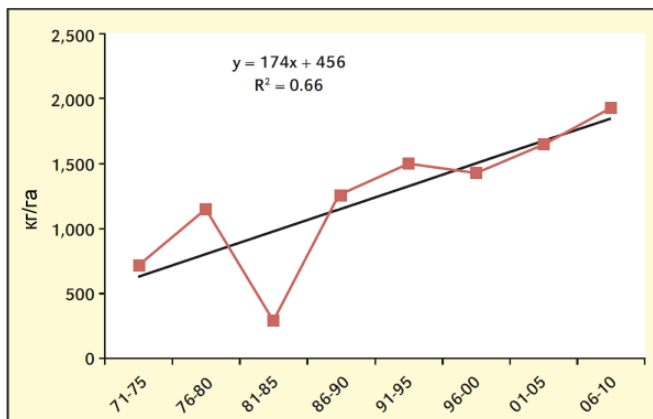


Рис. 2. Прибавка урожайности от внесения азота по 5-летним периодам в многолетнем опыте (США). Расчет прибавки: урожайность в варианте с внесением азота в дозе 112 кг N/га минус урожайность в варианте N0.

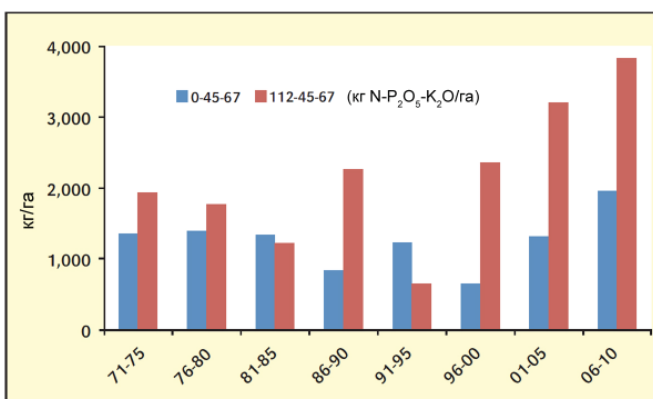


Рис. 3. Разница между максимальной и минимальной урожайностью для 5-летних периодов многолетнего опыта (США).

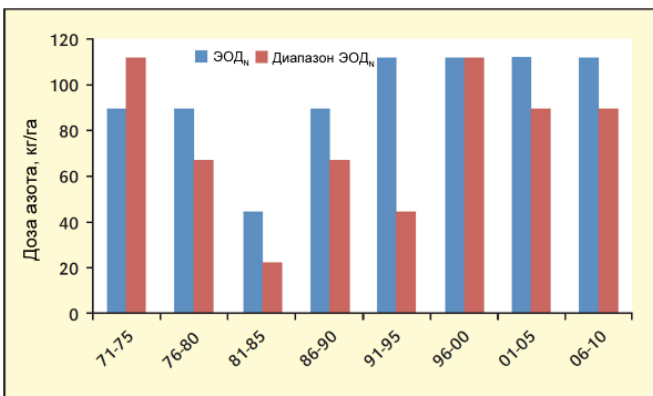


Рис. 4. Экономически оптимальная доза азота (ЭОД_N) и ширина диапазона ЭОД_N для 5-летних периодов многолетнего опыта (США).

N112P45K67), и минимальную урожайность, полученную в неблагоприятный год (вариант P45K67), то также отмечается рост прибавки урожайности от азота со временем. За последние три периода (1995-2000, 2001-2005 и 2006-2010 гг.) вышеуказанная разница в урожайности составила соответственно 2.36, 3.20 и 3.83 т/га (рис. 3). Полученные результаты свидетельствуют о том, что вероятность как избыточного внесения, так и недовнесения азота повышается с увеличением вариабельности такого показателя, как вынос азота из почвы с урожаем. Экономически оптимальная доза азота (ЭОД_N)

рассчитывалась ежегодно. Анализ, проведенный по 5-летним периодам, показывает, что ЭОД_N не меняется с начала 1990-х гг., оставаясь равной 112 кг N/га (рис. 4). Однако, с конца 1990-х гг. ширина диапазона ЭОД_N для 5-летних периодов достигает 90 кг N/га и даже больше (рис. 4).

В штате Оклахома доза азота рассчитывается на планируемую урожайность озимой пшеницы, которая определяется по формуле: средняя урожайность за предыдущие 5 лет плюс 20-процентный прирост. Использование данного подхода привело к избыточному внесению 1672 кг N/га за период 1976-2011 гг. Расчет доз азота, исходя из ЭОД_N для 5-летних периодов, снизил бы избыточное внесение азота до 1187 кг N/га или на 30% по сравнению с общепринятым подходом.

Результаты длительного опыта свидетельствуют не только об увеличении потенциала урожайности озимой пшеницы на Великих равнинах, но и о повышении отзывчивости растений на применение азотных удобрений со временем. Данное повышение произошло в основном благодаря селекции новых улучшенных сортов озимой пшеницы и совершенствованию технологий ее выращивания. Что еще более важно, изучена временная вариабельность таких показателей, как максимальная урожайность и потребность растений в азоте при данном уровне урожайности. Полученные результаты указывают на необходимость проведения диагностики питания растений в период вегетации для того, чтобы скорректировать дозу азота, исходя из состояния растений и почвенно-климатических условий.

Пампасы Аргентины

Исследования, проводимые в пампасах Аргентины, – наименее длительные из рассматриваемых в данной статье полевых опытов. В отличие от двух вышеописанных примеров, проект по изучению плодородия почв в Аргентине включает 11 опытов, которые проводятся на фермерских полях. Опыты входят в Сеть по питанию растений Региональных консорциумов по сельскохозяйственным исследованиям (Regional Consortia for Agricultural Experimentation, CREA) Юга провинции Санта-Фе и проводятся в трех провинциях: Санта-Фе, Кордова и Буэнос-Айрес. CREA – это объединение фермеров, задача которого состоит в разработке технологий возделывания сельскохозяйственных культур, изучения способов обработки почвы и систем управления агротехнологиями в хозяйстве. Распространение полученной информации – это также одна из задач данной организации.

Мы разделили 11 опытов на 2 группы в соответствии с севооборотами: кукуруза – пшеница/соя (пожнивная соя) и кукуруза – соя – пшеница/соя. В опытах изучается 6 вариантов: 1) контроль, 2) PS, 3) NS, 4) NP, 5) NPS и 6) полное удобрение (NPS + K, Mg, B, Cu и Zn). Дозы внесения элементов питания под зерновые культуры на 10% превышают вынос элементов питания из почвы с урожаем зерна, за исключением азота, дозы которого рассчитываются в соответ-

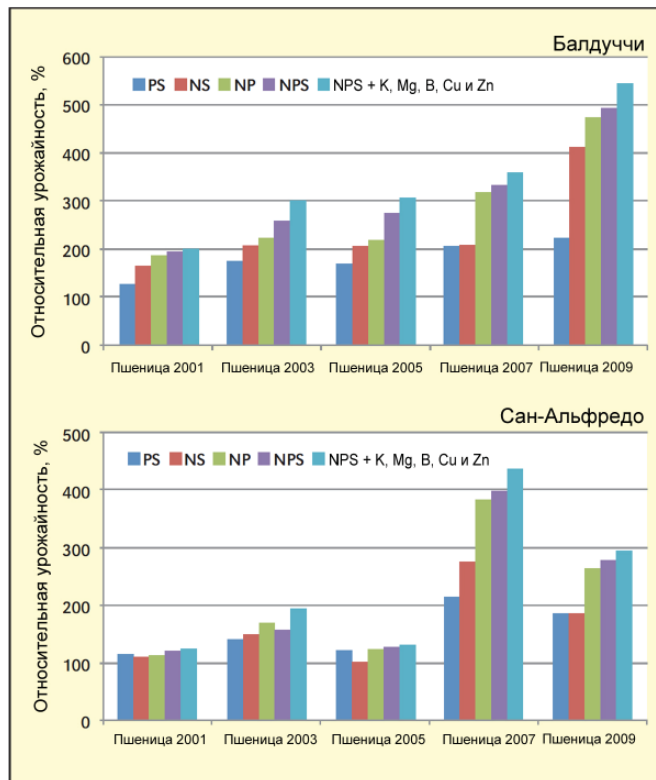


Рис. 5. Относительная урожайность зерна пшеницы в вариантах с внесением удобрений при возделывании в севообороте кукуруза – пшеница/соя: опыты в Балдуччи и Сан-Альфредо (Аргентина). Урожайность в контроле принята за 100%.

ствии с региональными рекомендациями, исходя из содержания нитратного азота в почве при посеве.

Гарсия с соавт. (García et al., 2007) опубликовал обобщение результатов опытов за первые 6 лет с момента закладки в 2000 г. или за 33 опытолет для пшеницы: 5 сезонов возделывания в опытах с севооборотом кукуруза – пшеница/соя и 3 сезона – в опытах с севооборотом кукуруза – соя – пшеница/соя. Была проанализирована взаимосвязь между отзывчивостью растений на внесение элементов питания с удобрениями и обеспеченностью почвы данными элементами питания. Из 33-х опытолет 16 характеризовались значимой прибавкой урожайности от внесения азота; 25 – фосфора; 6 – серы; 20 – азота, фосфора и серы и 4 – остальных элементов питания (García et al., 2010).

Прибавка урожайности от внесения азота значительно коррелировала с содержанием нитратного азота в почве при посеве (в слое 0-60 см), а также с содержанием нитратного азота в соке растений в фазу кущения. Для получения урожая зерна пшеницы в 4 т/га сумма запасов нитратного азота в почве при посеве и азота, вносимого с удобрениями, должна составлять 130-140 кг N/га. В 95% опытов при содержании подвижного фосфора, определяемого по методу «Брей 1», менее 15 мг P/кг почвы растения отзывались на внесение фосфорных удобрений. К аналогичному выводу пришли Берардо (Berardo, 1994) и Замунер с соавт. (Zamuner et al., 2004), проводившие исследования в южной части пампасов. Критический диапазон содержания подвижного фосфора в почве составил 15-20 мг P/кг почвы. Не было выявлено взаимосвязи

между прибавкой урожайности пшеницы от внесения серы и содержанием сульфатной серы в почве при посеве, как это наблюдалось в других полевых опытах, проведенных в пампасах Аргентины (García, 2004). В тоже время была установлена взаимосвязь между прибавкой урожайности кукурузы от внесения серы и содержанием сульфатной серы в почве при посеве (в слое 0-20 см).

Разница в урожайности пшеницы между удобренными вариантами и контролем со временем увеличилась, позволяя тем самым предположить, что, помимо изменений в содержании подвижного фосфора, произошли и другие изменения в состоянии почвенного плодородия. Увеличение вышеуказанной разницы связано не только со снижением урожайности в контрольном варианте, но также и с ростом урожайности в удобряемых вариантах. На рис. 5 показан рост отзывчивости пшеницы на внесение удобрений со временем, наблюдавшийся в двух полевых опытах с севооборотом кукуруза – пшеница/соя.

Разница в содержании подвижного фосфора (метод «Брей 1») между вариантами с внесением и без внесения фосфорных удобрений со временем увеличивалась. Обобщение результатов исследований за 10 лет (2000-2011 гг.) свидетельствует о ежегодном повышении содержания подвижного фосфора на 1.9-3.1 мг P/кг почвы в вариантах опытов с внесением фосфорных удобрений. В вариантах с внесением азотно-серных удобрений содержание подвижного фосфора снижалось на 0.50-1.0 мг P/кг почвы в год.

Выводы

Согласно результатам многолетнего полевого опыта, проводимого в условиях юго-запада канадских прерий с низким количеством осадков («Старый севооборот», г. Свифт-Каррент, Канада), фосфор удобрений может оставаться в почве в подвижной форме при положительном балансе фосфора. Поэтому запасы подвижного фосфора в почве, накопленные за счет систематического внесения фосфорных удобрений в предыдущие годы, могут помочь сельхозпроизводителям в период высоких цен на фосфорные удобрения. Длительный полевой опыт, который проводится в центральной части Великих равнин США (штат Оклахома), позволил выявить изменения как потенциальной урожайности, так и потребности озимой пшеницы в азоте. Опыты на фермерских полях, проводимые CREA (объединения фермеров) в центральной части пампасов Аргентины, продемонстрировали, что определение содержания нитратного азота и подвижного фосфора (метод «Брей 1») в почве позволяет адекватно выявить поля, где следует ожидать отзывчивости растений на применение азотных и фосфорных удобрений. В то же время, определение содержания сульфатной серы в почве дает мало информации о возможной отзывчивости пшеницы на применение серных удобрений. Представленное краткое обобщение результатов длительных полевых опытов,

которые проводятся в Северной и Южной Америке, свидетельствует о глобальной значимости подобных исследований для совершенствования наших представлений о стратегиях повышения плодородия почв и улучшения системы применения удобрений под пшеницу.

Д-р Арналл – ассистент-профессор по точному применению удобрений кафедры растениеводства и почвоведения Университета штата Оклахома (США); e-mail: b.arnall@okstate.edu.

Д-р Гарсия – Директор Международного института питания растений по Югу Латинской Америки; e-mail: fgarcia@ipni.net.

Представленные в данной статье материалы были изначально опубликованы в работе Селлеса с соавт. (Selles F., Campbell C.A., Zentner R.P., Curtin D., James D.C., Basnyat P., 2011) «Эффективность использования фосфора из удобрений и тенденции многолетних изменений в содержании доступного фосфора в почве при системах возделывания пшеницы с применением и без применения азотных удобрений». Канадский журнал по почвоведению (2011), 91: 39-52. Частично перепечатано с разрешения Сельскохозяйственного института Канады.

Литература

- Berardo, A. 1994. Boletín Técnico No. 128. EEA INTA Balcarce.
- García, F. 2004. En Actas Congreso "A Todo Trigo". Mar del Plata, Argentina. 13 and 14 May 2004. FCEGAC. pp. 55-62.
- García, F., M. Boxler, J. Minteguiaga, R. Pozzi, L. Firpo, G.D. Marin, and A. Berardo. 2007. Better Crops Vol 91 3: 11-13.
- García, F., M. Boxler, J. Minteguiaga, R. Pozzi, L. Firpo, I. Ciampitti, A. Correndo, F. Bauschen, A. Berardo and N. Reussi Calvo. 2010. Resultados y conclusiones de los primeros diez años 2000-2009. 2a. ed. AACREA. Buenos Aires, Argentina. ISBN 978-987-1513-07-9. 64 p.
- Pelton, W.L., C.A. Campbell, and W. Nicholaichuk. 1967. In Proc. of Hydrol. Symp. 6, Soil moisture. National Research Council of Canada, Ottawa, ON. pp. 241-263.
- Selles, F., C.A. Campbell, R.P. Zentner, D. Curtin, D.C. James, and P. Basnyat. 2011. Can. J. Soil Sci. 91:39-52.
- Zamuner, E., H.E. Echeverría, and L.I. Picone. 2004. Actas CD XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Paraná, Entre Ríos. AACCS.

Перевод с английского и адаптация: В.В. Носов.

