

Рациональное использование удобрений

Дж. Б. Боул и С. К. А. Дансо*

Неорганические удобрения стали играть важную роль в обеспечении растущего населения земного шара продуктами питания. За период продолжительности жизни человека население земного шара удваивается, и перед сельским хозяйством стоит труднейшая задача — удовлетворить потребности человечества в продуктах питания. Сельское хозяйство добилося замечательных успехов в решении этой задачи. За последние 15 лет урожаи большинства сельскохозяйственных культур увеличились более чем в два раза. Производство зерна возросло на 150% (табл. 1). К сожалению, более половины этого прироста может быть отнесено на счет поступлений, черпаемых из невозобновляемых источников — неорганических удобрений [1].

Производство удобрений в мире выросло с 8 млн. т в конце второй мировой войны до 113 млн. т в 1978 году. Согласно прогнозу Организации Объединенных Наций по промышленному развитию (ЮНИДО), который был составлен до повышения цен на энергию, производство удобрений к 2000 году должно возрасти до 300 млн. т. Мрачная перспектива десятикратного увеличения цен на энергию, а также предположение о том, что энергетические ресурсы, вероятно, не всегда можно будет использовать для производства удобрений, заставляют внести в подобные оценки некоторые коррективы.

Развивающиеся страны более всего нуждаются в увеличении производства пищевых продуктов. На эти страны приходится 60% площадей, отводимых в мире под зерновые, но при этом перед ними стоит задача накормить 73% населения земного шара, составляющего 4,4 млрд. человек. В период с начала 1960-х годов по 1978 (табл. 1) темпы роста производства и использования удобрений в развивающихся странах были значительно более быстрыми, чем в развитых странах. В результате урожаи зерна возросли более чем в два раза, однако не отставал и рост населения, и поэтому производство зерна на душу населения в итоге увеличилось незначительно. Ближайшее будущее вызывает у развивающихся стран подлинную тревогу. Там, где потребность в продуктах питания ощущается наиболее остро, разрыв между спросом и предложением растет.

В развивающихся странах неорганические удобрения являются дорогостоящими ресурсами. Как правило, их приходится импортировать, что отражается на скудных резервах иностранной валюты этих государств. Удобрения могут быть единственным сырьем,

для приобретения которого фермеру требуется твердая валюта. Поэтому весьма важно добиваться использования удобрений с максимальной эффективностью так, чтобы каждая хозяйственная единица производила дополнительное количество пищевых продуктов. Тогда появится заинтересованность в использовании удобрений, и больше пищевых продуктов будет производиться именно там, где в них существует наиболее острая потребность. Усилия Объединенного отдела ФАО/МАГАТЭ направлены на оказание содействия развивающимся странам в этой области.

Таблица 1. Годовой расход удобрений ($N + P_2O_5 + K_2O$) и ежегодное производство зерна [2]

	Развивающиеся страны		Развитые страны	
	1961-65	1978	1961-65	1978
Производство удобрений (млн. т)	2,7	19,7	37,9	93,0
Расход удобрений (кг/га возделываемой земли)	7,6	39,4	50,6	115,1
(кг/чел.)	2,3	9,4	33,1	67,5
Производство зерна (млн. т)	289	745	344	851
(кг/га возделываемой земли)	464	1100	542	1310
(кг/чел. день)	0,53	0,64	1,36	2,02

Агрономы должны рекомендовать оптимальные дозы, формы, методы и сроки внесения питательных веществ для каждой сельскохозяйственной культуры и для почвенных и климатических условий, в которых должна возделываться эта сельскохозяйственная культура. Такие данные не могут быть получены без проведения всесторонних исследований. Опыт, накопленный Объединенным отделом ФАО/МАГАТЭ, показывает, что наиболее эффективным способом получения требуемой информации является непосредственное измерение эффективности усвоения удобрений. Измерения такого характера могут быть осуществлены только путем меченых питательных веществ удобрения определенным изотопом. К счастью, существуют радиоизотопы фосфора, серы, кальция, цинка, железа, марганца и ряда других элементов, входящих в состав питательных веществ. Стоимость стабильного изотопа азот-15 и оборудования для его анализа за последние годы снизилась в такой степени, что в настоящее время на опытных делянках широко практикуются исследования с удобрениями, содержащими меченый изотопом азот.

* Г-н Боул — руководитель Секции плодородия почв, ирригации и возделывания сельскохозяйственных культур Объединенного отдела ФАО/МАГАТЭ; г-н Дансо — сотрудник этой секции.



Исследование усвоения азота растениями с помощью ядерных методов — применение удобрения, меченого изотопом азот-15.

Эффективное использование удобрений

Первая международная программа координированных исследований по-прежнему является наглядным примером того, как меченые изотопы, содержащиеся в удобрениях, можно использовать для решения практических задач. Многочисленные исследования показали, что злачные культуры усваивают содержащие фосфор (Р) удобрения более эффективно в том случае, когда при посеве культур удобрения вносятся вблизи семян, чем в случае, когда производится разбросное внесение удобрений и они оказываются равномерно включенными в поверхностный слой почвы. Однако предпринятые в рамках Международной комиссии по рису попытки разработать наиболее эффективный метод внесения фосфорного удобрения под затопляемый рис оказались безуспешными. Сельскохозяйственное подразделение МАГАТЭ, которое впоследствии было преобразовано в Объединенный отдел ФАО/МАГАТЭ, приступило к осуществлению координированных исследований с использованием фосфатного удобрения, меченого фосфором-32.

Полученные результаты оказались определенными, недвусмысленными и неожиданными. На всех девяти делянках, где был проведен эксперимент, поверхностное внесение фосфата или рыхление с целью внесения удобрений на небольшую глубину оказались в равной мере эффективными и в два раза более эффективными, чем внесение удобрения под семена в лунку или между рядками риса [3]. Столь убедительные результаты можно было получить только с помощью меченого удобрения.

Еще одно исследование, проведенное в полевых условиях на затопляемом рисе в рамках той же программы координированных исследований, но при этом с использованием удобрений, меченных азотом-15, позволило получить почти столь же впечатляющие результаты (см. фотографию выше). Нитратные источники азота, которые обычно характеризуются весьма высокой эффективностью в отношении злачных культур, оказались практически бесполезными на 14 из 15 делянок при внесении удобрений под рис при высадке рассады. По своей эффективности сульфат аммония и мочевина, в которых азот содержится в форме аммония, равнозначны и значительно превосходят натриевую селитру. Аммиачная селитра оказалась промежуточной по эффективности, поскольку половина азота в ней находится в форме нитрата.

Когда азот вносился в поливную воду за две недели до начала примордиального развития, явно обнаруживались те же самые тенденции, а доля азота растения, полученного от удобрения, оказалась большей, чем в случае, когда удобрение вносилось при посадке.

Повышение эффективности усвоения азота из азотного удобрения при его внесении в вегетационный период, а не в момент высадки рассады или вскоре после нее, было также отмечено при проведении исследований на семи рисовых делянках в рамках еще одной программы координированных исследований [4]. Азотное удобрение вносилось четыре раза в вегетационный период: в момент высадки рассады; через три недели после высадки рассады; за неделю до начала примордиального развития; на

стадии образования листьев удлинённой формы. Каждый раз применялись одинаковые варианты внесения удобрений, однако при каждом внесении в одном из четырех вариантов растения получали удобрения, меченные азотом-15, тогда как в остальных трех вариантах применялись немеченные удобрения. Это позволило измерить эффективность усвоения удобрений при каждом внесении. Затем производились уборка рисовых растений и последующий анализ содержания азота-15 на различных стадиях зрелости (до восьми стадий) с целью определения фактического момента усвоения внесенного удобрения.

Усвоение внесенного азота происходило весьма быстро. Азот, внесенный до начала примордиального развития, уже использовался в максимальной степени на стадии появления листьев удлинённой формы задолго до начала колошения. Азот, внесенный на стадии образования удлинённых листьев, безусловно, поглощался сразу же, поскольку его использование уже достигало максимума при первой последующей выборке — на стадии колошения.

Однако информация, наиболее интересная с точки зрения оценки эффективности использования удобрений, заключалась в том, что азотные удобрения, внесенные на стадии образования удлинённых листьев, использовались рисом в два раза более эффективно, чем удобрения, внесенные в момент высадки рассады или через три недели после этого.

Специалисты Международного научно-исследовательского института риса (МНИР) считают, что цинковая недостаточность представляет собой наиболее распространенное нарушение питания затопляемого риса на Филиппинах, и признают, что с этой проблемой сталкиваются и в большинстве других культивируемых рис странах. Недавно Объединенный отдел ФАО/МАГАТЭ провел исследования с помощью изотопов роли питательных микроэлементов, в особенности цинка, в выращивании риса. Полевые эксперименты, проведенные в девяти рисоводческих странах, показали, что внесение только 5 кг цинка на 1 га в форме $ZnSO_4$ полностью исключило недостаточность цинка и обеспечило поступление до 89% цинка, содержащегося в зернах риса. Удвоение вносимых доз до 10 кг на 1 га не дало дополнительного эффекта. Там, где исследования можно было проводить на одной и той же делянке в течение нескольких лет, указанное небольшое количество внесенного цинка оставалось эффективным во второй и в третий урожайные сезоны, обеспечивая накопление около 30% общего количества цинка на второй год и от 15 до 20% — на третий год [5]. Другие исследования, проведенные в рамках этой программы, показали, что цинковые удобрения могут вноситься различными способами с одинаковой эффективностью и что использование более дорогостоящих хелатных соединений цинка для подкормки затопляемого риса дало незначительные преимущества или вообще их не дало.

Четыре указанных исследования представлены как примеры программ полевых опытов, которые привели к изменению практических приемов внесения удобрений во многих районах мира. Указанные

результаты не удалось бы получить или они были бы не в такой степени убедительными без прямого измерения эффективности усвояемости удобрений растениями. Использование изотопов являлось единственным прямым методом.

Результаты многих подобных исследований с применением изотопов были недавно подытожены Объединенным отделом ФАО/МАГАТЭ и опубликованы ФАО для специалистов сельского хозяйства [6]. Аналогичные методы используются в настоящее время международными группами ученых в исследованиях, координируемых Объединенным отделом ФАО/МАГАТЭ и имеющих целью разработать практические приемы внесения удобрений при выращивании смешанных культур, когда бобовые и зерновые высеваются совместно, а также для определения влияния агрохимикатов на эффективность использования удобрений.

Экономический эффект от использования подобных результатов представляется внушительным. Согласно оценкам, полученным в стране, которая принимала участие в исследовательской программе по использованию азотных удобрений для подкормки кукурузы, применение фермерами приемов внесения удобрений, которые были признаны наиболее эффективными в соответствии с результатами исследований по программе, позволило получить прибыль в размере 36 млн. долл. США. В Шри-Ланке добились повышения урожайности кокосовых пальм при *уменьшении* количества вносимых удобрений. Возможна еще большая экономия, так как исследования показали, что при использовании более совершенных приемов, разработанных на основании достоверных результатов проведенных опытов, расход удобрений, используемых в настоящее время во всех странах мира, можно сократить на 50%.

Альтернативные источники питательных веществ

Конечное решение проблемы удовлетворения растущих потребностей в неорганических удобрениях для производства пищевых продуктов состоит в том, чтобы заменить удобрения другими, менее дорогостоящими, доступными на месте источниками питательных веществ. В природе имеются связи, посредством которых определенные растения могут с помощью соответствующих микроорганизмов использовать для своего роста часть газообразного азота (N_2), составляющего 80% атмосферы. Такое использование растениями газообразного азота называют биологической фиксацией азота (БФА). Во многих странах имеются источники природных фосфатов, которые при внесении в некоторые почвы и в определенных условиях могут заменять фосфатные удобрения. С помощью особой ассоциации микробов и корневой системы растений, называемой микориза, растение может использовать содержащиеся в породах фосфаты или формы фосфора, а также другие почвенные питательные вещества, которые недоступны растениям, не имеющим микоризы. В будущем эта ассоциация может играть такую же важную роль, как БФА сегодня. Изотопные методы могут быть использованы во всех исследованиях



Другой эксперимент с использованием удобрения, меченного азотом-15, для определения наиболее эффективного способа применения удобрений при выращивании рисовых культур.

подобного рода, однако в качестве примера будет рассмотрено изучение процессов фиксации азота.

Биологическая фиксация азота трудно поддается измерению, поскольку, как только азот попал в растение, обычно невозможно определить источник его поступления: удобрение, почва или атмосфера. Сравнение количеств азота, усвоенных фиксирующими и нефиксирующими растениями, дает неточную оценку БФА, поскольку растения, в особенности принадлежащие к различным группам, зачастую усваивают разные количества почвенного азота. Попытки метить газообразный азот изотопом азот-15 дали неоднозначные результаты, так как камера, содержащая N_2 , обычно создает помехи росту растения.

Восстановление ацетилена до этилена микроорганизмами, связанными с корневой системой растений, можно измерить с высокой точностью. Поскольку та же самая ферментная система, восстанавливающая N_2 до NH_4^+ , восстанавливает также ацетилен до этилена, то этот метод был использован для оценки БФА. К сожалению, данный метод характеризуется многими ограничениями, одно из которых состоит в том, что оценка действительна лишь в течение короткого периода и только для тех условий, в которых было проведено измерение. Даже при проведении большого числа измерений биологическую фиксацию азота не удастся точно экстраполировать на весь период роста.

Поэтому сотрудники Объединенного отдела ФАО/МАГАТЭ и группа сельского хозяйства Зейберсдорфской лаборатории Агентства разработали методы для полевых условий, с помощью которых можно, применяя изотопные методы [7], количественно определить БФА на протяжении вегетационного периода.

Этот метод успешно использовался в исследованиях, координируемых Объединенным отделом ФАО/МАГАТЭ и имеющих целью количественно определить увеличение БФА при различных приемах возделывания сельскохозяйственных культур. Применение в Венгрии фосфатных удобрений (105 кг Р/га) позволило увеличить фиксацию азота в соевых бобах с 7 до 71 кг N/га. В Индии благодаря использованию улучшенных штаммов *Rhizobium* БФА в соевых бобах возросла с 79 до 102 кг N/га; внедрение усовершенствованных методов инокуляции в Гане увеличило фиксацию азота земляными орехами с 82 до 106 кг N/га. Содержащийся в удобрении азот обычно снижает БФА, хотя общее усвоение азота может увеличиваться, особенно в случаях, когда БФА не максимизирована. Однако в Египте, вопреки ожиданиям, БФА у кормовых бобов повысилась при внесении азотного удобрения, и несмотря на то, что в Румынии и Сенегале БФА у соевых бобов снизилась, результаты позволяют предполагать, что некоторые виды соевых бобов и определенные штаммы *Rhizobium* могут быть менее чувствительны к высоким уровням содержащегося в удобрении азота, чем другие

Таблица 2. Использование $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, меченного азотом-15, для измерения фиксации азота бобовой культурой

Культура и место возделывания	Количество внесенного меченого азота (кг/га)	Другие виды обработки	Фиксация азота (кг/га)
Соевые бобы Венгрия	40	0 кг P/га при посадке	7
	40	35 кг P/га при посадке	42
	40	70 кг P/га при посадке	62
	40	105 кг P/га при посадке	71
Соевые бобы Индия	20	без инокуляции	79
	20	с инокуляцией	102
Земляной орех Гана	15	без инокуляции	82
	15	инокуляция семян	94
	15	инокуляция в почве	100
	15	инокуляция в почве + В + Мо	106
Кормовые бобы Египет	17,5	—	20
	35	—	26
	70	—	34
	140	—	33
Соевые бобы Румыния	20	Штамм	78
	20	Штамм	71
	20	Мультиштаммовый инокулянт	107
	100	Штамм	64
	100	Мультиштаммовый инокулянт	41
Соевые бобы Сенегал	20	Сорт 44А73	33
	100	Сорт 44А73	19
	100	Сорт 4173	2
	100	Сорт "Юпитер"	34

(табл.2). Поэтому, возможно, удастся выявить бобовые ассоциации, которые позволят максимизировать БФА и устранить борьбу за азот, содержащийся в удобрениях, при уплотненном посеве бобов вместе со злаками.

Сейчас многие возлагают надежды на фундаментальные научные открытия, которые приведут к созданию небобовых сельскохозяйственных культур, способных получать азот путем БФА. Недавние достижения в области исследования переноса рекомбинант-ДНК позволяют надеяться, что в конце концов удастся создать такие растения. Объединенный отдел ФАО/МАГАТЭ предполагает применять изотопные методы, которые оказались эффективным инструментом исследований по максимизации БФА у бобовых культур, на этих новых растениях, когда они появятся.

Список литературы:

- [1] von Peter *Fertilizer requirements in developing countries* The Fertilizer Society, Proc. No. 188, London (1980).
- [2] *FAO 1979 production yearbook* FAO, Rome (1980).
- [3] *FAO 1978 fertilizer yearbook* FAO, Rome (1979).
- [4] *Rice fertilization* Technical Reports Series No. 108, IAEA, Vienna (1970).
- [5] *Isotope studies on rice fertilization* Technical Reports Series No. 181, IAEA, Vienna (1978).
- [6] *Zinc fertilization of flooded rice* TECDOC-242, IAEA, Vienna (1981).
- [7] *Maximizing the efficiency of fertilizer use by grain crops* Fertilizer Bulletin No. 3, FAO, Rome (1980).
- [8] M. Fried and H. Broeshart *An independent measure of the amount of nitrogen fixed by a legume crop* Plant and Soil 43, pp. 707–711 (1974).