



**IPNI**  
МЕЖДУНАРОДНЫЙ  
ПИТАНИЯ РАСТЕНИЙ  
ИНСТИТУТ

# Эффективность фосфорных удобрений

2015



---

# Содержание

Концепция повышения продуктивности сельскохозяйственных культур и эффективности использования элементов питания растениями.....	2
Индустрия минеральных удобрений: соответствие концепции «4-х правил».....	7
Чему нас учат длительные полевые опыты?.....	10
Проблема повышения точности диагностики фосфатного состояния почв Украины.....	15
Фосфор: механизмы потерь из почвы и способы их снижения.....	18
Роль органического вещества почвы в получении высоких урожаев и повышении эффективности использования азота и фосфора растениями.....	21
Новый подход к оценке эффективности использования фосфора из удобрений в сельском хозяйстве.....	25
Роль элементов питания в повышении урожайности яровой пшеницы в Сибири.....	29
Состав стартовых удобрений и способы их внесения при возделывании кукурузы по ресурсосберегающим технологиям.....	32
Использование результатов многолетних полевых опытов, проводимых в зерновых севооборотах, для повышения плодородия почв и совершенствования агротехники возделывания пшеницы.....	34
Система применения удобрений под пшеницу в условиях изменчивого климата.....	38
Динамика поглощения элементов питания современными гибридами кукурузы.....	42
Эффективное использование фосфорных удобрений в земледелии.....	46
Содержание подвижных форм фосфора в черноземах обыкновенных Ростовской области и эффективность использования фосфора из удобрений растениями кукурузы.....	55
Повышение агрохимической эффективности комплексных фосфорсодержащих удобрений за счет гуматной добавки.....	52
Поступление фосфора в поверхностный сток при весеннем снеготаянии на севере Великих равнин.....	59
Признаки дефицита фосфора у сельскохозяйственных культур.....	64

---

# Концепция повышения продуктивности сельскохозяйственных культур и эффективности использования элементов питания растениями

Пол И. Фиксен

Удовлетворение потребностей в сельскохозяйственной продукции и решение многих из наиболее важных экологических проблем имеют глобальное значение, и необходимо тесно увязывать повышение продуктивности растениеводства с минимизацией воздействия на окружающую среду. Совместное решение этих задач является, вероятно, единственно верным стратегическим подходом который потребует тесного взаимодействия и взаимопонимания между отдельными научными дисциплинами, странами, а также между государственным и частным сектором. Ниже представлены три концепции, реализация которых может способствовать указанному взаимодействию:

- Концепция «4-х правил» применения удобрений: внесение лучшей формы удобрения в оптимальной дозе, в необходимые сроки и наиболее подходящим способом – концепция, основанная на комплексном подходе, поскольку разработанные на ее основе технологии позволяют не только решать задачи каждого конкретного хозяйства, но и повышают эффективность и устойчивость производства продукции растениеводства в целом.

- Имитационные модели формирования урожая: разработанные в последнее время модели позволяют оценить нереализованный потенциал продуктивности сельскохозяйственных культур и улучшить агротехнику их возделывания в условиях повышения изменчивости климата.

- Глобальные сети данных: расширение использования электронных технологий, облегчающих сбор данных в единую глобальную сеть, доступ к этим данным и их анализ ускоряет накопление новых знаний в области агрономии и питания растений и способствует их скорейшему применению на практике.

## Важная роль почвенного плодородия в производстве продукции растениеводства и сохранении окружающей среды

Три основных фактора, с которыми человечество будет сталкиваться в ближайшие десятилетия, – это питание населения Земли, круговорот углерода (C) и земельные ресурсы (рис. 1). О двух из них – углероде и земельных ресурсах – недавно вдохновенно говорил д-р Генри Джанзен в своем докладе на Международном симпозиуме по динамике органического вещества почвы (Janzen, 2009). Такие процессы, как изменение климата, получение дешевой энергии, а также биоэнергетика, связаны с геохимией углерода. Говоря о земельных ресурсах, подразумевают эффективность использования земель, ка-



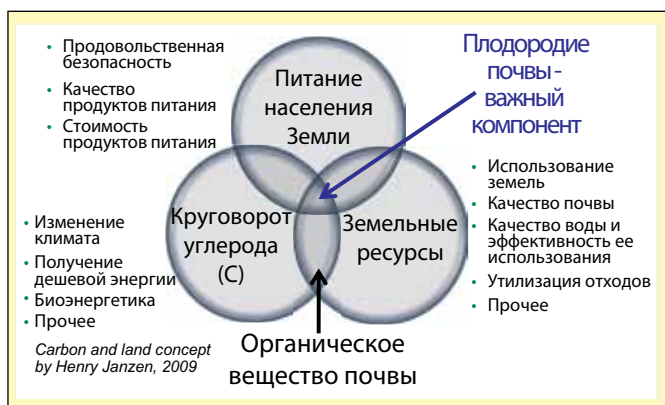
Продуктивность земель и круговорот углерода сильно зависят от почвенного плодородия

чественные характеристики почв, эффективность использования воды и ее качество, а также утилизацию различных отходов. Д-р Джанзен проницательно указал на то, что органическое вещество почвы является «общей основой» для вышеназванных двух глобальных факторов. С добавлением третьего фактора, связанного с питанием населения Земли, рассматриваемая система дополняется такими параметрами, как продовольственная безопасность, качество продуктов питания и их стоимость. При обсуждении управления минеральным питанием растений важно учитывать, что плодородие почвы является значимым компонентом «общей основы» для всех трех вышеназванных фундаментальных факторов. Также важно понимать, как управление питанием растений влияет на обеспечение человечества продуктами питания, качество земельных ресурсов, а также круговорот углерода.

## Продуктивность растениеводства и эффективность использования элементов питания из удобрений

Общеизвестно, что процесс устойчивого развития подразумевает одинаковый акцент на экономических, социальных и экологических аспектах развития. В свою очередь, устойчивое управление минеральным питанием растений включает применение таких систем возделывания сельскохозяйственных культур, которые удовлетворяют этим трем составляющим устойчивого развития.

Важнейшая цель мирового сельского хозяйства – одновременное повышение продуктивности растениеводства и эффективности использования элементов минерального питания растениями. Это



**Рис. 1.** Факторы, лежащие в основе главных вызовов наступающих десятилетий

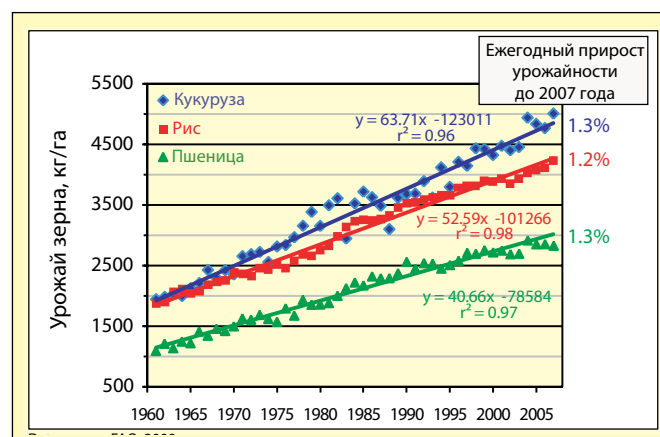
необходимо для удовлетворения растущих потребностей мирового сообщества в продовольствии, волокнах растительного происхождения, биотопливе в условиях возрастающей озабоченности относительно влияния сельского хозяйства на качество воды и воздуха, а также в условиях глобальных финансовых потрясений. Стремление повысить эффективность использования растениями элементов питания из удобрений без роста продуктивности увеличивает нагрузку на остальные земли, которые могут быть менее пригодными для эффективного выращивания сельскохозяйственных культур, поскольку на этих землях придется получать больше продукции. Аналогично, стремление увеличить продуктивность путем расточительного использования ресурсов, оказывает негативное влияние на окружающую среду и ведет к тому, что на остальных землях придется уменьшить воздействие на окружающую среду, возможно, даже в ущерб продуктивности.

При стремлении одновременно повысить и продуктивность сельскохозяйственных культур, и эффективность использования элементов питания растениями важно понимать, как определяется данный показатель эффективности. Не так давно Доберманн (Dobermann, 2007) сделал обзор методов оценки эффективности использования элементов питания растениями и дал интерпретацию результатов. Автор также обобщил мировые данные по эффективности использования элементов питания основными культурами в современных условиях, обращая внимание на то, что на полях фермеров в среднем за год растения часто используют менее 40% азота, внесенного с азотными удобрениями, однако в лучших хозяйствах этот показатель был гораздо выше. Для иллюстрации того, как можно неверно истолковать данные по эффективности использования растениями элементов питания из удобрений, Доберманн приводит результаты 6-летнего полевого опыта с орошаемой бессменной кукурузой, проведенного в американском штате Небраска для изучения рекомендованной и интенсивной систем применения удобрений при, соответственно, рекомендованной и высокой густоте стояния растений. В этом исследовании, где интенсивная технология возделывания высокоурожайной кукурузы сравнивалась с рекомендованной для данно-

го региона технологией, показатель производства зерна на единицу внесенного азота<sup>1</sup> при интенсивной технологии оказался значительно ниже, чем при рекомендованной. Это связано с тем, что при интенсивной системе возделывания кукурузы применение азотных удобрений способствовало увеличению содержания органического вещества почве, и после учета накопления азота в почве данная система практически сравнялась с рекомендованной по вышеуказанному показателю. Доберманн отмечает, что в перспективе такое увеличение содержания азота в почве приводит к снижению потребности в азотных удобрениях и, соответственно, росту показателя производства зерна на единицу внесенного азота. Подобный эффект особенно заслуживает внимания при стремлении повысить продуктивность за счет внедрения интенсивных методов выращивания, когда используются новые технологии, отличающиеся от традиционных технологий, применяемых на опытных участках или на полях фермеров. Если с изменением технологий возделывания равновесное состояние органического вещества почвы сдвигается, иммобилизация элементов питания или минерализация органического вещества почвы могут повлиять на эффективность использования элементов питания из удобрений.

По некоторым оценкам, мировая потребность в продовольствии удвоится в течение последующих 30-ти лет (Glenn et al., 2008). В этом случае ее ежегодный прирост за указанный период составит свыше 2.4%. Согласно другим прогнозам, к 2030 г. потребность в продовольствии вырастет на 50%, т.е. ежегодный прирост составит 1.8% (Evans, 2009). Устойчивое удовлетворение таких потребностей – это сложнейшая задача, для решения которой потребуется тесное взаимодействие и согласованность между разными отраслями знаний, странами, между государственным и частным секторами. Масштабы данной задачи можно оценить, сравнив прогнозируемый рост потребности в продовольствии с динамикой урожайности зерновых культур до 2007 г., которая соответствует линейной зависимости с ежегодным приростом от 1.2 до 1.3% в течение почти полувека (рис. 2 и 3). Рассматриваемые далее три концепции могут способствовать взаимодействию

<sup>1</sup> Отношение урожая зерна к дозе азота (кг/кг)



**Рис. 2** Урожайность зерновых культур в мире, 1961-2007 гг.



Рис. 3 Прогнозируемый рост потребностей в зерне кукурузы

между теми, кто будет работать над повышением продуктивности растениеводства и эффективности использования удобрений до требуемых уровней.

### Концепция «4-х правил» применения удобрений

Для того, чтобы наука о питании растений эффективно взаимодействовала с другими научными дисциплинами, для вовлечения государственного и частного секторов и участия разных стран, необходима общая концепция, которая позволит проанализировать имеющиеся технологии, правильно поставить задачи и добиться их выполнения. Семена этой концепции были посеяны более 20-ти лет назад Торупом и Стюартом (Thorup and Stewart, 1988), написавшими следующее: «Надо вносить лучшую форму удобрения в оптимальной дозе, наиболее подходящим способом и в необходимые сроки». На рис. 4 схематично представлена концепция «4-х правил» применения удобрений, которая базируется на подходах, изложенных Торупом и Стюартом (Bruulsema et al., 2008). В ее основе лежат четыре простых правила – внесение лучшей формы удобрения в оптимальной дозе, в необходимые сроки и наиболее подходящим способом. Примером практического применения этих четырех правил является разработка системы рационального применения удобрений для каждого конкретного поля.

На схеме четыре правила размещены внутри области, представляющей блок возделывания сельскохозяйственных культур, поскольку данные правила тесно интегрированы с системами рационального выращивания культур, используемыми для достижения поставленных целей в растениеводстве. Решение этих задач в рамках каждого фермерского хозяйства способствует решению более глобальных экономических, социальных и экологических проблем, обеспечивая тем самым устойчивое развитие всей системы. Важно отметить, что следование четырем правилам не дает желаемого результата при наличии каких-либо проблем в других звеньях системы возделывания сельскохозяйственных культур. Дарст и Мерфи (Darst and Murphy, 1994) писали об уроках «Пыльного котла» (серия пыльных бурь) в США в 1930-х гг. в том контексте, что многочисленные исследования, показавшие поло-

жительную роль надлежащего применения удобрений и других новых технологий в растениеводстве, способствовали включению ресурсосберегающих способов обработки почвы в систему рационального возделывания культур. Наука и практика четко показывают, что влияние рационального применения удобрений на урожай и его качество, на рентабельность в целом, на потери питательных веществ в результате вымывания и эрозии почвы, а также на газообразные потери азота из почвы во многом зависят от других агрономических (густота стояния растений, сорт, обработка почвы, защита растений от вредителей и болезней и т.д.) и ресурсосберегающих приемов (террасирование, полосное земледелие, оставление стерни и пожнивных остатков, создание лесополос, в том числе водозащитных и т.д.).

Технологии, используемые для разработки системы применения удобрений с учетом специфики конкретного фермерского хозяйства, могут считаться «лучшими» только при надлежащем подборе всех агрономических и ресурсосберегающих приемов в системе рационального возделывания культур. Разработанная система рационального применения удобрений может быть совершенно неэффективной, если при возделывании культуры допускаются просчеты в других агротехнологических звеньях.

На схеме концепции «4-х правил» (рис. 4) внутри внешней области приводятся основные показатели эффективности системы. Сбалансированный набор этих показателей помогает понять взаимосвязь между рациональным применением удобрений и устойчивым развитием растениеводства в целом. На схеме четко показано, что устойчивое развитие всей системы определяется не только урожайностью и эффективностью использования элементов питания из удобрений, хотя эти показатели и являются ключевыми индикаторами. Залогом успеха является вклад всех составляющих в улучшение показателей эффективности системы.

### Имитационные модели формирования урожая

Определение разницы между потенциальной и реальной урожайностью – важный шаг к повышению продуктивности культур и эффективности растениеводства. Недавно ФАО опубликовала ряд подобных оценок для шести стран-производителей кукурузы (FAO, 2008). Согласно оценкам, разрыв между потенциальной и реальной урожайностью кукурузы колеблется от 4 и 5 т/га в, соответственно, Мексике и Индии до 0 в США. Однако подобные общие оценки не следует трактовать слишком буквально применительно к конкретным условиям внутри каждого региона. Например, при сопоставлении урожайности орошаемой кукурузы при возделывании по интенсивной технологии в рассмотренном выше опыте в штате Небраска со средней урожайностью кукурузы в стране на полях фермеров за те же годы получается разница в 4-5 т/га

**Таблица 1.** Сравнение среднесуточной урожайности кукурузы в опытах, изучающих интенсивные технологии, со средней урожайностью на полях фермеров (экспериментальные данные Adviento-Borbe et al., 2007)

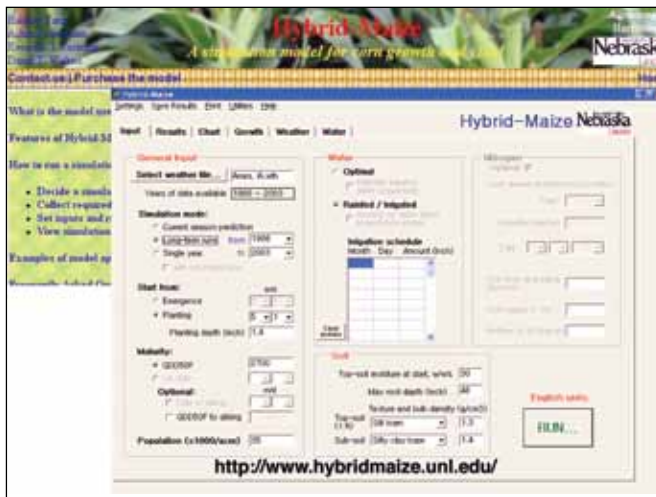
Средняя урожайность за 2000-2005 гг	Бессменная кукуруза	Кукуруза/соя
Графство Ланкастер, поля фермеров при орошении, т/га		10.6
Рекомендованная Университетом технология, т/га	14.0	14.7
Интенсивная высокоурожайная технология, т/га	15.0	15.6



**Рис. 4** Схема концепции «4-х правил» (Bruulsema et al., 2008)

(табл. 1), предполагающая, что по крайней мере в ряде регионов США существует нереализованный потенциал продуктивности кукурузы.

Имитационные модели формирования урожая культур могут быть полезным инструментом для оценки недополученных урожаев в любых конкретных условиях. Значительный прогресс в удобстве использования этих моделей был достигнут с появлением возможности анализа нереализованного потенциала урожая, а также агротехники возделывания культуры и системы применения удобрений. Один из примеров – программа «Гибридная кукуруза» («Hybrid Maize»), разработанная Университетом Небраски (Yang et al., 2006). Блок программы по применению удобрений находится в стадии разработки. Агротехника возделывания культуры и система применения удобрений составляют единый комплекс отчасти потому, что протекание жизненно важных процессов в растениях и в почвах сильно зависит от погодных условий. На практике у пользователей есть две альтернативы для принятия решений – вероятностный подход на основе многолетних климатических наблюдений или анализ близкой к реальному времени информации о погодных условиях текущего сезона. Имитационные модели работают при обоих подходах. Изменение климата повышает востребованность моделей, в которых используются погодные/климатические данные. В недавнем отчете Национального научно-ис-



«Hybrid-Maize» («Гибридная кукуруза») - пример имитационной модели для оценки нереализованного потенциала урожайности в конкретных условиях

следовательского совета (National Research Council, 2009) указывается, что окончание периода стабильности климата требует организованной, основанной на работе с базами данных, системы поддержки принятия решений. Очевидно, что в эту категорию попадают агротехника выращивания культур и система применения удобрений. Последствия изменения климата для питания растений были обобщены Броудером и Воленеком (Brouder and Volenec, 2008). Лобелль с соавторами (Lobell et al., 2009) не так давно опубликовал исчерпывающий обзор о нереализованном потенциале продуктивности сельскохозяйственных культур – в основном пшеницы, риса, кукурузы, который включал использование имитационных моделей.

## Глобальные сети данных

В недавнем обобщающем докладе «Международная оценка сельскохозяйственных знаний, науки и технологий для развития» говорится, что увеличение продуктивности сельского хозяйства экологически рациональным способом является основной задачей для сельскохозяйственного знания, науки и технологий (IAASTD, 2009). В качестве одного из шести высокоприоритетных вариантов управления природными ресурсами предлагается «создание сети специалистов-практиков (фермерские организации, негосударственные организации, государственный и частный сектора) для содействия долгосрочному управлению природными ресурсами с тем, чтобы природные ресурсы приносили большую пользу для всеобщего блага». В качестве еще одного варианта предлагается «объединить доступ к глобальной и локальной информации и сделать генерированные на региональном уровне знания и инновации по управлению природными ресурсами доступными для всеобщего сельскохозяйственного знания, науки и технологий».

В своей пленарной лекции на годовом собрании Американской ассоциации содействия развитию науки в 2008 г. д-р Нина Федорофф – руководитель



**Рис. 5.** Концептуальная модель процесса сбора и обработки данных в большом географическом масштабе

USAID сказала, что единственной альтернативой повышению цен на продукты питания и прогрессирующей вырубке лесов является использование достижений современной науки, в том числе молекулярной биологии, для повышения продуктивности уже возделываемых земель и снижения их потребности в воде (Fedoroff, 2008). В продолжение она сказала, что исследовательские университеты и институты, работая вместе с бизнес-сообществом и используя современные электронные ресурсы, имеют уникальную возможность ускорить мировое сотрудничество.

Можно ли еще более эффективно использовать современные технологии связи и обработки данных для достижения целей, связанных с ростом продуктивности культур и эффективности использования элементов питания растениями? Национальная академия наук (National Academy of Sciences, 2009) в напутствии начинающим ученым теперь говорит о том, что исследователи отвечают за проработку наилучших из возможных способов совместного использования данных, приводя в качестве примера базы данных астрономических изображений, последовательностей белков, археологических данных, клеточных линий, химических реагентов и трансгенных животных.

Для глобальной совместной работы ученых исследователи Университета Пурду создали «Сеть вычислительной нанотехнологии» (Network for Computational Nanotechnology, NCN). Результатом работы этого консорциума стало создание виртуального вычислительного центра nanoHUB (<http://nanohub.org>). Онлайн-сообщество nanoHUB, состоящее из более чем 90 тыс. пользователей в год, получает доступ к ресурсам, которые необходимы ученым для сотрудничества в области моделирования, для исследований и обучения в сфере нанотехнологий. Есть ли необходимость в создании «Nutrohub» – глобального исследовательского и образовательного проекта в области питания растений? Подобное сообщество специалистов могло бы состоять из многочисленных групп – каждая со своим направлением работы, но при совместном использовании коммуникационных и вычислительных ресурсов. Группы могли бы разрабатывать интегрированные системы управления данными, подобно представленной на рис. 5 системе, разработанной для Глобального проекта IPNI по кукурузе (Murrell, 2008).

Д-р Фиксен – старший вице-президент (Программа

по Америке) и Директор по научной работе IPNI. Работает в Брукингсе, штат Южная Дакота. E-mail: [pfixen@ipni.net](mailto:pfixen@ipni.net)

## Литература

- Adviento-Borbe, M.A.A., M.L. Haddix, D.L. Binder, D.T. Walter, and A. Dobermann. 2007. *Global Change Biology* 13:1972-1988.
- Brouder, S.M. and J.J. Volenec. 2008. *Physiol. Plant.* 2008:1-20.
- Bruulsema, T.W., C. Witt, Fernando García, Shutian Li, T. Nagendra Rao, Fang Chen, and S.Ivanova. 2008. *Better Crops* 92(2):13-15.
- Darst, B.C. and L.S. Murphy. 1994. *Keeping agriculture viable: Industry's viewpoint. J. Soil and Water Conservation* 46(2):8-14.
- Dobermann, A. 2007. In *Fertilizer Best Management Practices. International Fertilizer Industry Assoc., Paris, France.*
- Evans, Alex. 2009. *The Feeding of the Nine Billion: Global Food Security for the 21st Century (A Chatham House Report). Royal Institute of International Affairs, London.*
- FAO. 2008. *State of Food and Agriculture (page 62). Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome. On line at <http://www.fao.org/catalog/inter-e.htm>.*
- Fedoroff, Nina V. 2008. *American Association for the Advancement of Science Annual Meeting. On line at <http://www.pitt.edu/~super1/lecture/lec31911/001htm>.*
- Glenn, J.C., T.j. Gordon, and E. Florescu. 2008. *The Millenium Project: State of the Future. World Federation of UN Associations, Washington, D.C.*
- IAASTD. 2009. *International Assessment of Agricultural Knowledge, Science and Technology for Development – Executive Summary of the Synthesis Report. Island Press, Washington, D.C.*
- Janzen, H. 2009. *SOM research in 2030: what scientists then might ask of us now. In program and Abstracts for the International Symposium on Soil Organic Matter Dynamics: Land Use, Management and Global Change. Colorado State University, Fort Collins. p. 114.*
- Lobell, D.B., K.G. Cassman, and C.B. Field. 2009. *Annu. Rev. Environ. Resour.* 34:4.1-4.26.
- Murrell, T.S. 2008. *Personal Communication.*
- National Academy of Sciences. 2009. *On Being a Scientist – a Guide to responsible Conduct in Research, Third Edition. Committee on Science, Engineering and Public Policy. The National Academies Press. Washington, D.C.*
- National research Council. 2009. *Informing decisions in a changing climate. Panel on Strategies and Methods for Climate-Related Decision Support of the Committee on the Human Dimensions of Global Change, National Research Council of the National Academies. The National Academies Press. Washington, DC. On line at <http://books.nap.edu/catalog/12626.html/>.*
- Thorup, J.T. and J.W.B. Stewart. 1988. *Optimum fertilizer use with differing management practices and changing government policies. In Proceedings of the 25th Anniversary Symposium of Division S-8, Advances in Fertilizer technology and Use. Published for the Soil Sci. Soc. A. by the Potash & Phosphate Institute (now the International Plant Nutrition Institute, Norcross, GA).*
- Yang, H., A. Dobermann, K.G. Cassman, and D.T. Walters. 2006. *Agron. J.* 98:737-748.



# Индустрия минеральных удобрений: соответствие концепции «4-х правил»

Т. Бруулсема

Концепция «4-х правил» применения удобрений принята подавляющей частью производителей минеральных удобрений, а также их партнерами в области сельского хозяйства, в правительственных кругах и экологическом движении. Данная концепция освещает основные аспекты ответственного управления питанием растений и предназначена для использования всеми заинтересованными сторонами, осуществляющими как производственную, так и непроизводственную деятельность. Концепция «4-х правил» учитывает условия каждого конкретного региона – система применения удобрений разрабатывается с учетом региональной специфики. Согласно основному положению концепции, для устойчивого ведения сельскохозяйственного производства необходима оптимизация форм, доз, сроков и способов внесения удобрений. Адаптивные подходы к разработке системы применения удобрений должны поддерживаться промышленностью минеральных удобрений на всех уровнях. Слаженная работа всех сегментов, включая производителей минеральных удобрений, оптовиков и ритейлеров, поставщиков услуг в сфере сельского хозяйства, а также инвесторов помогает сельхозпроизводителям принимать правильные решения и, следовательно, повышать эффективность используемых систем земледелия.

Примерно 25 лет назад Международная комиссия ООН по окружающей среде и развитию выпустила доклад «Наше общее будущее». В данном докладе были заложены основы концепции устойчивого развития, в том числе и для сельского хозяйства. В течение последних нескольких лет тема устойчивости стала очень важной для крупных корпораций, включая компании сельскохозяйственного и продовольственного секторов экономики. Для повышения эффективности своей деятельности крупнейшие продовольственные ритейлеры разрабатывают программы, в том числе и по развитию системы поставок вплоть до уровня фермерских хозяйств, включая средства химизации и семена, используемые данными хозяйствами. Эти крупные продовольственные ритейлеры привлекают агробизнес к участию в работе таких организаций, как Консорциум за устойчивое развитие (The Sustainability Consortium) и «Кистоунский» альянс за устойчивое развитие сельского хозяйства (The Keystone Alliance for Sustainable Agriculture).

## Концепция «4-х правил» и устойчивое развитие

Использование концепции «4-х правил» применения удобрений способствует выработке рациональных решений по формам, дозам, срокам и способам внесения удобрений. Например, «Кистоунским» альянсом за устойчивое развитие сельского хозяйства разработан «Полевой экспресс-калькулятор» (“Fieldprint Calculator”) с компонентой по парниковым газам, которая использует основные элементы концепции «4-х правил». Вполне вероятно, что разрабатываемый в настоящее время «Индекс качества воды» (Water Quality Index) будет также увязан с положениями концепции «4-х правил».

Существует множество определений понятия

«устойчивое сельское хозяйство», однако в большинстве из них делается акцент на удовлетворении растущего спроса на продовольствие при отсутствии негативного влияния на состояние природных ресурсов. При этом должны приниматься сбалансированные решения с учетом последствий для экономики, социальной сферы и окружающей среды.

Как показано на рис. 1, правила применения удобрений, то есть выбор оптимальных форм, доз, сроков и способов их внесения для конкретной системы земледелия, тесно увязаны с целями устойчивого развития сельского хозяйства. Система применения удобрений считается «оптимальной», если она помогает всем заинтересованным сторонам в достижении поставленных задач по эффективности функционирования конкретной системы земледелия, ее продуктивности, влиянию на качество питьевой воды и воздуха и т.д.

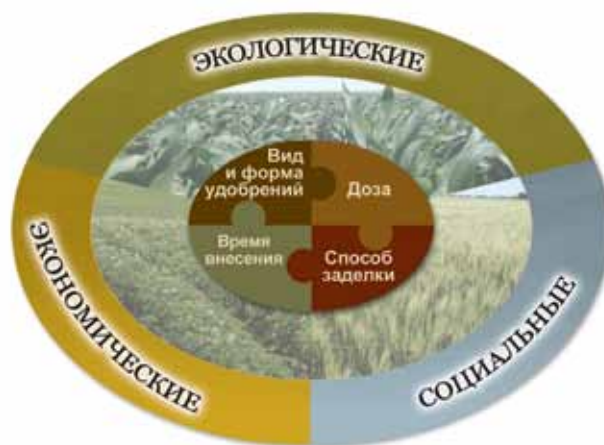


Рис. 1. Концепция «4-х правил» применения удобрений подразумевает, что оптимизация форм, доз, сроков и способов внесения удобрений для конкретной экосистемы помогает всем заинтересованным сторонам решать экономические, социальные, а также экологические задачи.

<b>Таблица 1. Основные научные принципы, лежащие в основе концепции «4-х правил» применения удобрений (IPNI, 2012).</b>			
<b>Форма</b>	<b>Доза</b>	<b>Сроки внесения</b>	<b>Способы внесения</b>
Содержание важнейших элементов питания	Потребность растений в элементах питания	Динамика поглощения элементов питания	Динамика развития корневой системы
Доступные для растений формы удобрений	Доступность элементов питания из почвы	Периоды максимального поглощения элементов питания	Реакция почвенной среды
Физико-химические свойства почвы	Поступление элементов питания из всех возможных источников	Доступность элементов питания из почвы во времени	Система обработки почвы
Синергизм элементов питания	Прогноз эффективности использования элементов питания из удобрений	Динамика потерь элементов питания из почвы	Внесение удобрений с учетом разного почвенного плодородия полей
Совместимость удобрений в тукомесях	Поддержание почвенного плодородия	Логистика полевых работ	Дифференцированное внесение удобрений с учетом внутривидовой пестроты почвенного плодородия
Сопутствующие элементы	Экономика		

## Научные принципы, лежащие в основе концепции «4-х правил»

С развитием таких наук, как физика, химия и биология были разработаны фундаментальные принципы минерального питания растений. Применение полученных знаний на практике способствовало развитию научных принципов регулирования почвенного плодородия и питания растений. Формы, дозы, сроки и способы внесения удобрений – основные компоненты системы управления питанием растений, каждый из которых имеет глубокое научное обоснование, исходя из наших представлений о питании растений. Все это можно изложить в виде ключевых принципов, как сделано в табл. 1. Для специалистов, консультирующих сельхозпроизводителей по вопросам питания растений, очень важно понимать научные основы, на которых базируются данные ключевые принципы.

Формы, дозы, сроки и способы внесения – полностью взаимосвязанные элементы в системе применения удобрений. Если один из них определен неправильно, то и систему в целом нельзя считать оптимальной. Вполне возможно, что в каждой конкретной ситуации может быть не одна оптимальная комбинация данных четырех элементов. Однако если один из них меняется, то и остальные также могут меняться. Все «4 правила» должны соблюдаться одновременно и соответствовать применяемой системе земледелия и агротехнологиям возделывания сельскохозяйственных культур. Для повышения устойчивости растениеводства концепция «4-х правил» применения удобрений акцентирует особое внимание на том, как принятые решения влияют на выходные параметры или на эффективность функционирования системы земледелия. Например, когда недостаток калия лимитирует урожайность, применение калийных удобрений повышает эффективность использования азота и фосфора из удобрений.

## Адаптивное управление питанием растений

Процесс адаптивного управления питанием растений состоит из нескольких циклов – принятие решений, их выполнение и оценка результатов (рис. 2).

Данные циклы прорабатываются на разных уровнях – от хозяйства и региона до государства в целом. Для производителей минеральных удобрений все указанные уровни одинаково важны.

Поставщики услуг в сфере сельского хозяйства, в том числе ритейлеры, часто консультируют сельхозпроизводителей на уровне конкретного хозяйства. Сельхозпроизводители прорабатывают опции для каждой культуры и следуют тем рекомендациям по формам, дозам, срокам и способам внесения удобрений, которые больше всего соответствуют конкретным условиям. Специфичные для конкретных условий факторы включают не только почвенное плодородие, рельеф, но и вопросы регионального нормативно-правового регулирования и землепользования.

На региональном уровне поставщики минеральных удобрений принимают решения по формам удобрений (видам продукции), которые они будут реализовывать, и прорабатывают логистику поставок, чтобы отгрузить удобрения в конкретное хозяйство или на конкретное поле в наиболее оптимальные сроки. Для проведения полевых опытов на полях фермеров и интерпретации полученных результатов агрономы, ассоциированные с производителями минеральных удобрений, взаимодействуют непосредственно с сельхозпроизводителями и консультантами по растениеводству. Это помогает апробировать разработанные технологии на практике.

На политическом уровне (отдельное государство или международное сообщество в целом) производители удобрений, инвесторы и правительства принимают решения по разработке конкретных видов продукции и инвестициям в новые производственные мощности и транспортную инфраструктуру. От подобных решений зависит наличие конкретных форм удобрений, а также сроки их внесения сельхозпроизводителями.

Поставленные задачи должны быть согласованы на всех трех вышеуказанных уровнях, поскольку в соответствии с этими задачами оцениваются выходные параметры. Формы, дозы, сроки и способы внесения удобрений важны на всех уровнях, однако необходимо иметь целостное представление о той структуре, которую мы имеем в виду,



дожди, выпадающие в течение нескольких дней после внесения фосфорных удобрений взброс без заделки в почву, обогащают поверхностный сток растворенным фосфором до уровней, значительно превышающих величины, при которых начинается «цветение» воды. При этом потери фосфора из почвы составляют не более 5-10% от внесенного с удобрениями фосфора. В соответствии с концепцией «4-х правил» для уменьшения потерь фосфора из почвы внесение удобрений в указанном регионе должно проводиться в «оптимальные сроки» и «оптимальным способом». В тех случаях, когда это возможно, рекомендуется внутрпочвенное внесение фосфорных удобрений или внесение взброс с последующей заделкой в почву. Когда заделка удобрений в почву невозможна, например, при нулевой обработке почвы, сельхозпроизводителям рекомендуется внимательно отслеживать прогнозы погоды и избегать внесения фосфорного удобрения взброс, если вероятность выпадения сильного дождя в течение ближайших нескольких дней превышает 50%.

Проведение образовательных программ и информирование общественности о том, как использование концепции рационального применения удобрений способствует снижению потерь фосфора из почвы в растворенном виде, осуществляется совместными усилиями в рамках партнёрской группы, охватывающей компании агробизнеса, правительственные агентства и экологические организации. В данную группу входят: организация «Охрана природы», Ассоциация агробизнеса штата Огайо, департаменты сельского хозяйства и при-

родных ресурсов Правительства штата Огайо, Консультационная служба университета штата Огайо, а также ряд ритейлеров в сегменте агробизнеса и сельхозпроизводителей. Ведется постоянная работа по разработке наиболее обоснованных критериев оценки используемых агротехнологий, основанная на научных исследованиях – мониторинге потерь элементов питания на конкретных полях. Информация о программе доступна на интернет-ресурсе «Охрана природы» (The Nature Conservancy). Разработка адаптивных технологий применения удобрений, исходя из концепции «4-х правил», когда одновременно преследуются как экономические, так и экологические цели, обеспечивает постоянный прогресс в области повышения урожайности сельскохозяйственных культур в этом высокопродуктивном регионе, охватывающем водосборный бассейн озера Эри.

*Д-р Бруулсема – Региональный директор Международного института питания растений по Северо-Восточному региону Северной Америки (г. Гуэльф, провинция Онтарио, Канада); e-mail: tom.bruulsema@ipni.net.*

## Литература

IPNI. 2012. *4R Plant Nutrition Manual: A Manual for Improving the Management of Plant Nutrition, Metric Version*, (T.W. Bruulsema, P.E. Fixen, G.D. Sulewski, eds.), International Plant Nutrition Institute, Norcross, GA, USA.

*Перевод и адаптация: В.В. Носов.*

## Чему нас учат длительные полевые опыты?

Р. Нортон, Р. Перрис и Р. Армстронг

*Длительный полевой опыт, заложенный в 1916 г. в п. Лонгеренонг (Австралия) – это источник данных для оценки многолетних тенденций урожайности при разных системах земледелия, а также здоровья почвы за длительный период наблюдений. Опыт в Лонгеренонге дает нам в сущности такую же информацию, как и другие длительные агрономические опыты. Основным выводом заключается в том, что высокая и устойчивая продуктивность сельскохозяйственных культур достигается в таком севообороте, где оптимизируется борьба с сорняками и болезнями растений, улучшается структура почвы и возмещается вынос элементов питания с урожаем.*

**В** длительных агрономических опытах отрабатываются новые разработки и технологии земледелия. Самые продолжительные из действующих многолетних опытов были заложены в 1843 г. Ротамстедским исследовательским центром в Великобритании, где до настоящего времени проводится 7 таких опытов (Rasmussen et al., 1998). В мире сохранилось только 10 классических длительных опытов (с продолжительностью более 50-ти лет), включая полевой опыт в Австралии, который называется «Севообороты в Лонгеренонге №1».

Опыт в Лонгеренонге – это старейший из действующих полевых опытов в Австралии. Он был заложен в 1916 г. в юго-восточной части страны вблизи г. Хоршам. Почва – вертисоль (Grey Vertisol) со щелочной

реакцией среды, имеющая самомульчирующий верхний горизонт. Среднегодовое количество осадков составляет около 420 мм. Опыт в Лонгеренонге закладывался для того, чтобы с учетом урожайности сельскохозяйственных культур установить наиболее оптимальный севооборот. Со временем в рамках данного полевого опыта стали проводиться новые исследования, например, по применению суперфосфата. В опыте в 1-кратной повторности (ежегодно выращиваются все культуры севооборота) изучается 7 севооборотов: бессменная пшеница, пар – пшеница, пар – пшеница – овес (стравливаемый скоту), пшеница – ячмень – горох, пшеница – овес – горох, пар – пшеница – овес и пар – пшеница – овес – овес (стравливаемый скоту). Азотные удобрения не при-

меняются, фосфорные удобрения вносятся в дозе 10 кг P<sup>1</sup>/га под зерновые культуры и 5 кг P/га – под остальные культуры. Посев, борьба с сорняками и защита растений осуществляются в соответствии с зональными рекомендациями.

В почве азот и фосфор находятся в разных формах, различающихся по доступности растениям. Большая часть азота в почве сосредоточена в составе органического вещества, которое подвергается минерализации, и, в конечном итоге, азот становится доступным для поглощения растениями в нитратной форме. Внешенный с удобрениями фосфор переходит в почве в формы, различающиеся по скорости десорбции, растворения и минерализации<sup>2</sup> фосфатов, а, следовательно, и по доступности растениям. При анализе почвы определяется содержание наиболее доступных растениям форм фосфора [извлекаемых, например, ионообменными смолами, растворами NaHCO<sub>3</sub> и NaOH] (Hedley et al., 1982). При разработке систем применения фосфорных удобрений на перспективу очень важно понимать, в какие формы в почве переходит внесенный с удобрениями фосфор.

Исследования, проведенные в течение более 90 лет, «дали» нам ряд уроков по урожайности зерновых культур, выносу элементов питания из почвы растениями, а также по устойчивости земледелия в целом.

### Урок 1: Устойчивые урожаи можно получать в течение долгого времени

На рис. 1 показана средняя урожайность пшеницы за многолетний период наблюдений. На графике выделяются определенные этапы, например, повышение урожайности, начавшееся в 1975 г., связано с началом применения гербицидов в опыте (Hannah and O'Leary, 1995). В течение последних 10-ти лет много проблем доставляет корневая нематода рода *Pratylenchus*, а также засорение посевов кострецом, но тенденция снижения урожайности, наблюдаемая примерно с 2000 г., объясняется недостаточным выпадением осадков в данный период. Только при монокультуре пшеницы не отмечается тенденции снижения урожайности, поскольку она с самого начала была низкой.

В опыте в Лонгеренонге самая высокая продуктивность культур достигнута в севообороте пшеница – ячмень – горох. Продуктивность культур в данном севообороте, выраженная в биоэнергетических эквивалентах, в 2.5 раза превысила продуктивность бессменной пшеницы (2.22 и 0.87 т/га/год в пересчете на глюкозу соответственно). Использование биоэнергетических эквивалентов позволяет оценить накопление энергии зерном и, кроме того, сравнить продуктивность сельскохозяйственных культур с разным накоплением энергии. В севообороте пшеница – ячмень – горох средняя урожайность пшеницы в течение последних 90 лет составила 1.52 т/га, гороха – 1.53 т/га, а ячменя – 1.57 т/га. Это наиболее рента-

1 - В пересчете на элемент - P (здесь и далее - прим. переводчика)

2 - Минерализация органических фосфатов

3 - И ошибка среднего



Обучение ученых и фермеров на полевом опыте в Лонгеренонге имеет длительную историю. Эта фотография была сделана в 1930 г. на ежегодном «Дне поля».

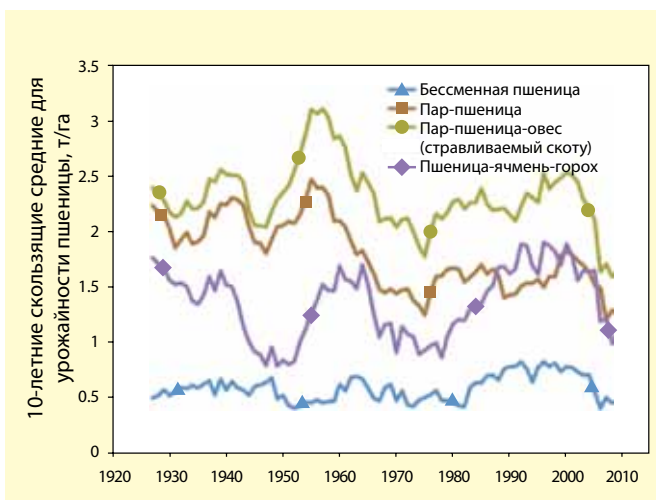


Рис. 1. Урожайность зерна пшеницы в 4-х из 7-ми севооборотов длительного полевого опыта в Лонгеренонге. Представлены 10-летние скользящие средние за период 1916-2008 гг.

бельный севооборот с учетом текущих цен на зерно. Включение в севообороты парового поля привело к ухудшению структуры почвы, но способствовало меньшему варьированию урожайности, особенно в годы с низким количеством осадков, которые наблюдались в течение последнего десятилетия (табл. 1).

Для успешной борьбы с сорняками и эффективной защиты растений от болезней необходимо биологическое разнообразие культур в севообороте. Севооборот – это фундаментальный фактор, обеспечивающий устойчивое функционирование систем земледелия. Он способствует созданию оптимальных условий выращивания растений, поскольку обеспечивает необходимый перерыв в возделывании одной и той же культуры, что сдерживает распространение болезней. Кроме того, чередование культур в севообороте позволяет разработать альтернативные способы борьбы с сорняками и способствует улучшению физико-химических свойств почвы.

### Урок 2: Необходимо учитывать баланс элементов питания

Стабильное получение продукции растениеводства в течение длительного периода времени все же

**Таблица 1.** Хозяйственный баланс азота и фосфора для 7-ми севооборотов длительного полевого опыта в Лонгеренонге (1986-2008 гг.).

Севооборот, 1986-2006 гг.	Средняя урожайность пшеницы <sup>3</sup> , т/га	Баланс фосфора, Δ кг P/га/год	Баланс азота, Δ кг N/га/год
Бессменная пшеница	0.64±0.52	7.3	-7.3
Пар – пшеница	1.50±0.76	0.9	-11.8
Пар – пшеница – овес (стравливаемый скоту)	2.05±0.97	-0.3	-10.6
Пшеница – ячмень – горох	1.46±1.31	3.2	2.9
Пшеница – овес – горох	1.39±1.24	1.2	1.8
Пар – пшеница – овес	1.86±0.95	3.0	-13.9
Пар – пшеница – овес – овес (стравливаемый скоту)	2.11±0.96	-0.1	-12.1

требует определенных затрат. В **табл. 1** приведен баланс азота и фосфора за последние 25 лет опыта в Лонгеренонге. Мы выбрали именно этот отрезок времени, поскольку в 1984 г. в опыте произошли небольшие изменения. Кроме того, в юго-восточной части Австралии затем наступил длительный засушливый период, когда количество выпадающих осадков было ниже среднеголетних значений.

Данные по урожайности зерна имеются за все годы исследований, а содержание белка (и азота) в зерне стало определяться не так давно. Поступление фосфора с семенами не анализируется – используются результаты, полученные в других опытах. Хозяйственный баланс азота и фосфора рассчитывался следующим образом:

**N:** Поступление с удобрениями + Фиксация бобовыми культурами - Вынос с зерном

**P:** Поступление с удобрениями - Вынос с зерном

Мы не учитывали поступление азота за счет азотфиксации свободноживущими микроорганизмами и абиотической фиксации азота, а также газообразные потери азота из почвы и потери азота в результате вымывания и эрозии почвы. Фиксация N<sub>2</sub> из атмосферы горохом определялась исходя из урожайности зерна и максимального накопления биомассы растений при индексе урожайности<sup>5</sup>, равном 0.3. Биомасса растений пересчитывалась на фиксированный азот с учетом фиксации 25 кг N/т биомассы (Peoples et al. 2001). Вынос азота с зерном был рассчитан исходя из содержания азота в зерне пшеницы, ячменя, овса и гороха и урожайности зерна данных культур. Поживные растительные остатки и растения овса после стравливания оставлялись на опытных делянках. Содержание фосфора в зерне было проанализировано в 2005 г., и вынос фосфора с зерном рассчитывался на основе этих данных. Безусловно, содержание фосфора в зерне зависит от конкретных условий обеспеченности почвы подвижными формами фосфора.

Как следует из **табл. 1**, с 1984 г. баланс азота в севооборотах без бобовой культуры был отрицательным и составил в среднем -12 кг N/га/год, но при включении гороха в севообороты баланс азота был

*4 - Отношение массы зерна к надземной биомассе растений [абсолютно сухое вещество]*

положительным.

Исходные почвенные образцы, отобранные перед закладкой опыта более 90 лет назад, не были сохранены, поэтому был отобран образец почвы с залежного участка поблизости от опыта. Содержание общего азота и углерода в залежи (слой 0-10 см) в целом согласуется с отрицательным балансом азота. С учетом схемы опыта более глубокий анализ данных не представляется возможным, однако результаты указывают на более высокое соотношение C:N в почве для севооборотов с паровым полем, отражая тем самым постепенное снижение содержания органического вещества в почве и изменение его состава в данных системах земледелия.

В **табл. 1** приводится также баланс фосфора для севооборотов, изучаемых в Лонгеренонге. Тэнг с соавт. (Tang et al., 2006) определяли групповой со-

*5 - Ионообменная смола, растворы NaHCO<sub>3</sub>, NaOH и HCl*



День открытых дверей в Лонгеренонгском Колледже в 1930 г.: ознакомление фермеров с новыми сортами.



Лонгеренонгский Колледж одним из первых в Юго-Восточной Австралии стал проводить опыты по внесению суперфосфата под зерновые культуры.

**Таблица 2.** Соотношение C:N, содержание общего азота, валового и подвижного фосфора (метод Олсена: 0.5 M NaHCO<sub>3</sub>), а также частичные результаты определения группового состава фосфатов в почве: многолетний опыт в Лонгеренонге и залежь (образцы почвы отбирались в 2005 г.)

	Бесменная пшеница	Пар – пшеница	Пар – пшеница – овес (стравливаемый скоту)	Пшеница – ячмень – горох	Пшеница – овес – горох	Пар – пшеница – овес	Пар – пшеница – овес – овес (стравливаемый скоту)	Залежь
Общий азот, %	0.070	0.056	0.063	0.085	0.087	0.061	0.066	0.162
C:N	13.3	16.2	14.9	13.0	12.9	13.9	13.8	13.1
Валовой фосфор, мг P/кг почвы	486	367	307	341	329	330	322	295
Подвижный фосфор, мг P/кг почвы	69	52	40	40	47	66	50	18
Фосфор, извлекаемый 1 M HCl, % от валового фосфора	39	25	18	25	22	23	19	7
Фосфор, не растворившийся в 4-х растворителях <sup>4</sup> , % от валового фосфора	35	43	47	49	52	50	61	75

став фосфатов в почве в данном опыте. Результаты исследований частично представлены в **табл. 2**. Положительный баланс фосфора отмечается для всех севооборотов, за исключением двух, где есть поля стравливаемого скоту овса. Содержание в почве валового фосфора и труднодоступных фосфатов, извлекаемых раствором соляной кислоты, повысилось во всех севооборотах, но сильнее всего – под бесменной пшеницей. Положительный баланс фосфора был выше всего именно при монокультуре пшеницы. Систематическое применение фосфорных удобрений в полевом опыте в Лонгеренонге повышало валовое содержание фосфора в почве, но снижало относительное содержание доступных растениям форм фосфора.

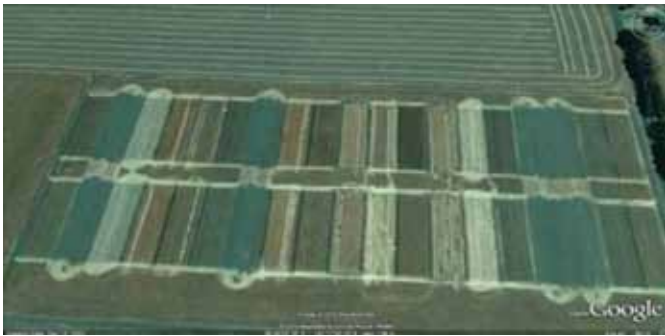
*Что служит источником азота в почве для растений?* К сожалению, в опыте в Лонгеренонге, как уже отмечалось, не были сохранены исходные почвенные образцы, но для сравнения можно использовать результаты почвенных анализов для залежного участка. В **табл. 2** дается содержание общего азота и соотношение C:N в почве. Если принять содержание общего азота в залежи за исходную точку, то можно оценить величину ежегодного снижения данного показателя. Полученные значения по большей части согласуются с расчетами баланса азота и указывают на то, что снижение содержания общего азота в почве происходит в основном в результате минерализации органического вещества. Поэтому вывод один – азот для питания растений поступает за счет реакций окисления органического вещества почвы, то есть при этом происходит снижение запасов органического углерода в почве. Таким образом, следует понимать, что для сохранения запасов органического углерода необходимо вносить в почву азот (и фосфор).

*Какова судьба фосфора, внесенного в почву с удобрениями?* Как показали исследования, длительное применение фосфорных удобрений повышает валовое содержание фосфора в почве, что в целом согласуется с приходными и расходными статьями баланса фосфора, приведенного в **табл. 1**. Группы

почвенных фосфатов различаются по доступности растениям. Согласно полученным результатам, почти весь внесенный с удобрениями фосфор перешел в труднодоступные для растений формы (группа кислоторастворимых фосфатов и фосфатов, не растворяющихся в использованных вытяжках). Тэнг с соавт. (Tang et al., 2006) отобрали почву со всех полей опыта и изучили отзывчивость разных сельскохозяйственных культур на применение фосфорных удобрений в условиях вегетационного павильона. Несмотря на достаточную обеспеченность почвы подвижным фосфором (метод Олсена), была выявлена отзывчивость растений на внесение фосфорных удобрений. Поэтому вывод один – в изученных щелочных почвах процессы фиксации фосфатов протекают быстро, и общепринятые методы анализа содержания подвижного фосфора в почве не очень надежны для прогнозирования отзывчивости растений на применение фосфорных удобрений. Кроме того, протестированные в вышеуказанном исследовании культуры по-разному отзывались на внесение фосфора. Авторы пришли к выводу, что на изученных почвах эффективность использования фосфо-



Роджер Перрис (слева) со студентами 2-го курса, обучающимися агрономии в Мельбурнском университете, на опытной делянке в Лонгеренонге.



Спутниковый снимок полевого опыта в Лонгеренонге от картографического сервиса Google Earth и компании «ДиджиталГлоуб» (DigitalGlobe), показывающий расположение делянок. Площадь опытной делянки изначально составляла 0.4 га. В 1986 г. было проведено расщепление делянок: на их южной половине стали выращиваться современные сорта пшеницы, а на северной – остался старый сорт Гурха (Ghurkha).

ра из удобрений можно повысить, если применять фосфорные удобрения исходя из выноса фосфора урожаем.

**Содержание углерода в почве.** При минерализации органического вещества содержание органического углерода в почве снижается. Учитывая всеобщую заинтересованность в сохранении запасов органического углерода в почвах, в таких длительных агрономических опытах, как опыт в Лонгеренонге, в реальных условиях – при разных системах земледелия можно получать уникальные данные по запасам углерода в почве. Об этом не задумывались в 1916 г., когда закладывался опыт, но теперь в рамках нового научно-исследовательского проекта в опыте будут определяться запасы углерода по профилю почвы, а также плотность почвы.

## Выводы

Результаты длительных агрономических опытов имеют фундаментальное значение, поскольку свидетельствуют о том, что функционирование систем земледелия, включая пастбищные системы, может осуществляться в течение многих десятилетий. В зависимости от используемых стратегий данные системы земледелия будут и дальше продолжать обеспечивать нас пищей и растительными волокнами без причинения ущерба природным ресурсам. Имитационные компьютерные модели, разработанные для разных систем земледелия, в том числе и для пастбищных систем, помогают нам анализировать информацию, но для калибровки подобных моделей необходимы реальные экспериментальные данные. Выводы, сделанные на основе 10-20-летних и 50-летних полевых опытов, могут быть принципиально разными. Длительные агрономические опыты позволяют нам проанализировать тенденции изменения продуктивности сельскохозяйственных культур в зависимости от их чередования в севообороте и систем обработки почвы. С самого начала функционирования длительных агрономических опытов мы исполь-

зуем их результаты для установления факторов, от которых зависят устойчивость земледелия и качество окружающей среды, а также адаптация сельскохозяйственных культур к изменяющимся условиям выращивания.

Несмотря на то, что мы уже много знаем о влиянии систем земледелия на здоровье почвы (“известные” параметры), есть и показатели, которые пока ещё не были подвергнуты параметризации (“известные неизвестные”, например, содержание углерода в почве). Существуют, безусловно, и другие показатели, которые мы еще даже и не принимаем во внимание. Спланировать изучение этих “известных неизвестных” и оценить стоимость исследований достаточно трудно. Однако наличие хорошо спланированных и обеспеченных надлежащими ресурсами длительных полевых опытов может сыграть очень важную роль в подобных исследованиях. Как замечено Рассмуссеном с соавт. (Rasmussen et al., 1998), «чтобы лучше предсказать будущее, необходимо иметь целостное представление о прошлом».

*Г-н Перрис – технический специалист Департамента базовых отраслей промышленности штата Виктория (г. Хоршам, Австралия) и руководитель длительного полевого опыта в Лонгеренонге.*

*Д-р Армстронг – Главный агроном Департамента базовых отраслей промышленности штата Виктория, г. Хоршам. Д-р Нортон – Региональный директор Международного института питания растений по Австралии и Новой Зеландии, г. Хоршам; e-mail: rnorton@ipni.net.*

## Благодарности

Работа по определению баланса элементов питания была проведена при поддержке Корпорации по исследованиям и разработкам в области зерновых культур (Grains Research and Development Corporation), Проект UM00023. Авторы преклоняются перед дальновидностью специалистов, заложивших многолетние полевые опыты, и признательны поколениям сотрудников, участвовавшим в проведении опытов с момента закладки.

## Литература

- Hannah, M. and G.J. O'Leary. 1995. *Aust. J. Exp. Agric.* 35, 951-60.
- Hedley, M.J., J.W.B. Stewart, and B.S. Chauhan. 1982. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 46:970-976.
- Peoples, M.B., A.M. Bowman, R.R. Gault, et al. 2001. *Plant and Soil* 228, 29-41.
- Rasmussen, P.E., K.W.T. Goulding, et al. 1998. *Science* 282, 893-896.
- Tang, C., L. Dart, C. Rogers, et al. 2006. *Phosphorus fractions in a Vertosol after 88-year crop rotations, The 3rd International Symposium on Phosphorus Dynamics in the Soil-Plant Continuum, May 14-19, 2006, Uberlandia, Brazil.*

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



# Проблема повышения точности диагностики фосфатного состояния почв Украины

Христенко А.А., Иванова С.Е.

*Установлены закономерности влияния свойств почв на точность определения содержания подвижного фосфора по методу на основе раствора гидрокарбоната натрия (Olsen, ISO 11263). Разработан способ повышения точности оценки фосфатного состояния щелочных почв. Точность повышается за счет учета влияния щелочности почв на результат химического анализа и усовершенствования шкалы обеспеченности почв доступным для растений фосфором.*

Как известно, мировое сообщество получило новый вызов под названием “продовольственный кризис”. Важным направлением решения продовольственной проблемы многих стран является рост применения минеральных удобрений. При этом возрастает антропогенная нагрузка на окружающую среду. Проблемой остается и постоянный рост цен на сырье и энергоресурсы, необходимые для производства удобрений. В этих условиях возрастает значение точной диагностики плодородия почв. Для Украины, имеющей 32 млн. га пашни, успешное решение данной задачи чрезвычайно актуально.

В результате исследований, проведенных в ННЦ «Институт почвоведения и агрохимии имени А.Н. Соколовского», было установлено, что использование ряда химических методов для определения содержания подвижных форм элементов в почвах, часто ведет к большим ошибкам. В частности, ошибка определения содержания доступного для растений фосфора или калия в почвах на основе нормативных документов бывшего СССР может достигать 100-200% и больше. Это связано с тем, что большинство методов основано на использовании растворов сильных кислот, то есть “жестких” методов.

Установлено, что использование кислотных методов на всех легких (песчаных и супесчаных), а также сильнокислых почвах ( $pH_{KCl} < 4.5$ ) разного гранулометрического состава, ведет к искусственному занижению, а на почвах с высоким содержанием апатитов — к искусственному завышению получаемых данных.

Одним из авторов была предложена концепция, рассматривающая фосфатную и калийную системы почв как открытые термодинамические системы. Характерной особенностью данных систем является высокая стабильность основных параметров (Христенко, 2009). Именно теоретические разработки позволили усовершенствовать методическую базу и предложить систему новых нормативных документов. На данное время разработано 8 национальных стандартов Украины (ДСТУ) и 5 утвержденных проектов ДСТУ.

Установлены регионы и типы почв Украины, где применение конкретных химических методов определения подвижных форм азота, фосфора и калия наиболее целесообразно. При этом учитывается возможное влияние химического состава и физических свойств почв на искажение результатов химического анализа. Для отдельных методов разработаны новые группировки обеспеченности почв подвижным фос-

фором или калием. Данные нормативные документы устанавливают методы определения подвижных соединений азота, фосфора и калия на всех почвах страны.

Использование стандартов, в том числе: ДСТУ ISO 11263 (метод Олсена), ДСТУ 4114 (метод Мачигина), ДСТУ 4115 (метод Чирикова), ДСТУ 4405 (метод Кирсанова), ДСТУ 4729 (метод Карпинского - Замятиной), показывает, что реальный фосфатный уровень экстенсивно используемых пахотных почв находится на границе низких и средних значений обеспеченности, а калийный — в пределах средней обеспеченности.

Это объясняет хорошо известные эмпирические данные о высокой эффективности минеральных удобрений, особенно фосфорных, на всех типах пахотных почв, в том числе черноземах.

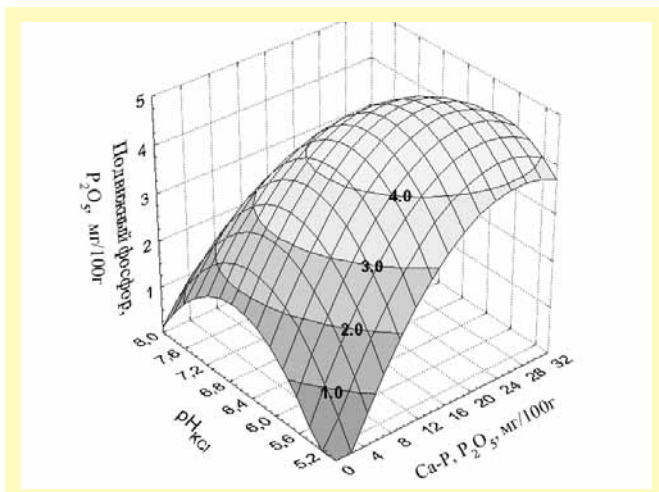
Практика использования новых нормативных документов, разработанных для Украины, показала, что только за счет повышения точности диагностики почвенного плодородия, корректировки доз и более рационального распределения удобрений по полям и культурам, их эффективность возрастает в среднем на 30%.

Несовершенство теории и методологии ведет к искажению (завышению или занижению) оценки не только отдельных полей, но и целых регионов. Так, иллюзия богатства черноземов на лессовых породах вызвана тем, что данные почвы содержат повышенное количество апатитов и полевых шпатов. Фосфор или калий, содержащийся в этих минералах, растениям непосредственно не доступен. В то же время, соединения этих элементов частично экстрагируются растворами сильных кислот, в том числе 0.02н HCl (Кирсанов, pH-1.0) и 0.5 н  $CH_3COOH$  (Чириков, pH-2.5).

Анализ публикаций показывает, что получение объективной оценки состояния плодородия почв и содержания доступных форм макро- и микроэлементов в почвах является общемировой проблемой.

Недостатки, присущие методам на основе растворов кислот, во многом свойственны всем методам, имеющим значения pH экстрагента менее 4.5: методы Брея-Куртца 2 (pH-1.0), Мелиха 1 (pH-1.2), Аррениуса (pH-2.0), Мелиха 3 (pH-2.5), Мелиха 2 (pH-2.6), Ван Лиеропа (Келауна) — pH-2.7, Эгнера-Рейма (pH-3.6), Брея-Куртца 1 (pH-3.5), Эгнера-Рейма-Доминго (pH-4.2) и др.

Так, например, нами установлено, что определение



**Рис. 1.** Зависимость определения содержания подвижного фосфора в почвах по Egner-Riehm от величины  $pH_{KCl}$  почвы и содержания апатитов (фракция Ca-P)

фосфора по методу Эгнера-Рейма в почвах с сильно-кислой или щелочной реакцией ведет к искусственному занижению данных (рис. 1). Увеличение в почве количества апатитов, наоборот, ведет к искусственному завышению результатов. Содержание апатитов отражает фракция Ca-P, метод Чанга-Джексона.

Тенденция к «снижению» содержания фосфора на почвах с очень высоким содержанием апатитов, распространенных в степях Украины, объясняется их щелочной реакцией.

Нами использован комплекс методов, базирующийся на разных принципах: химические методы, метод ионообменных смол, биологические методы (опыты с растениями).

Кроме того, проводился статистический анализ материалов автоматизированного информационного банка данных, который содержит результаты анализов свыше 1500 образцов почв.

В результате исследований был сделан вывод о целесообразности широкого использования, так называемых «мягких» методов на основе солевых и слабо-щелочных экстрагентов.

Сравнительная оценка разных методов, проведенная на протяжении тридцати лет, показала преимущество метода на основе раствора гидрокарбоната натрия (Olsen, 1954), ISO 11263:1994 Soil quality – Determination of phosphorus – Spectrometric determination of phosphorus soluble in sodium hydrogen carbonate solution. В дальнейшем данный метод обозначен как метод Олсена.

Было установлено, что гранулометрический состав и другие свойства почв (содержание апатитов, кислая среда), практически не влияют на результат химического анализа, проведенного по методу Олсена. Коэффициент корреляции был менее 0.33.

При этом содержание фосфора по данным метода Олсена всегда находится в границах низких и средних значений обеспеченности. Это объективная оценка, поскольку такое состояние является наиболее вероятным состоянием фосфатных систем удобренных пахотных почв как термодинамических систем.

Данные, полученные по методу Олсена, на кислых и нейтральных почвах всегда соответствуют оценке плодородия почв, полученной с помощью других «мягких» методов. Адекватность оценки фосфатного состояния подтверждена и биологическими методами. Это видно на примере данных микрополевого опыта (табл. 2).

Диапазон успешного использования метода Олсена очень широк: от кислых дерново-подзолистых и буроземных почв до черноземов южных и темно-каштановых почв. То есть, метод Олсена универсален, и его можно использовать практически на всех почвах Украины.

Это важная информация, поскольку сфера использования метода Чирикова в Украине существенно сокращена. Согласно ДСТУ 4115 данный метод можно использовать только для диагностики почв оподзоленного ряда.

Национальный стандарт Украины ДСТУ ISO 11263-2001 является идентичным международному стандарту ISO 11263. Один из авторов статьи участвовал в разработке данного гармонизированного нормативного документа, поэтому считает своим долгом отметить и недостатки метода Олсена.

Во-первых, существует необходимость в обеспечивании вытяжки. Стандартом предусмотрено использование активированного угля. В последних модификациях метода для этого в состав экстрагента включают ЭДТА и флокулянт Superfloc 127.

Во-вторых, анализ материалов банка данных выявил наличие парадокса. Метод предназначен, прежде всего, для анализа щелочных почв. Вместе с тем оказалось, что его использование для анализа этих почв может вести к искусственному занижению оценки их обеспеченности фосфором. Причем, чем выше щелочность почвы, тем ниже получаемый результат

**Таблица 1.** Содержание подвижного фосфора в почвах по данным кислотного и щелочного методов в зависимости от pH почвы и содержания апатитов

Почва	Содержание частиц почвы <0.01мм, %	pHKCl	Содержание $P_2O_5$ , мг/кг		
			Чанг-Джексон, фракция Ca-P	Чириков pH-2.5	Оlsen, pH-8.5
Дерново-подзолистая	9	4.5	34	34.0	19.6
Дерново-подзолистая	18	4.9	75	35.0	19.8
Бурозем оподзоленный	32	3.8	45	1.9	20.7
Темно-серая оподзоленная	48	3.8	104	2.1	20.9
Чернозем оподзоленный	32	5.4	118	10.0	19.8
Чернозем типичный	56	6.8	201	79.9	19.5
Чернозем типичный	54	6.7	244	80.0	20.0
Чернозем обыкновенный	48	6.0	273	132.0	25.2
Чернозем обыкновенный	55	6.4	297	161.0	25.6
Чернозем типичный	60	6.9	326	170.1	24.5
Черноземно-луговая	27	6.6	806	345.1	30.3

**Таблица 2.** Оценка обеспеченности почв фосфором по данным химических и биологического методов

Почва	Вариант опыта	Содержание $P_2O_5$ , мг/кг			Содержание $P_2O_5$ в фитомассе овса, %
		Ионообменная хроматография	Олсен	Карпинский-Замятина (ДСТУ 4729)	
Чернозем типичный	Контроль	20.0	19.1	0.31	0.52±0.09
	$P_{1200}^*$	58.9	52.9	1.75	0.70±0.09
Чернозем типичный	Контроль	31.0	24.0	0.44	0.58±0.11
	$N_{400}P_{400}K_{480}^{**}$	119.1	124.9	5.84	0.81±0.11

\* разовое внесение

\*\*за каждую ротацию севооборота

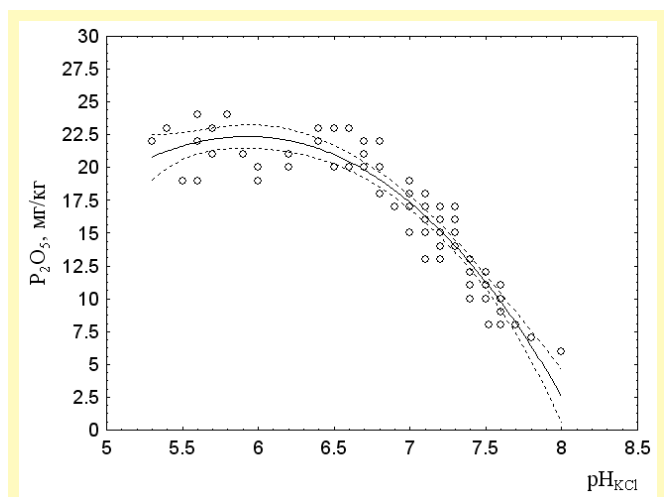
(рис. 2). Иногда создается впечатление “исчезновения” доступного для растений фосфора. По этой причине сложилось мнение, что щелочные почвы плохо обеспечены доступным для растений фосфором.

Параллельное использование солевых методов (Карпинский-Замятина, 0.03н  $K_2SO_4$ , рН-5.8; Скофилд) показывает, что реального снижения содержания доступного для растений фосфора в щелочных почвах не происходит. То есть, “исчезновение” фосфора является иллюзией, вызванной недостатком метода. Проблема в том, что щелочной экстрагент в щелочной среде теряет экстрагирующую силу, что и приводит к искусственному занижению получаемых данных.

Максимальное искусственное занижение составляет около 18 мг  $P_2O_5$ /кг. Много это или мало, видно из экспертного расчета. Для повышения содержания фосфора на эту величину необходимо внести на тяжелых почвах не менее 600 кг  $P_2O_5$ /га. При условии, что это разовая (единовременная) доза внесения, а анализ почвы проведен не позже одного года после внесения.

Высокие требования нормативных документов (ISO 11263:1994 и ДСТУ ISO 11263-2001) к точности проведения анализа и получения точных данных обесцениваются отсутствием официальных группировок обеспеченности почв доступным для растений фосфором. Без корректно разработанной группировки почв невозможно объективно оценить их фосфатное состояние.

Имеющаяся в литературе информация существенно различается между собой (табл. 3).

**Рис. 2.** Зависимость определения содержания подвижного фосфора по Олсену от величины  $pH_{KCl}$  почвы

Кроме того, исследования, проведенные в ННЦ «Институт почвоведения и агрохимии имени А.Н. Соколовского» показали, что оценка плодородия почв по методу Олсена при использовании обеих систем оценки обеспеченности фосфором, как правило, не совсем совпадает с оценкой, полученной по данным других щелочных и солевых методов.

Нами усовершенствованы группировки обеспеченности почв фосфором по методу Олсена. Теперь оценка обеспеченности почв фосфором по данному методу полностью совпадает с оценкой других “мягких” химических методов (Мачигин, рН 9.0; Чанг-Джексон, фракция Al-P - рН 8.5; Карпинский-Замятина, рН 5.8).

Кроме того, добавлена группа “очень высокая” обеспеченность фосфором. Это позволит более рационально использовать имеющиеся ресурсы. Оптимальное содержание доступного для растений фосфора для получения высоких стабильных урожаев лежит в границах группы «высокой» обеспеченности. Повышение содержания подвижного фосфора в почвах сверх оптимального уровня ведет к резкому снижению отзывчивости растений на внесение фосфорных удобрений.

Разработаны математические модели и соответствующая компьютерная программа, позволяющие установить реальную обеспеченность щелочных почв подвижным фосфором в зависимости от значений  $pH_{KCl}$  или  $pH_{H_2O}$ . Получен патент на полезную модель (Патент, 2009).

Использование данных математических моделей или программы, а также усовершенствованной шкалы обеспеченности почв фосфором, позволяет оптимизировать системы удобрений и, соответственно, затраты на гектар удобренной площади. Например, установив, что фосфатный уровень почвы соответствует не 5 мг  $P_2O_5$ /кг (низкая обеспеченность фосфором), а 25 мг  $P_2O_5$ /кг почвы (средняя обеспеченность

**Таблица 3.** Группировки обеспеченности почв подвижным фосфором по методу Олсена,  $P_2O_5$ , мг/кг

Группа обеспеченности фосфором	Источник		Предлагаемая группа
	Янишеский, 1996	Агрохимические методы исследования почв, 1975	
Низкая	< 11	< 25	< 18
Средняя	11-23	25-50	19-34
Повышенная	23-41	50-90	35-50
Высокая	> 41	> 90	51-66
Очень высокая	-	-	> 67

фосфором), фермер, на основе имеющихся рекомендаций, может существенно снизить дозу вносимого удобрения, не опасаясь снижения урожая культур.

Внесение высоких доз фосфорных удобрений на почвах, имеющих высокую щелочность, так же нецелесообразно по следующей причине: высокая щелочность ( $pH_{KCl}$  - 8.0 или  $pH_{H_2O}$  - 8.5 и более) часто вызывается не только наличием карбонатов кальция, но и дополнительным присутствием соды. Последнее соединение довольно токсично и может негативно влиять на рост и развитие многих сельскохозяйственных культур, что резко снижает эффективность применяемых удобрений.

Почвы, характеризующиеся щелочной реакцией, можно встретить практически на всей территории Украины, в том числе Украинском Полесье (дерново - карбонатные почвы). Но наиболее широко такие почвы распространены в Заднестровье (черноземы обыкновенные и южные), республике Крым (черноземы южные), Среднем Приднестровье (черноземы луговые и лугово-черноземные засоленные почвы), Северной Степи (черноземы обыкновенные).

*Христенко А.А. - кандидат. с.-х. наук ведущий научный сотрудник отдела агрохимии, Национальный научный центр «Институт почвоведения и агро-*

*химии имени А.Н. Соколовского». Харьков. Украина; e-mail: khristenko.an@mail.ru*

*Иванова С.Е.- кандидат биологических наук, вице-президент Международного Института Питания Растений по Восточной Европе, Центральной Азии и Ближнему Востоку. e-mail: sivanova@iprni.net*

## Литература

*Христенко А.А. Подвижность “подвижных” элементов питания растений в почвах//Вестник аграрной науки. -2009 г. - № 8.-С.16-20.*

*Olsen, R., Cole, C.V., Watanabe, F.S. and Dean, L.A. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate (1954), U.S. Dept of Agric.Cir.939.*

*Янишевский П.Ф. Химическая оценка фосфатного состояния почв // Агрохимия. - 1996. - № 4. - С.95-116.*

*Методы определения фосфора в почве // Агрохимические методы исследования почв /Под ред.А.В.Соколова. 5-е изд.доп. и перераб. - М.: Наука, 1975.- С.106-190.*

*ПАТЕНТ на полезную модель № 41725 Украина, МПК (2009) G01N 33/24 Способ корректировки точности оценки фосфатного состояния почв по методу Олсен (на основе гидрокарбоната натрия) /Христенко А.А., Бюл. №11. - 6 с.*

## Фосфор: механизмы потерь из почвы и способы их снижения

Иванова С.Е., Логинова И.В., Тиндалл Т.

**В** современном растениеводстве управленческие усилия больше не ограничиваются стремлением к достижению высоких урожаев или улучшению качества получаемой сельскохозяйственной продукции. Они направлены также на предупреждение возможного негативного воздействия на окружающую среду и повышение рентабельности сельскохозяйственного производства.

По оценкам экспертов, 30–40% производственных затрат в растениеводстве связано с покупкой и применением промышленных удобрений, имеющих ключевое значение для обеспечения продовольствием всего человечества, численность которого продолжает расти, и по прогнозу FAO к 2050 году достигнет 9.2 миллиардов человек. Для обеспечения возрастающего населения пищей, производство продовольствия в мире должно как минимум удвоиться (FAO, 2009). Возможности для увеличения площадей пахотных земель сильно ограничены. И в такой ситуации удобрения выступают ключевым элементом в технологии выращивания культур, обеспечивая необходимое повышение продуктивности при сохранении площади пахотных земель на том же уровне. Многие участники мирового рынка продовольствия также признают наличие прямой зависимости между глобальной продовольственной безопасностью и доступностью минеральных удобрений.

Однако остается актуальным вопрос о том, мо-

жем ли мы, как ответственное сообщество, занимающееся сельскохозяйственным производством и озабоченное сохранением плодородия почв и окружающей среды, совершенствовать производство удобрений, повышая эффективность использования питательных веществ сельскохозяйственными растениями.

В продуктивных почвах одновременно протекающие биологические и химические процессы понижают эффективность фосфорных удобрений: коэффициент использования фосфора из удобрений составляет в среднем 15-25% от внесенной нормы. В настоящей работе рассматриваются некоторые из этих проблем и обосновывается необходимость совершенствования технологии удобрения почв путем применения удобрений с повышенной эффективностью.

Фосфор необходим для роста и развития всех сельскохозяйственных культур. В растениях фосфор входит в состав нуклеиновых кислот, фосфолипидов и целого ряда коферментов. Поэтому достаточная обеспеченность растений этим элементом необходима для нормального протекания процессов фотосинтеза, дыхания, аккумуляции и переноса энергии, деления и роста клеток. В частности, фосфор ускоряет созревание растений, что может значительно повышать эффективность использования воды. Для нормального развития сельскохозяйственные растения должны получать достаточное количество фос-

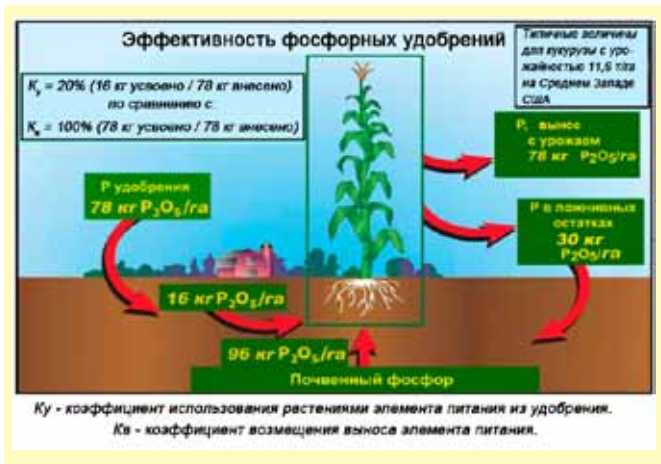


Рис. 1. Эффективность фосфорного удобрения в почвах (Fixen, 2010)

фора, внесенного в нужное время и в надлежащей форме, чтобы завершить свой продукционный цикл без снижения урожайности.

Так как цены на фосфорные удобрения, по-видимому, продолжат расти в среднесрочной перспективе, повышение эффективности фосфорных удобрений является решающим фактором для увеличения урожайности сельскохозяйственных культур, сохранения рентабельности и рационального использования природных ресурсов. Если мы сможем увеличить поступление фосфора из удобрений в растения и снизить его потери из почвы, то эффективность фосфорных удобрений значительно возрастет (рис. 1).

Фосфор находится в почве как в органической, так и в неорганической форме и поглощается растениями из почвенного раствора. Фосфор усваивается растениями в виде аниона фосфорной кислоты, главным образом, в виде дигидрофосфата ( $H_2PO_4^-$ ). Гидрофосфат ( $HPO_4^{2-}$ ) также усваивается растениями, но в меньшей степени. Это связано с тем, что в условиях слабокислой реакции среды, характерной для большинства основных плодородных почв (рН почвенного раствора колеблется от 5 (дерново-подзолистые почвы) до 7 (черноземы)), растения имеют

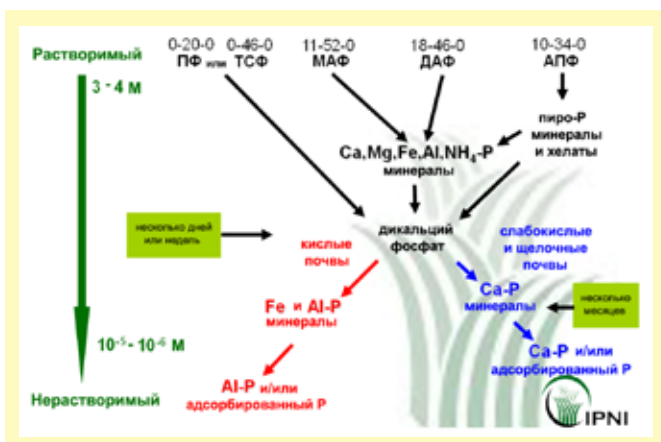


Рис. 2. Трансформация фосфорных удобрений и образовавшихся труднорастворимых соединений (Fixen, 1992).

Условные обозначения: ПФ – простой суперфосфат  
 ТСФ – двойной суперфосфат  
 МАФ – моноаммонийфосфат (аммофос)  
 ДАФ – диаммонийфосфат (диаммофос)  
 АПФ – полифосфат аммония

в своем распоряжении главным образом дигидрофосфат, значительно преобладающий над гидрофосфатом. В результате минерализации органического вещества почвы фосфор, содержащийся в природных органических соединениях, органических удобрениях и компостах, переходит в легкоусвояемые растениями минеральные соединения.

Рассмотрим основные факторы, оказывающие негативное влияние на эффективность фосфорных удобрений. Прежде всего, иммобилизация или осаждение водорастворимых солей фосфорной кислоты из удобрений, то есть химическое связывание фосфатов почвами, снижает концентрацию минеральных соединений фосфора в почвенном растворе. Кроме того, потери фосфора из почвы могут быть связаны с эрозией почвы. На некоторых полях фосфор вымывается поверхностным и почвенным стоком вместе с почвенным раствором, что часто является причиной эвтрофикации водоемов. Снижение этих потерь является частью рационального природопользования, которое должно признаваться и осуществляться каждым руководителем, исследователем и сельхозпроизводителем.

Среди всех рассматриваемых факторов, наибольшее снижение эффективности фосфорных удобрений связано с химическим связыванием фосфатов катионами-антагонистами. Водорастворимые соли фосфорной кислоты, попадая в почвы с удобрениями, через некоторое время в слабокислых и слабощелочных условиях в результате химического связывания с кальцием (Ca) и магнием (Mg) превращаются в двузамещенные фосфаты – дикальций фосфат ( $CaHPO_4 \cdot 2H_2O$ ) и димагний фосфат ( $MgHPO_4$ ), а в кислой среде в результате взаимодействия с оксидами алюминия и железа – в малорастворимые фосфаты Al и Fe ( $AlPO_4$ ,  $Al(OH)_3PO_4$ ,  $FePO_4$ ,  $Fe_2(OH)_3PO_4$  и др.). Хотя считается, что максимальная доступность фосфора для растений достигается при значениях рН, близких к нейтральному (от 5.5 до 7.5), и в этом диапазоне значений рН происходит фиксация фосфатов почвы. По некоторым оценкам, более тридцати комбинаций фосфатов участвуют в процессе фиксации фосфора. Химическая фиксация фосфатов, поступивших из внесенных удобрений, удерживает эффективность применяемых фосфорных удобрений на относительно низком уровне и увеличивает издержки сельскохозяйственного производства. Эффективность использования фосфора из удобрений растениями в первый год применения оценивается в пределах 5–25% от внесенного количества. Для того, чтобы снизить себестоимость сельскохозяйственной продукции и не допустить эвтрофикацию водных объектов, эффективность использования фосфорных удобрений необходимо повышать (рис. 2).

Исследования показали, что такие агротехнические приемы как ленточное внесение удобрений или технологии прямого посева с одновременным внесением удобрений, а также использование высокоэффективных азотных и фосфорных удобрений, могут повысить урожай и эффективность использования питательных элементов во многих системах земледелия. Большая часть этих приемов была изучена

**Таблица 1.** Эффективность минеральных удобрений, содержащих аммофос без обработки полимером AVAIL® и с данным препаратом.

Вариант опыта	Пшеница яровая	Картофель столовый	Лук репчатый	Свекла столовая	Капуста белокочанная
	т/га				
Контроль	2.81	25.9	18.1	33.8	10.2
NPK	3.69	49.3	27.1	51.0	13.0
NPK (МАФ+Avail)	4.01	58.8	29.0	55.0	15.8
НСР <sub>05</sub> , т/га	0.30	4.9	1.5	3.9	2.9

в течение многих лет, и было показано, что данные приемы также могут увеличивать эффективность и фосфорных удобрений.

Исследования в этом направлении будут продолжаться, но уже показано, что именно улучшение химического состава удобрений оказывает влияние на реакционную способность труднорастворимых соединений, которые образуются в непосредственном окружении гранул фосфата или в пределах ленты внесенного удобрения. Одним из таких препаратов является продукт, который продается под брендом AVAIL®<sup>1</sup>.

AVAIL® — это органический комплекс, содержащий сополимеры малеиновой и итаконовой кислот, а также запатентованные производные дикарбоновых кислот. Он разработан для того, чтобы связать катионы-антагонисты (Al, Fe, Ca, Mg и др.) в почве вокруг гранулы удобрения и тем самым уменьшить химическое связывание фосфора и сохранить его в форме, доступной для растений, в течение большей части вегетационного периода однолетних сельскохозяйственных культур. AVAIL® поставляется по всему миру фирмой Specialty Fertilizer Products. По информации компании-производителя, результаты испытаний продукта AVAIL®, проведенные третьей стороной, включая данные, полученные в университетах и государственных учреждениях, а также демонстрационные опыты на полях фермеров, показали стабильное повышение эффективности использования фосфора из удобрений, которое может быть оценено следующими показателями: рост урожайности, улучшение качества продукции, повышение концентрации фосфора в тканях растений и увеличение его доступности растениям в течение вегетационного периода. Полимер AVAIL® используется для пропитывания сухих гранулированных фосфорных удобрений или включения в состав жидких препаратов, таких как полифосфаты аммония или растворы, содержащие ортофосфаты, которые могут использоваться в качестве стартовых (припосевных) удобрений. Полученные данные также показывают применимость AVAIL® для фертигации (внесения удобрений в системах капельного орошения) (Tindall, 2011).

В 2009-2010 годах в Украине кафедрой агрохимии и качества продукции растениеводства Национального университета биоресурсов и природопользования Украины проводились опыты по изучению эффективности AVAIL® при обработке им аммофоса. Полученные результаты показали, что добавление препарата AVAIL® повышает эффективность приме-

нения фосфорных удобрений.

Полевые испытания были проведены на опытной станции (Бориспольский район, Киевская область) в овощном севообороте (пшеница яровая, картофель столовый, свекла столовая, лук репчатый, капуста белокочанная) в условиях орошения на темно-серой оподзоленной легкосуглинистой почве, характеризующейся низким для овощных культур и средним – для пшеницы содержанием подвижного фосфора (156 мг/кг P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, определенного по методу Кирсанова).

Общая схема опыта для всех культур включала варианты: 1) Без удобрений (контроль); 2) NPK; 3) NPK (МАФ + AVAIL). Во втором варианте использовали минеральные удобрения в виде аммофоса, аммиачной селитры и калия хлористого (для пшеницы) или сульфата калия (для овощных культур). В варианте 3 обычный аммофос был заменен на аммофос с добавлением AVAIL®. Под пшеницу яровую дозы удобрения составили 50 кг N/га, 80 кг P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/га и 80 кг K<sub>2</sub>O/га, внесенных в основное внесение, и 50 кг N/га - в подкормку в фазе кущения. Под картофель столовый вносили в основное удобрение 85 кг N/га, 100 кг P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/га и 180 кг K<sub>2</sub>O/га, в подкормку перед гребнеобразованием – 55 кг N/га. Лук репчатый удобряли в основное внесение 70 кг N/га, 90 кг P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/га и 120 кг K<sub>2</sub>O/га, в подкормку – 30 кг N/га в фазу 3-6 листков. Под свеклу столовую вносили в основное удобрение 90 кг N/га, 80 кг P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/га и 120 кг K<sub>2</sub>O/га; под капусту белокочанную – 90 кг N/га, 100 кг P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/га и 160 кг K<sub>2</sub>O/га и 30 кг N/га в подкормку в фазу 4-6 листков.

В данном исследовании контрольный вариант без удобрений сравнивался с вариантами, в которых вносились минеральные удобрения, содержащие аммофос без обработки полимером AVAIL® и с данным препаратом (табл. 1). Результаты настоящего исследования показали, что обработка аммофоса препаратом AVAIL® повышает эффективность применения фосфорных удобрений для всех изученных культур. Применение минеральных удобрений повышало урожайность яровой пшеницы на 0.88, картофеля на 23.4, репчатого лука на 9.0, столовой свеклы на 17.2, а капусты белокочанной на 2.8 т/га по сравнению с контролем. Обработка аммофоса полимером AVAIL® повысила урожай зерна пшеницы яровой еще на 0.32, картофеля столового на 9.5, лука репчатого на 1.9, свеклы столовой на 4.0, а капусты белокочанной на 2.8 т/га.

Наряду с повышением урожайности было достигнуто и улучшение качества полученной продукции при использовании продукта AVAIL® в составе аммофоса. Так, была отмечена тенденция к повышению содержания витамина С и снижению содержания нитратов в клубнях картофеля.

<sup>1</sup> Упоминание данного продукта не означает его продвижения на настоящей публикации.

Таким образом, обработка фосфорных удобрений полимерами - один из перспективных путей повышения эффективности фосфорных удобрений. Препарат AVAIL® позволяет ослабить процессы связывания фосфора в почвах, повышая при этом коэффициент его использования растениями, что делает применение данного полимера экономически и экологически обоснованным приемом в технологии выращивания сельскохозяйственных культур.

Иванова С.Е.- кандидат биологических наук, вице-президент Международного Института Питания Растений по Восточной Европе, Центральной Азии и Ближнему Востоку. e-mail: sivanova@ipni.net.

Логинова И.В. – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры агрохимии и качества продукции растениеводства Национального университета биоресурсов и природопользования Украины. e-mail: pristash@mail.ru

Тиндалл Т. - главный агроном J.R. Simplot Company. e-mail: terry.tindall@simplot.com

Авторы выражают благодарность сотрудникам Национального Университета Биоресурсов и Природопользования Украины: доктору сельскохозяйственных наук, профессору Быкину А.В. за координацию исследований, а также Быкину Н.Н., Суворовой Н., Тарасенко А., Гордиенко С. и Голембовскому А. за помощь в их проведении.

## Литература:

*The state and food and agriculture, FAO, 2009.*

Fixen P. P Efficiency and Effectiveness in Cropping Systems of the U.S. Symposium: Optimizing the Efficiency of P Fertilizer Use to Conserve an Essential and Limited Global Resource, November 2, 2010

Fixen P. Optimum Phosphate Fertilizer Products and Practices for Temperate-Climate Agriculture. Proceedings of an International Workshop Phosphate Fertilizers and the Environment, March 23-27, 1992

Tindall T. and Mooso G. Nitrogen and phosphorus mechanisms of loss from the soil system and effects to slow those losses and increase plant availability. Proceedings of the Western Nutrient Management Conference Vol. 9 Reno Nevada March 3-4, 2011. Soil Fertility Manual, IPNI, 2006.

# Роль органического вещества почвы в получении высоких урожаев и повышении эффективности использования азота и фосфора растениями

Дж.Джонстон

Органическое вещество почвы имеет основополагающее значение в обеспечении растений элементами питания, особенно в условиях постоянного повышения потенциальной урожайности сельскохозяйственных культур. В этой статье обсуждаются данные о взаимодействии азота и фосфора с органическим веществом почвы, а также роль органического вещества в получении высоких урожаев сельскохозяйственных культур, полученные в многолетних полевых опытах на Ротамстедской опытной станции.

**П**ервый пример вклада органического вещества (ОВ) почвы в повышение урожайности сельскохозяйственных культур, приведенный в настоящей статье, - это результаты опыта с бессменным ячменем на Ротамстедской опытной станции в Хусфилде. Опыт в Хусфилде был заложен в 1852 г. на тяжелосуглинистой почве, в которую ежегодно вносились минеральные удобрения (НРК) или навоз в дозе 35 т/га. В результате в настоящее время содержание ОВ в варианте с внесением НРК и в варианте с внесением навоза составляет 1.74 и 6.16% соответственно. Начиная с 1968 г., в обоих вариантах опыта ежегодно вносились четыре дозы азотного удобрения (0, 48, 96 и 144 кг N/га). Изменения в урожайности зерна, начиная с середины 70-х годов 20-го века, для трех последовательно выращиваемых сортов ярового ячменя с возрастающей потенциальной урожайностью, показаны на **рис. 1**. На почве с более низким содержанием ОВ наблюдалась отзывчивость ячменя на азотные удобрения, при этом различия в максимальной урожайности между тремя сортами были невелики в

течении трех периодов исследований. На почве с более высоким содержанием ОВ ячмень слабо отзывался на азотные удобрения, но поскольку потенциальная урожайность от сорта к сорту повышалась, их максимальная урожайность также увеличивалась вследствие более высокого содержания ОВ в почве. В настоящее время разница между максимальной урожайностью зерна в двух вариантах опыта превышает 2.5 т/га.

Похожие результаты были получены в длительном опыте с озимой пшеницей в Брудбалке. В этом опыте начиная с 1843 г. ежегодно вносились минеральные удобрения или навоз в дозе 35 т/га. В результате в настоящее время содержание ОВ в варианте с внесением НРК и в варианте с внесением навоза составляет 1.93 и 4.87% соответственно. В этом опыте сравнивали урожайность зерна при разных дозах азотных удобрений на фоне РК с урожайностью, полученной после внесения одного навоза. До 1967 г. урожайность зерна после внесения навоза часто была немного выше, чем после внесения минеральных удобрений (Garner

and Dyke, 1969), но повышение урожайности озимой пшеницы после внесения навоза было меньше, чем для ярового ячменя, возможно потому, что озимая пшеница формирует корневую систему в течение более длительного вегетационного периода. После того как с 1968 года стали выращивать короткостебельные сорта с улучшенным соотношением зерно/солома и более высокой потенциальной урожайностью, большая урожайность была получена после внесения навоза только при дополнительном использовании азотного удобрения в дозе 96 кг N/га. Интересно, что когда сорт Hereward начали выращивать в Бродбалке в 1996 г., внесение дополнительно к навозу азотного удобрения в дозе 96 кг N/га не привело к дальнейшему увеличению урожайности по сравнению с внесением оптимальной дозы минеральных удобрений (Johnston et al., 2009). Начиная с 2005 года было необходимо

вносить дополнительно к навозу 144 кг N/га для получения более высокой урожайности, чем при внесении только минеральных удобрений. По-видимому, суммарное количество доступного для растений азота, содержащегося в навозе (35 т/га), и минерализованного азота из накопленного ОВ было недостаточно для получения максимальной урожайности сорта озимой пшеницы с высокой потенциальной урожайностью. Интересно обсудить возможные причины этого.

### Взаимодействие органического вещества почвы и азота

В настоящее время к проблеме эффективного использования азота в сельском хозяйстве проявляется значительный интерес. Это связано не только с тем, что потери различных форм азота из почвы могут иметь неблагоприятные экологические по-

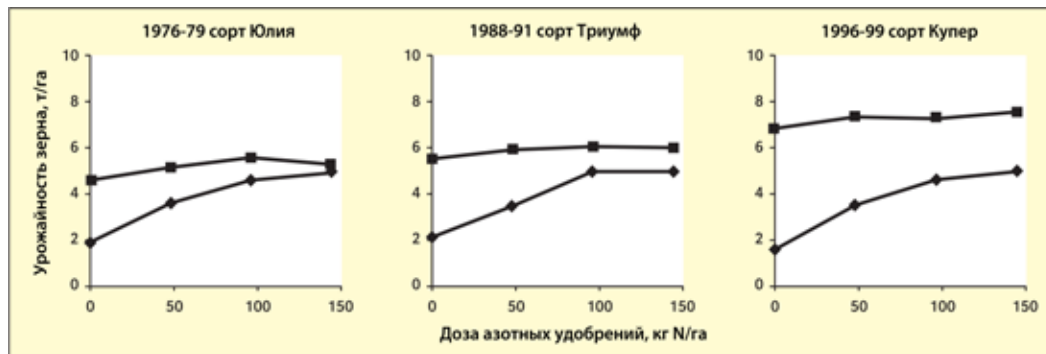


Рис. 1. Отзывчивость трех сортов ярового ячменя с возрастающей потенциальной урожайностью (слева направо) на внесение азотных удобрений в опыте с бессменным ячменем в Хусфилде, Ротамстед. Ячмень выращивали на почвах с двумя уровнями содержания органического вещества -1.74% (ромбы) и 6.16% (квадраты)

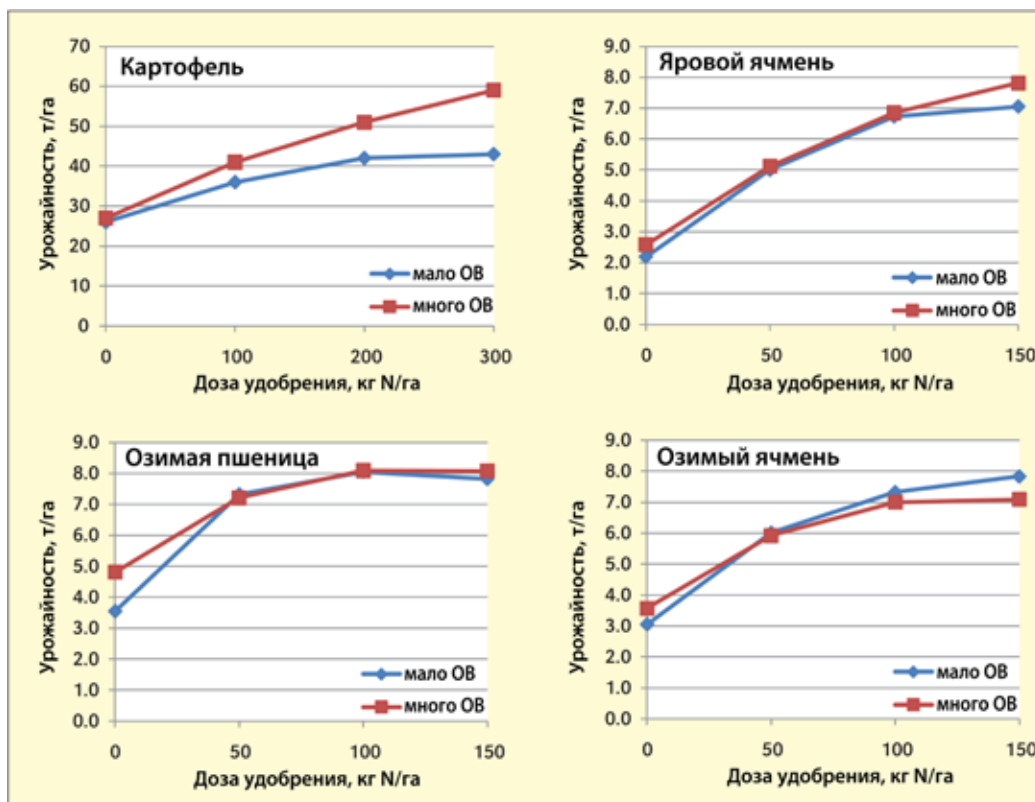


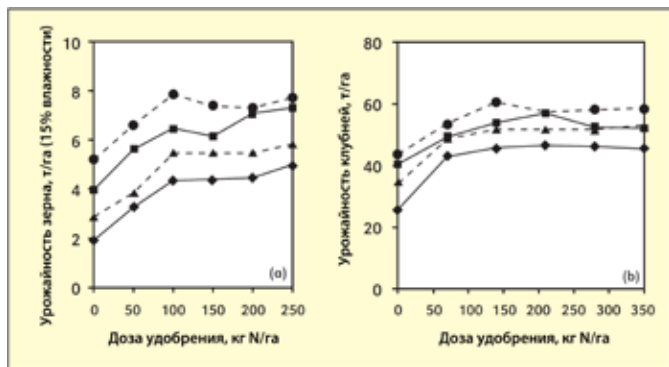
Рис. 2. Отзывчивость яровых и озимых культур на азотные удобрения. Культуры выращивались на легкосуглинистой почве с двумя уровнями содержания органического вещества (1.3 и 3.4%).

следствия, но также и с тем, что они приводят к финансовым потерям фермеров. Многочисленные данные подтверждают более эффективное использование азота на почвах, содержащих больше органического вещества и лучшей оструктуренности, что позволяет корням растений охватывать больший объем почвы и более эффективно извлекать элементы питания.

На легкосуглинистой почве с двумя уровнями содержания ОВ в разные годы выращивали картофель, яровой ячмень, озимую пшеницу и озимый ячмень с внесением четырех возрастающих доз азотных удобрений (рис. 2).

Урожайность картофеля и ярового ячменя всегда была выше на почве, содержащей больше ОВ, независимо от дозы азота, и эффективность использования азота из удобрений повышалась с ростом урожайности. Лучшая оструктуренность почвы, содержащей больше ОВ, позволяла корням быстрее





**Рис 3.** Отзывчивость озимой пшеницы в 1987–88 годах (а) и картофеля в 1988–89 годах (б) на внесение азотных удобрений на разных фонах органических удобрений (см. текст). Варианты опыта/содержание органического вещества, %: Ромбы – без внесения органических удобрений/0.65%; Треугольники – заделка соломы/0.85%; Квадраты – внесение навоза/1.06%; Круги – заделка злаково-клеверного травостоя/0.9%.

развиваться и лучше поглощать элементы питания в большем объеме почвы. Урожайность озимых культур, вегетационный период которых длиннее, чем у яровых, почти не зависела от содержания ОВ при любой дозе азотных удобрений. Возможно, это происходило потому, что озимые культуры, посеянные осенью, имели больше времени для того, чтобы развить хорошую корневую систему и в почве с низким содержанием ОВ.

В другом опыте, начиная с 1964 г., на легкосуглинистой почве изучалось влияние различных органических удобрений на содержание ОВ в почве и урожайность возделываемых культур. Схема опыта включала два периода внесения органических удобрений (периоды «применения») и два периода выращивания «контрольных» культур (Johnston et al., 2009). Ежегодное внесение органических удобрений в соответствующие периоды включало заделку соломы (7.5 т/га на абсолютно сухой вес), внесение навоза (50 т/га на сырой вес), а также выращивание злаково-клеверного травостоя (временное пастбище) и его заделку в качестве «зеленого удобрения» перед посевом «контрольных» культур для оценки влияния дополнительного ОВ, накопленного в те-

чение двух периодов «применения».

В 1986 г. содержание органического углерода в верхнем слое почвы 0-23 см в варианте без внесения органических удобрений было 0.65%, что примерно соответствовало равновесному уровню для данной почвы. Органические удобрения повысили содержание углерода в почве до 0.85% при внесении соломы, до 1.06% при внесении навоза и до 0.9% после заделки 8-летнего злаково-клеверного травостоя. Урожайность картофеля (в 1988 и 1989 годах) и озимой пшеницы (в 1987 и 1988 годах) была получена в вариантах с внесением шести доз азота и сравнивалась с величинами, полученными в варианте без внесения органических удобрений. (рис. 3). Минимальную урожайность всегда получали на почве с более низким содержанием ОВ, а максимальную – в основном на почвах, распашанных после злаково-клеверного травостоя. Во всех случаях более низкие дозы азотных удобрений требовались для достижения оптимальной урожайности на почве с более высоким содержанием ОВ.

Полученные данные позволяют сделать два интересных вывода. Во-первых, максимальная отзывчивость озимой пшеницы на высокие дозы азотных удобрений наблюдалась в варианте с внесением навоза (рис. 3а)—эффект, аналогичный тому, что наблюдался в вышеописанном опыте в Брудбалке, и, возможно, объясняемый той же причиной. Во-вторых, после распашки злаково-клеверного пастбища максимальная урожайность была достигнута в варианте с внесением 100 кг N/га. Возможно, это произошло в результате дополнительного поступления азота в почву в конце вегетационного периода вследствие минерализации азота из остатков травосмеси, заделанных предыдущей осенью. Если этот минерализованный азот находится ниже по профилю почвы, в зоне, где корни активно поглощают элементы питания, то его благоприятное воздействие будет трудно спутать с влиянием азотного удобрения, внесенного на поверхность почвы.

Кроме того, следует отметить еще два момента. Во-первых, хотя максимальная урожайность была получена после распашки злаково-клеверного тра-

**Таблица 1.** Урожайность и содержание доступного фосфора (по методу Олсена), соответствующее 95% от максимальной урожайности, определенной из графика зависимости средней урожайности для двух лет от содержания доступного фосфора в почве.

Урожайность	Содержание органического вещества в почве, %	Урожайность, соответствующая 95% от максимальной урожайности, т/га	Содержание доступного фосфора, соответствующее 95% максимальной урожайности	R <sup>2</sup>
<b>Полевой опыт</b>				
Зерно ярового ячменя, т/га	2.4	5.00	16	8.83
	1.5	4.45	45	0.46
Клубни картофеля, т/га	2.4	44.7	17	0.89
	1.5	44.1	61	0.72
Сахарная свекла – сбор сахара, т/га	2.4	6.58	18	0.87
	1.5	6.56	32	0.61
<b>Вегетационный опыт</b>				
Абсолютно сухое вещество травы, г/сосуд	2.4	6.46	23	0.96
	1.5	6.51	25	0.82

востоя, содержать луг в течение трех лет должно быть экономически целесообразно в рамках общего бюджета хозяйства. Во-вторых, постоянный благоприятный эффект давала заделка соломы – один из немногих способов, доступный для большинства фермеров и позволяющий немного увеличить или, по крайней мере, поддержать уровень содержания ОВ в почве, а также, возможно, предотвратить его потери.

### **Взаимодействие органического вещества почвы и фосфора**

Кроме важной зависимости между содержанием ОВ и отзывчивостью растений на азотные удобрения, существуют не менее важные взаимодействия между ОВ и содержанием доступного для растений фосфора. В опыте на тяжелосушлистой почве, которая, как известно, трудно поддается обработке, особенно весной, были заложены опытные деланки с двумя уровнями содержания ОВ - 1.5% (пашня) и 2.4% (луг), и 24 уровнями содержания фосфора, определяемого в вытяжке гидрокарбоната натрия по методу Олсена. После 12-летнего подготовительного периода на участках выращивали картофель, сахарную свеклу и яровой ячмень в двух ротациях трехлетнего севооборота. По полученным данным для каждой культуры строили график для средних за два года значений урожайности в зависимости от содержания доступного фосфора в почве, определенного по методу Олсена. Кривую отзывчивости статистически обрабатывали для определения максимальной урожайности и уровня содержания фосфора в почве, соответствующего 95% от максимальной урожайности (табл. 1).

Урожайность ярового ячменя, соответствующая 95% от максимальной урожайности, была существенно ниже на почве с низким содержанием ОВ, чем на почве с более высоким содержанием ОВ. Урожайность картофеля и сахарной свеклы была одинаковой на обеих почвах, потому что эти культуры высеваются позже и почву для них можно подготовить лучше, чем для ярового ячменя. Однако содержание доступного фосфора (по Олсену), соответствующее 95% от максимальной урожайности, в почве с большим содержанием ОВ было гораздо ниже. Положительное влияние ОВ на урожайность было связано с улучшением почвенной структуры, что позволяло корням растений свободнее расти и распространяться в почве, и, таким образом, более эффективно находить и поглощать доступный фосфор.

Затем образцы почвы, отобранные со всех 48 деланок (2 уровня содержания ОВ × 24 уровня содержания фосфора по Олсену), были использованы для выращивания райграса в вегетационном павильоне при одинаковых условиях. По результатам были построены кривые отзывчивости - зависи-

мость между суммарной урожайностью, полученной с четырех укосов, и содержанием доступного фосфора, определенного по методу Олсена. Полученные кривые отзывчивости для двух почв с разными уровнями содержания ОВ визуально не различались. Для обеих почв и полученные значения урожайности (95% от максимальной урожайности), и соответствующие уровни содержания доступного фосфора по Олсену (табл. 1), были одинаковыми. Этот факт подтверждает предположение о том, что в полевых опытах именно из-за различной структуры почвы в вариантах с высоким и низким содержанием ОВ, были получены разные значения содержания доступного фосфора в почве, соответствующие 95% от максимальной урожайности.

### **Выводы**

Во многих системах земледелия трудно увеличить содержание ОВ в почве без внесения значительных количеств органических удобрений. Однако необходимо делать все возможное для сохранения и увеличения содержания ОВ в почве, потому что оно улучшает структуру почвы и, следовательно, повышает способность корней растений распространяться в почве в поисках элементов питания, необходимых для нормального роста и развития растений и достижения высокой урожайности. Это особенно важно для поглощения азота и фосфора растениями и, соответственно, более эффективного использования азотных и фосфорных удобрений в сельском хозяйстве.

*Дж. Джонстон – старший научный сотрудник фонда Лоуса, Ротамстедская опытная станция, Великобритания (Lawes Trust, Rothamsted Research, Harpenden, UK. AL5 2JQ). E-mail: johnny.johnston@rothamsted.ac.uk*

*Настоящая статья основана на публикации: Soil organic matter: its importance in sustainable agriculture and carbon dioxide fluxes. A.E. Johnston, P.R. Poulton, and K. Coleman. 2009. Advances in Agronomy 101:1-57.*

### **Литература**

*Garner, H.V. and G.V. Dyke. 1969. Rothamsted Experimental Station Report for 1968, Part 2, 26-49.*

*Johnston, A.E., P.R. Poulton, and K. Coleman. 2009. Advances in Agronomy 101, 1-57.*

*Перевод статьи и адаптация – к.б.н. Иванова С.Е. – вице-президент МИПР по Восточной Европе, Центральной Азии и Ближнему Востоку.*

*Переводчик выражает благодарность Носову В.В. за ценные советы.*

# Новый подход к оценке эффективности использования фосфора из удобрений в сельском хозяйстве

А.Е. Джонстон, Дж. К. Сайерс

*Часто утверждают, что фосфор неэффективно применяется в сельском хозяйстве, и коэффициент использования фосфора из удобрений обычно составляет от 10 до 20%. Мы утверждаем, что такая низкая эффективность является в значительной степени артефактом, связанным с методом расчета. При расчете показателя эффективности балансовым методом с учетом выноса фосфора с урожаем, выраженного в процентах от внесенного фосфора, а также при условии, что содержание доступного фосфора в почве поддерживается около критического уровня, эффективность использования фосфорных удобрений часто превышает 90%.*

В недавно опубликованном обзоре мировой литературы по эффективности применения фосфорных удобрений в различных системах земледелия, климатических условиях и на разных типах почв Сайерс с сотр. (Syers et al., 2008) показали, что эффективность использования фосфора из минеральных удобрений с учетом последствия часто составляет от 50 до 90% при расчете балансовым методом с учетом времени последствия удобрений. В настоящей статье показано, как подходы, описанные в обзоре, могут быть развиты в дальнейшем.

Эффективный коэффициент использования элемента питания из удобрения  $K_{\text{Эф}}$  (%) часто определяется разностным методом – отношением разности в выносе данного элемента с урожаем в вариантах опыта с удобрением и контрольным (без удобрений) к количеству элемента питания, вносимого в почву с удобрением:

$$*K_{\text{Эф}} = \frac{(B_y - B_0)}{Y_d} * 100\%$$

$K_{\text{Эф}}$  – эффективный коэффициент использования элемента питания из удобрения, %

$B_y$  – вынос элемента питания с урожаем с учетом побочной продукции в варианте с внесением удобрений, кг/га

$B_0$  – вынос элемента питания с урожаем с учетом побочной продукции в варианте без внесения удобрений, кг/га

$Y_d$  – количество элемента питания, внесенное с удобрениями (доза удобрения), кг д.в./га

Хотя этот метод обычно хорошо применим для азотных удобрений, для фосфора и калия он имеет некоторые ограничения. Почему? Азот, внесенный в форме минеральных удобрений, содержащих карбамид, аммоний или нитрат, и не использованный растениями, редко остается в почве в исходном виде. Нитраты, оставшиеся в почве после уборки урожая, вымываются из почвенного профиля. При денитрификации происходит восстановление нитратного азота до молекулярного азота или оксидов азота, и их улетучивание. Газообразные потери азота происходят также в виде аммиака. Таким образом,

\* название показателя дано переводчиком Ивановой С.Е. Данный коэффициент соответствует коэффициенту использования питательных веществ из удобрений (КИУ), определенного разностным методом с учетом фактического выноса.

расчитывать коэффициент использования азота из внесенного удобрения лучше всего разностным методом, который учитывает весь азот, поглощенный растением без внесения удобрения. Однако при внесении фосфорных и калийных удобрений потери питательных элементов из неиспользованных удобрений если и происходят, то незначительны. Остаточные количества фосфора и калия из удобрений формируют запасы этих элементов в почве.

Для оценки эффективности использования фосфора из минеральных удобрений может быть применен прямой метод исследования с использованием изотопа  $^{32}\text{P}$ . Однако, значения коэффициента использования фосфора из минеральных удобрений, определенные этим методом, редко превышают 25%. Давайте остановимся и подумаем. Если только 25% фосфора поглощено растениями из недавно внесенного удобрения, то остальные 75% должны поступать из запасов фосфора в почве. А если содержание фосфора в почве должно поддерживаться на постоянном уровне, любая потеря из запасов элемента должна быть восполнена. Так, логично предположить, что общий фосфор в растении, поглощенный частично из удобрения и частично из почвенного запаса, который поддерживается внесением фосфорного удобрения, представляет собой элемент, поступавший из фосфорного удобрения в течение длительного времени. Этот подход для измерения эффективности использования фосфора был предложен Джонстоном и Пултоном (Johnston and Poulton, 1977) и развит впоследствии Сайерсом с сотр. (Syers et al., 2008), назвавшими его «балансовым методом». В этом методе в качестве показателя эффективности использования питательного вещества из удобрения рассчитывают коэффициент выноса элемента питания:

$$**K_B = \frac{B_y}{Y_d} * 100\%$$

$K_B$  – коэффициент выноса элемента питания, %

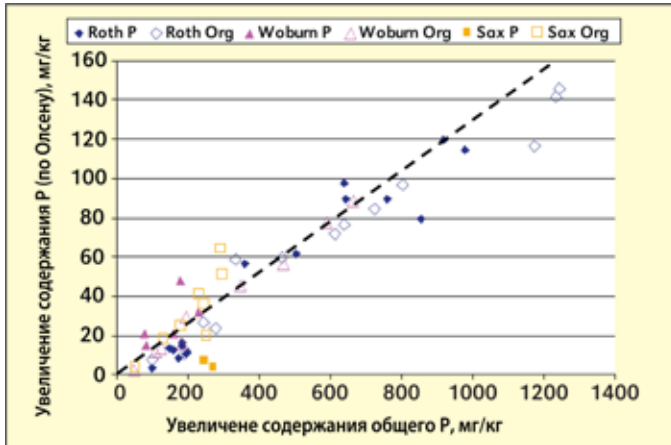
$B_y$  – вынос элемента питания с основной и побочной продукцией, кг/га

$Y_d$  – доза удобрения, кг д.в./га.

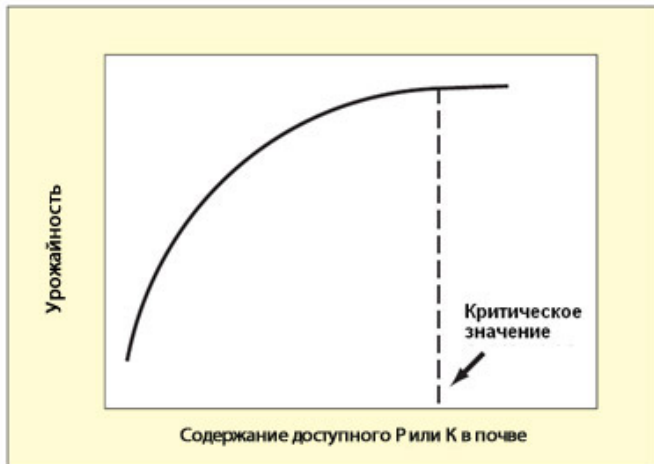
\*\* название показателя дано переводчиком Ивановой С.Е. В русскоязычной литературе аналогичный коэффициент иногда называют «балансовым коэффициентом использования».



**Рис. 1.** Пулы фосфора в почве по степени экстрагируемости рутинными методами определения и доступности растениям



**Рис. 2.** Зависимость между содержанием общего и доступного фосфора по Олсену (Пунктирная линия соответствует содержанию остаточного фосфора, равному 13% от добавленного фосфора)



**Рис. 3.** Сколько фосфора должно содержаться в легкодоступном пуле?

Преимущество данного метода в том, что он учитывает поступление фосфора и из почвенного запаса, а также не требует закладки контрольных делянок в опытах.

Другой аспект оценки эффективности использования фосфорных удобрений связан с развитием представлений о поведении фосфора в почве. Джонстон (Johnston, 2001) предположил существование четырех пулов фосфора в почве, различающихся по степени доступности для растений. Эта концепция была позднее развита Сайерсом с сотр. (Syers et al., 2008). Наряду с характеристикой четырех пулов фосфора по степени доступности элемента для растений, они связали пулы фосфора со степенью его экстрагируемости химическими реагентами. Таким

образом, данные о содержании доступного фосфора в почвенных образцах, полученные в лаборатории, могут быть использованы для оценки его доступности для растущего в поле растения. Общая концепция показана на диаграмме (рис. 1).

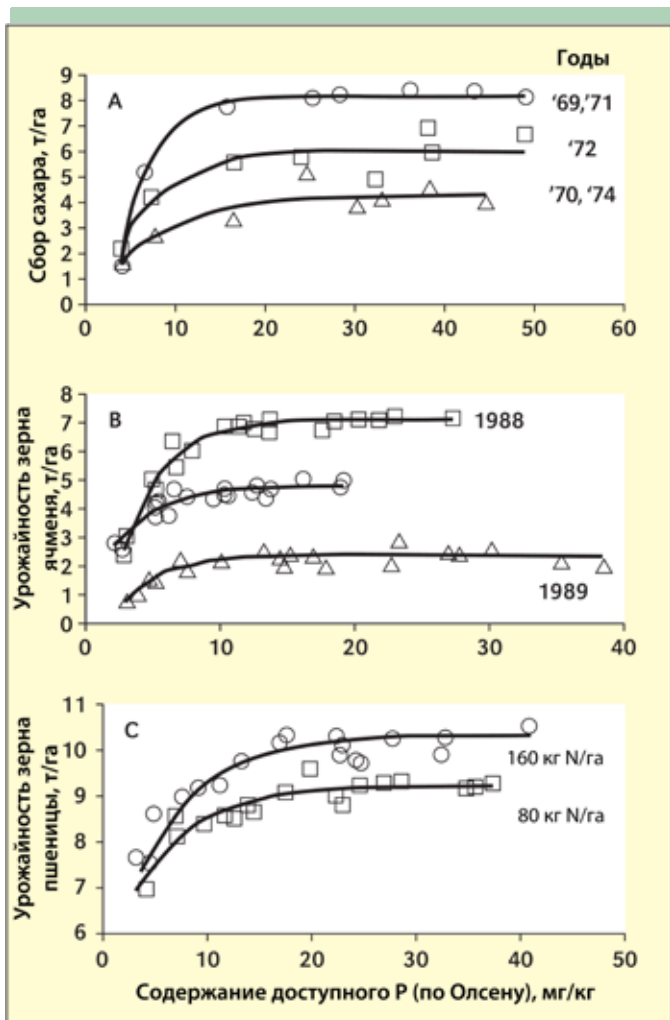
Количество фосфора в каждом из четырех пулов зависит от энергии связи фосфора с адсорбционными центрами как на поверхности, так и внутри частиц твердой фазы почвы, способных удерживать фосфор, и от количества таких центров в почвенной матрице. Для наименее доступного пула предполагается, что фосфор может вступать в другие реакции с компонентами почвы (Syers et al., 2008). Фосфор поглощается корнями растений в виде ортофосфат-ионов, главным образом, ионов  $H_2PO_4^-$ , и в меньшей степени ионов  $HPO_4^{2-}$ . Согласно прежним представлениям о трансформации фосфора, внесенного с удобрением, если этот элемент не был использован растением, то он закрепляется в почве в виде труднорастворимых соединений и становится недоступным для корней растений. Однако к 50-м годам 20-го века были получены данные полевых опытов, показывающие, что если благодаря внесению минеральных удобрений и навоза в прошлом был создан большой запас фосфора в почве, то этот резерв мог обеспечить растения достаточным количеством фосфора для повышения урожайности.

Наиболее важный момент, показанный на рис. 1 – это обратимость перехода фосфора из почвенного раствора, в пул легкодоступного фосфора и пул менее доступного фосфора. Примеры, подтверждающие данные полевых опытов, описаны Сайерсом с сотр. (Syers et al., 2008). При определении содержания доступного фосфора в лаборатории в вытяжку переходит фосфор почвенного раствора и фосфор из легкодоступного для растений пула. Поскольку эта фракция почвенного фосфора выделена исходя именно из метода химического анализа почвы, используемый экстрагент не имеет значения. Главное, чтобы полученные данные точно характеризовали обеспеченность почвы фосфором и отзывчивость растений на внесение фосфорных удобрений.

Обратимый переход фосфора между тремя первыми пулами подразумевает установление равновесия между ними. В длительных опытах на тяжелосуглинистой почве в Ротамстеде, легкосуглинистой почве в Уберне и опесчаненной тяжелосуглинистой почве в Саксмундхаме были получены данные, показывающие увеличение содержания как доступного для растений фосфора (определенного по методу Олсена), так и общего фосфора в верхнем слое почвы 0-23 см. Для всех трех типов почв наблюдалась линейная зависимость между содержанием доступного и общего фосфора. (рис. 2).

Аналогичным образом, в опыте, проведенном в Северной Каролине, Макколлум (McCullum, 1991) показал, что после внесения фосфорного удобрения в течение 9 лет в суммарной дозе до 1128 кг Р/га лишь около 20% фосфора экстрагировалось методом Мелиха-1.

Данная концепция, описывающая поведение фосфора в почве и трансформацию фосфора удобрений, вызывает ряд практических вопросов.



**Рис. 4.** Примеры кривых отзывчивости для определения критических значений содержания доступного фосфора в почве для некоторых сельскохозяйственных культур.

### Первый вопрос: Какое содержание легкодоступного фосфора в почве может обеспечить оптимальную урожайность?

На графиках зависимости урожайности культуры от содержания доступного фосфора в почве, определенного адекватным аналитическим методом, сначала урожайность растет быстро, а потом медленнее до тех пор, пока не достигнет плато – асимптотического уровня (рис. 3). Содержание доступного фосфора в почве, при котором достигается асимптотический уровень урожайности, может считаться критическим уровнем для данной культуры. Содержание доступного фосфора ниже этого критического уровня приводит к недобору урожая. Внесение фосфорных удобрений в почву с содержанием доступного фосфора выше этого критического значения необходимо только для того, чтобы поддерживать содержание доступного фосфора в почве на уровне, не ограничивающем урожайность. При этом отзывчивость на внесение удобрений не ожидается. Примеры кривых отзывчивости - зависимости урожайности от содержания доступного фосфора, полученных по данным Ротамстедского опыта, показаны на рис. 4. Для трех культур - сахарной свеклы (сбор сахара с гектара), ярового ячменя и озимой ржи, критические уровни различались не-

значительно, хотя максимальная урожайность различалась по годам в зависимости от погодных условий или доз азота. Для достижения более высокого уровня урожайности не требовалось более высокого содержания доступного фосфора в верхнем слое 0-23 см, чем критический уровень.

### Второй вопрос: Сколько фосфора должно быть внесено с удобрениями для повышения содержания доступного фосфора в почве до критического уровня?

Ответ на этот вопрос во многом зависит от конкретных почвенно-климатических условий. Поэтому необходимо проведение больших дополнительных исследований с учетом типа почвы, ее объемной плотности, способа внесения фосфорных удобрений и глубины отбора проб. Два следующих примера показывают, что можно сделать. Первый пример - опыт, заложенный в 1856 г. на тяжелосуглинистой почве Ротамстедской опытной станции. Схема опыта, была изменена для определения количества фосфорных удобрений, необходимых для повышения содержания доступного фосфора (Пултон и Джонстон, частное сообщение). В период с 1865 г. до 1901 г. в пяти вариантах опыта содержание доступного фосфора изменялось в узком диапазоне. С 1986 г. по 1991 г этот диапазон был расширен за счет внесения удобрений в суммарных дозах от 264 до 786 кг P/га. Суммарные дозы внесенных фосфорных удобрений, баланс фосфора, а также содержание доступного фосфора в начале и конце опыта приведены в табл. 1. Благодаря положительному балансу фосфора (182 кг P/га) исходное содержание доступного фосфора повысилось с 7 до 18 мг P/кг почвы. Яровой ячмень выращивали ежегодно с 1986 г. до 1991 г. На кривой отзывчивости асимптотическая урожайность зерна, равная 98% от максимальной, составила 5.21 т/га, а соответствующее содержание доступного фосфора было равно 14 мг P/кг почвы. Таким образом положительного баланса фосфора (182 кг P/га) при внесении суммарной дозы фосфорных удобрений 264 кг P/га в верхний слой почвы (0-23 см) в течение 6 лет было достаточно для повышения содержания доступного фосфора выше критического уровня. Второй пример - опыт, описанный Макколлумом (McCullum, 1991). В этом опыте в опесчаненной легкосуглинистой почве содержание фосфора по методу Мелиха-1 определялось в слое почвы 0-15 см в течение начального 9-летнего периода, когда вносились фосфорные удобрения. В начале опыта содержание доступного фосфора в почве было уже близко к критическому уровню для кукурузы (18-22 г/м<sup>3</sup>) и превышало данный уровень для сои. Однако внесение фосфорных удобрений в дозах от 0 до 1120 кг P/га за 9-летний период приводило к линейному росту содержания доступного фосфора (метод Мелиха-1), при этом каждое внесение 10 кг P/га повышало содержание доступного фосфора на 1 г/м<sup>3</sup>.

**Таблица 1.** Суммарная доза фосфора, баланс фосфора за 1986–1991 гг. и содержание доступного фосфора (по методу Олсена), в 1986 и 1991 г.

Суммарная доза P, кг/га	Баланс P <sup>1</sup> , кг/га	Доступный фосфор, мг/кг	
		1986 г.	1991 г.
786	700	7	48
522	437	8	38
264	182	7	18

<sup>1</sup>Превышение внесенного фосфора над его выносом с урожаем.

### Третий вопрос: Сколько фосфора необходимо для поддержания содержания доступного фосфора на критическом уровне?

Ротамстедский опыт продолжался, но в период с 1993 г. по 1999 г. фосфорные удобрения не вносились. К 1999 г. содержание доступного фосфора в почве находилось в диапазоне от 2 до 31 мг P/кг, что позволило оценить отзывчивость на фосфорные удобрения в зависимости от содержания доступного фосфора в почве. С 2002 г. по 2006 г. под озимую пшеницу, ежегодно вносили 20 кг P/га для возмещения максимального выноса элемента зерном и соломой на тех участках, где фосфорные удобрения ежегодно вносили с 1986 г. по 1991 г. Эта доза фосфорных удобрений позволила поддерживать содержание подвижного фосфора на уровне 1999 г.

Результаты этого опыта показывают, что максимальная урожайность зерна была получена при содержании доступного фосфора в почве на критическом уровне и его поддержании путем возмещения выноса элемента урожаем. В этом случае эффективность использования фосфора из удобрений, применяемых ежегодно, превышала 90% (табл. 2).

В табл. 2 показано, что максимальная урожайность была на уровне 7.9 т/га, при этом соответствующее содержание доступного фосфора было 23 мг P/кг почвы. При повышении содержания доступного фосфора до 31 мг P/кг урожайность не возрастала. На почве, содержащей доступного фосфора менее, чем 14 мг P/кг, урожайность снизилась, что могло привести к финансовым потерям фермера. Поддержание содержания доступного фосфора в почве на критическом уровне путем возмещения элемента, вынесенного надземной биомассой, привело к более чем 95%-ной эффективности использования фосфора из ежегодно вносимых удобрений. Аналогичные результаты были получены, в опыте, описанном Макколлумом (McCullum, 1991), в котором возмещение фосфора, вынесенного с урожаем, поддерживало критический уровень содержания доступного фосфора, определяемого по методу Мелих-1.

### Выводы

В данном обзоре о состоянии фосфора в почве и эффективности использования фосфора из минеральных удобрений предполагается, что почвенный фосфор распределен между четырьмя пулами в зависимости от его доступности для поглощения корнями растений и степени экстрагируемости реагентами, используемыми в почвенных анализах.

**Таблица 2.** Содержание доступного фосфора (по Олсену), максимальная урожайность зерна озимой пшеницы, вынос фосфора зерном и соломой, ежегодная доза фосфорных удобрений и коэффициент выноса фосфора

Содержание доступного фосфора, мг/кг почвы, в 2004 г.	9	14	23	31
Урожайность зерна озимой пшеницы, т/га	7.1	7.8	7.9	7.9
Вынос фосфора зерном и соломой, кг/га	14	27	19	19
Ежегодная доза фосфорного удобрения, кг P/га	20	20	20	20
Коэффициент выноса фосфора, %	70	85	95	95

Предполагается также, что эти два показателя тесно коррелируют.

Эта концепция имеет практическое значение для эффективного использования фосфорных удобрений. В большинстве почв содержание фосфора в пуле, легкодоступном для растений, должно быть увеличено до критического уровня, при котором урожайность не лимитируется недостатком фосфора и таким образом способствует наиболее эффективному использованию других элементов питания, необходимых для достижения оптимальной урожайности, особенно азота. Для большинства почв, в которых содержание доступного фосфора поддерживается около критического уровня, возмещение фосфора, ежегодно выносимого с урожаем, обычно приводит к высокой эффективности использования фосфора, превышающей 90% при оценке «балансовым методом». В настоящее время разрабатывается схема опыта и идет поиск спонсоров для дальнейшей разработки концепции о критическом уровне содержания доступного фосфора для разных систем земледелия, типов почв и климатических условий.

*Дж. Джонстон – старший научный сотрудник фонда Лоуса, Ротамстедская опытная станция, Великобритания (Lawes Trust, Rothamsted Research, Harpenden, UK. AL5 2JQ). E-mail: johnny.johnston@rothamsted.ac.uk*

*Д-р Сайер – сотрудник президента Наресуанского университета, Пхитсанулок, Тайланд. E-mail: keiths@nu.ac.th*

### Литература

- Johnston, A.E. and P.R. Poulton. 1977. Rothamsted Experimental Station Report for 1976, Part 2: 53-85.
- Johnston, A.E. 2001. Principles of crop nutrition for sustainable food production. Proceedings 459. York, UK, International Fertilizer Society. 39 pp.
- McCullum, R.E. 1991. Agron. J. 83, 77-85.
- Syers, J.K., A.E. Johnston, and D. Curtin. 2008. Efficiency of soil and fertilizer phosphorus use. FAO Fertilizer and Plant Nutrition Bulletin 18. Rome, Italy.

*Перевод статьи и адаптация – к.б.н. Иванова С.Е.*

*Переводчик выражает благодарность д.б.н. Романенкову В.А. и к.б.н. Носову В.В. за ценные советы.*

# Роль элементов питания в повышении урожайности яровой пшеницы в Сибири

Гамзиков Г.П., Носов В.В.

Сибирь расположена в азиатской части России на площади около 10 млн. км<sup>2</sup>. В южной части этого региона, где находится более 56 млн. га сельхозугодий, занимаются земледелием и животноводством. Здесь имеется около 23.5 млн. га распашанных земель, что составляет примерно 1/5 часть пашни России. В регионе традиционно и успешно возделываются яровые культуры: пшеница, ячмень, овёс, просо, гречиха, зернобобовые, подсолнечник, картофель и овощи. Из озимых высеваются рожь и тритикале. Перспективны и дают высокие урожаи яровой рапс, соя, сахарная свёкла. Основная доля (около 70%) в структуре посевных площадей принадлежит зерновым культурам, среди которых преобладает яровая пшеница (75-80%). Средняя урожайность яровой пшеницы в Сибирском федеральном округе за последние 5 лет (2004-08 гг.) составила только 1.3 т/га (РОССТАТ, 2010).

Для пшеничного пояса Сибири, расположенного в нескольких природных зонах, характерны значительные колебания по увлажнению (годовые осадки 230-550 мм), температурному режиму (сумма  $t > 10^{\circ}\text{C}$  1400-2800) и продолжительности вегетационного периода (100-140 дней). Почвенный покров пашни в лесной зоне представлен дерново-подзолистыми и серыми лесными почвами (17% от пахотных земель региона), в лесостепи – чернозёмами оподзоленными, выщелоченными, обыкновенными и лугово-чернозёмными почвами (63%), в степи – чернозёмами южными и каштановыми почвами (14%).

Агрохимические параметры потенциального и эффективного плодородия почв вносят весомый вклад в уровни продуктивности сельскохозяйственных культур. Материалы агрохимического обследования (Агрохимическая характеристика почв ..., 2005) свидетельствуют о широком диапазоне содержания гумуса в сибирских почвах – от очень низкого – низкого (<4.0%) до среднего – повышенного (4.1-8.0%) и высокого – очень высокого (>8.1%), при этом в каждую градацию обеспеченности входит около 1/3 обследованной территории (рис. 1). Около 2 млн.

га пашни представлены кислыми почвами, на которых для получения хорошего урожая необходимо проводить известкование.

Основным источником азотного питания растений в агроценозах региона служит подвижный минеральный азот, главным образом, нитратная его форма (Гамзиков, 1981). Сибирские почвы обладают высоким потенциалом накопления N-NO<sub>3</sub> (до 100-120 кг/га в слое 0-40 см) после парования, летней распашки пласта многолетних трав, ранней зяби после зернобобовых и однолетних трав. При посеве по таким предшественникам пшеница не испытывает потребности в дополнительном внесении азотных удобрений. На 2/3 посевов полевых культур, размещаемых по другим предшественникам, обеспеченность почвенным азотом обычно низкая, в связи с чем здесь возникает потребность в ежегодном внесении азотсодержащих удобрений.

Высокую и очень высокую обеспеченность P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> имеет немногим более половины обследуемой пашни, около 1/3 – повышенную и среднюю и лишь 15% – низкую и очень низкую (рис. 1). Наиболее бедны фосфатами (очень низкое и низкое содержание) дерново-подзолистые (57%), южные чернозёмы и каштановые почвы (40%). Большая часть почв (79%) имеют высокую и очень высокую обеспеченность подвижным калием (рис. 1). Таким образом, принимая во внимание агрохимическую ситуацию с обеспечением элементами минерального питания сельскохозяйственных культур в сибирском земледелии, следует сделать вывод о необходимости ежегодного внесения азотных удобрений на площади около 16 млн. га, фосфорных – более чем на 10 млн. га и калийных – на 5 млн. га.

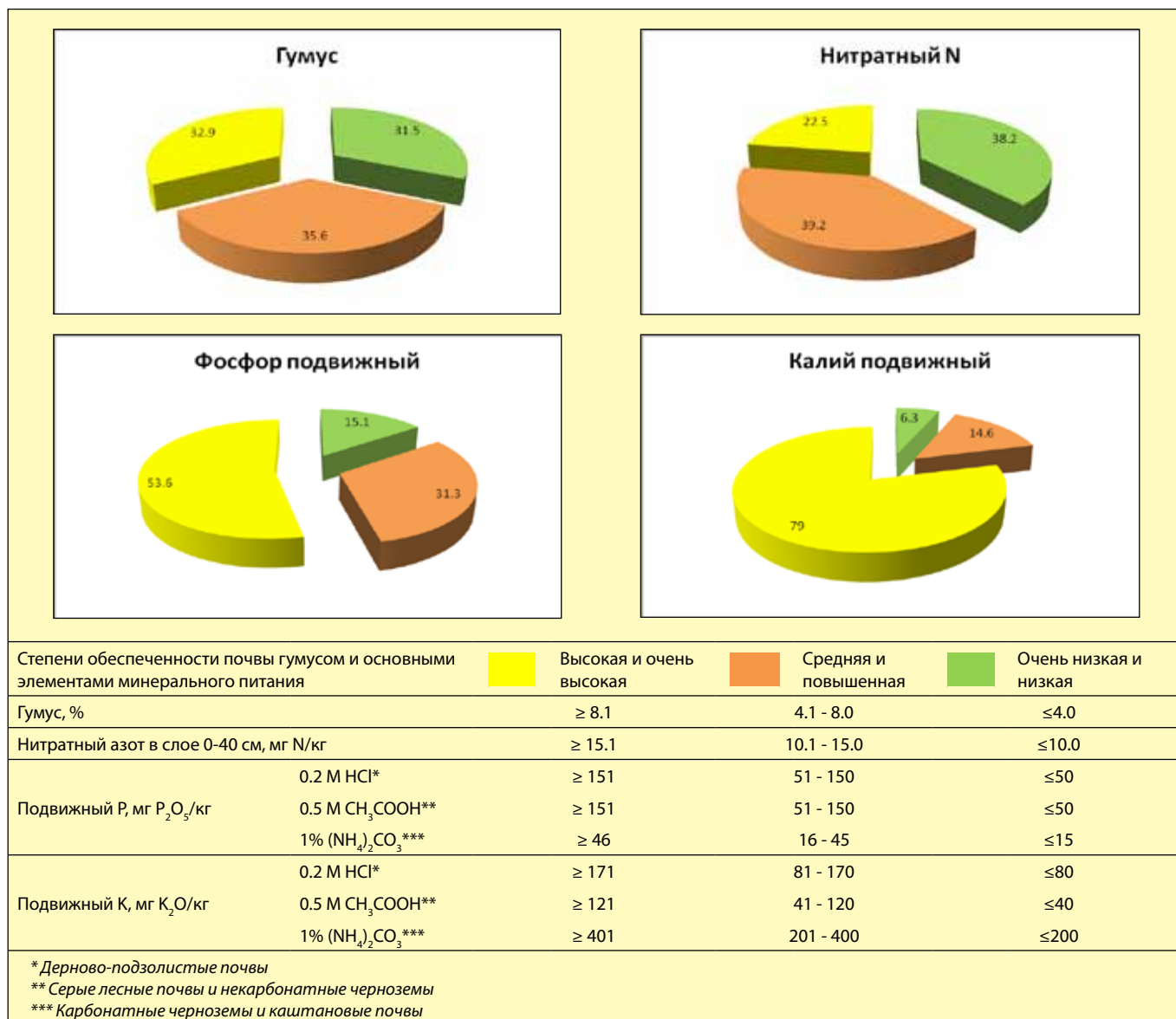
Почвенно-климатические условия основных природных зон Сибири благоприятны для получения высокой продуктивности яровой пшеницы при обязательном соблюдении технологии её возделывания (табл. 1). Роль минеральных удобрений в получении высоких урожаев особенно высока в лесной зоне – на бедных по плодородию дерново-подзолистых и

**Таблица 1.** Возможные уровни продуктивности яровой пшеницы в зависимости от природных условий Сибири и систем земледелия, т/га (Гамзиков и др., 2008).

Зона	Природные факторы*			Системы земледелия**		
	Инсоляция, тепло	Увлажнение	Плодородие	Экстенсивная	Ординарная	Интенсивная
Лесная	4.0-5.8	3.8-5.0	0.6-1.5	0.5-1.0	0.7-1.6	2.6-4.5
Лесостепь	5.0-7.2	1.7-4.0	1.2-2.4	0.8-1.5	1.0-1.8	2.2-4.0
Степь	6.0-8.6	0.8-2.2	1.0-1.6	0.4-1.0	0.8-1.6	1.5-2.2
Число хозяйств, работающих по системе, %				35-40	50-60	10-15

\* Возможные уровни продуктивности при оптимальном плодородии почвы в сочетании с оптимальным увлажнением и оптимальной инсоляцией.

\*\* Экстенсивная – без применения удобрений и средств защиты растений; ординарная – 10-20 кг/га NPK при посеве и выборочное применение средств защиты; интенсивная – выполнение технологии возделывания культуры в соответствии с научными рекомендациями при комплексной химизации.



**Рис. 1.** Группировка пахотных почв Сибири по обеспеченности гумусом и подвижными формами питательных элементов, % (Агрохимическая характеристика почв ..., 2005).

серых лесных почвах. Без применения удобрений и средств защиты растений на этих почвах максимальная урожайность зерна пшеницы не превышает 1.0 т/га, тогда как использование интенсивных агротехнологий позволяют получать до 2.6-4.5 т/га. В лесостепи на оподзоленных, выщелоченных, обыкновенных чернозёмах, тёмно-серых лесных и лугово-чернозёмных почвах формирование урожая ограничивается неустойчивостью увлажнения и уровнем обеспеченности нитратным азотом, а в отдельных провинциях – недостатком фосфатов. Усреднённая продуктивность яровой пшеницы при экстенсивной системе земледелия в лесостепи, как правило, не превышает 1.5 т/га зерна и лишь в благоприятные по гидротермическим условиям годы возрастает до 2.0 т/га. Однако интенсивные технологии возделывания пшеницы позволяют получать до 2.2-4.0 т/га. В степи на южных чернозёмах и каштановых почвах при их невысокой азотмобилизующей способности и значительном дефиците увлажнения уровень урожайности обычно не превышает 1.0 т/га, однако при выполнении всех агротехнических приемов его можно

увеличить до 1.5-2.2 т/га.

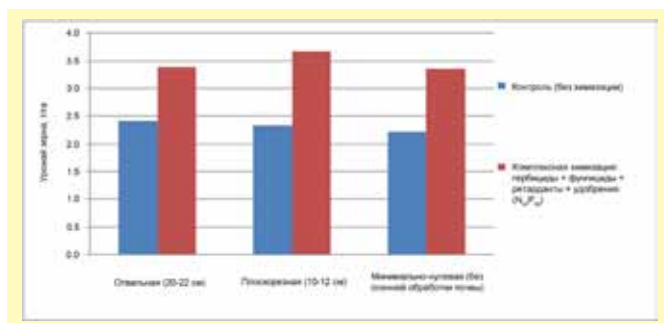
Применение органических и минеральных удобрений в сочетании с комплексом агротехнических приёмов и средств защиты растений позволяет максимально реализовать естественный ресурсный потенциал каждой почвенно-климатической зоны, а также исключить или, по крайней мере, максимально сгладить негативные природные и антропогенные факторы. В табл. 2 обобщены средние прибавки зерна яровой пшеницы от удобрений в Сибири. Их максимальные величины можно наблюдать на дерново-подзолистых и серых лесных почвах, где каждый килограмм питательных веществ, внесённых с минеральными удобрениями, позволяет получать дополнительно от 4 до 9 кг высококачественного зерна пшеницы.

Сочетание эффективных способов обработки почв с рекомендуемым внесением удобрений и средств защиты растений, как свидетельствуют данные Холмова и Юшкевича (2006), позволяет наиболее полно реализовать потенциал яровой пшеницы (рис. 2). Результаты исследований и практика их использования



**Таблица 2.** Среднеголетнее влияние минеральных удобрений на сбор зерна яровой пшеницы на почвах Сибири, т/га (Гамзиков и др., 2008).

Почва	Урожай без удобрений	Прибавка от удобрений (NPK)40-60 кг/га			
		N	P	NP	NPK
Дерново-подзолистая	1.06	0.46	0.32	0.57	0.79
Серая лесная	1.57	0.41	0.30	0.60	0.67
Чернозем	1.68	0.33	0.22	0.49	0.52
Каштановая	1.14	0.16	1.18	0.31	0.31

**Рис. 2.** Влияние систем обработки почвы на урожайность яровой пшеницы при посеве по пару в 5-польном севообороте (пар – пшеница – кукуруза – пшеница – ячмень) на чернозёме слабощелоченном среднегумусном тяжелосуглинистом в среднем за 1988-2000 гг. (Холмов, Юшкевич, 2006).

Примечание: средняя обеспеченность почвы подвижным фосфором (80-95 мг  $P_2O_5$ /кг) и очень высокая – подвижным калием (400-500 мг  $K_2O$ /кг) по Чирикову.

в производстве свидетельствуют о том, что ресурсосберегающие технологии обработки почвы в сочетании с применением средств химизации, включая минеральные удобрения, обеспечивают наибольший выход зерна с гектара пашни, увеличивают индекс стабильности производства зерна (на 51%), снижают себестоимость тонны продукции (на 17%), и, таким образом, повышают прибыль (на 25%).

За последние двадцать лет применение минеральных удобрений в сибирском земледелии сократилось более чем в 10 раз (табл. 3). Анализ баланса элементов минерального питания в земледелии, рассчитанного нами, свидетельствует о глубоком дефиците всех элементов питания (табл. 4). Суммарное возмещение их с удобрениями в последние годы не превышает 11% от выноса. Перспективный прогноз увеличения применения удобрений до минимальной потребности региона к 2015 г. позволяет надеяться на постепенное снижение дефицита питательных веществ и существенное повышение урожайности ведущей культуры сибирского земледелия.

В настоящее время, в связи с ограниченными возможностями использования в регионе средств химизации, включая минеральные удобрения, при-

**Таблица 3.** Среднегодовое применение минеральных удобрений (NPK) в земледелии Сибири, тыс. т.

Регион	1986-1990	2001-2005	2006-2009	2015-2020 (перспектива)
Западная Сибирь	832	53.7	70.9	260
Восточная Сибирь	470	45.3	46.9	135
Сибирь*	1302	99.0	117.8	395

\* Включая Тюменскую область и Республику Якутия (Саха).

ходит активно подключать агротехнические приёмы рационального использования плодородия почв. Наиболее распространена практика введения в севооборот парового поля – лучшего предшественника для пшеницы во всех природных зонах Сибири. Парование почвы в 3-, 4-польных севооборотах даёт возможность накапливать высокие запасы влаги (160-220 мм в слое 0-100 см), нитратного азота (100-120 кг/га в слое 0-40 см) и сокращать засорённость в 3-4 раза (до 30-35 шт./м<sup>2</sup> семян сорняков).

В специфических почвенно-климатических условиях региона – глубокое и длительное промерзание почв зимой, неравномерное распределение осадков в период вегетации растений и периодические засухи – возрастает роль сорта и его взаимодействие с технологией возделывания культуры. В 11-ти научно-исследовательских институтах и высших учебных заведениях Сибири активно ведётся селекция яровой пшеницы. За последние 30 лет (1977-2007 гг.) в Госреестр РФ включено 63 новых сорта мягкой и 9 – твёрдой пшеницы (Рутц, Кашеваров, 2008). Примечательно, что сорта сибирской селекции занимают в настоящее время 95% всех посевов яровой пшеницы в регионе. Прогресс селекции за этот период по урожайности мягкой пшеницы составил 50%, твёрдой – 35%, по параметрам качества зерна, соответственно, 14-25% и 9-20% (Gamzikov, 1997; Рутц, Кашеваров, 2008). Современные сорта яровой пшеницы обладают высоким потенциалом урожайности (3.5-7.0 т/га) и хорошим качеством зерна (масса 1000 зёрен – 40-50 г, натура – 780-820 г/л, белок – 15-18%, клейковина – 32-40%). Большинство сортов, допущенных в производ-

**Таблица 4.** Среднегодовой баланс питательных веществ в земледелии Сибири (2006-2009 гг.).

Элемент	Вынос	Поступление с удобрениями			Баланс	Интенсивность баланса, %
		Минеральное	Органическое	Всего		
N	30.7	2.5	1.2	3.7	-27.0	12
$P_2O_5$	10.1	0.9	0.6	1.5	-8.6	15
$K_2O$	24.4	0.3	1.7	2.0	-22.4	8
Сумма	65.2	3.7	3.5	7.2	-58.0	11

ство за последние 8 лет обладают комплексным иммунитетом к патогенам, устойчивы к бурой ржавчине, мучнистой росе и пыльной головне.

Сибирские ученые активно проводят исследования в области нового научного направления – генетики минерального питания яровой пшеницы, результаты которых позволили получить принципиально новую информацию о генетическом контроле над поглощением и использованием макро- и микроэлементов высшими растениями (Гамзикова, 2008). Идентифицированы конкретные геномы, хромосомы, гены и цитоплазмы, контролирующие поглощение и использование макро- и микроэлементов растениями пшеницы. На основе экспериментальных данных разработана концепция и методология создания агрохимически эффективных генотипов, которые лучше, чем современные сорта будут использовать элементы как почвенного плодородия, так и вносимых удобрений.

В современных условиях и на ближайшую перспективу яровая пшеница является и останется доминирующей сельскохозяйственной культурой сибирского земледелия. Получение стабильно высоких урожаев качественного зерна этой культуры будет зависеть от реализации товаропроизводителями технологий, рекомендованных аграрной наукой. Безусловно, последнее достижимо только при соответствующем развитии экспорта зерна из Сибири и выгодных закупочных ценах на него для сельхозпроизводителей.

*Гамзиков Г.П. – профессор кафедры почвоведения и агрохимии Новосибирского ГАУ, заведующий лабораторией современных проблем экспериментальной агрохимии, доктор биологических наук, Заслуженный деятель науки Российской Федерации, академик РАСХН; e-mail: gamolgen@rambler.ru.*

*Носов В.В. – Директор программы на Юге и Востоке России Международного института питания растений, кандидат биологических наук; e-mail: vnosov@ipri.net.*

## Литература

Федеральная Служба Государственной Статистики (РОССТАТ). 2010. <http://www.gks.ru>

Агрохимическая характеристика почв сельскохозяйственных угодий Российской Федерации. 2005. ВНИИА, Москва. 183 с.

Гамзиков Г.П. 1981. Азот в земледелии Западной Сибири. Наука, Москва. 268 с.

Gamzikov G.P. 1997. Wheat breeding strategies and cultivation technologies in Siberia. In: H.-J. Braun *et al.* (eds.) Wheat: Prospects for Global Improvement. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, pp. 55-59.

Гамзиков Г.П., Храпцов И.Ф., Каличкин В.К. 2008. Современные проблемы развития агрохимии Сибири. Материалы годичного общего собрания Сибирского отделения Россельхозакадемии. РАСХН, Сиб. отд-ние, Новосибирск. С. 58-78.

Гамзикова О.И. 2008. Этюды по физиологии, агрохимии и генетике минерального питания растений. Агрос, Новосибирск. 372 с.

Рутц Р.И., Кашеваров Н.И. 2008. Некоторые концептуальные подходы к вопросам совершенствования селекции и семеноводства в Сибири. Материалы годичного общего собрания Сибирского отделения Россельхозакадемии. РАСХН, Сиб. отд-ние, Новосибирск. С. 26-47.

Холмов В.Г., Юшкевич Л.В. 2006. Интенсификация и ресурсосбережение в земледелии лесостепи Западной Сибири. Изд-во ОмГАУ, Омск. 396 с.

# Состав стартовых удобрений и способы их внесения при возделывании кукурузы по ресурсосберегающим технологиям

У.Б. Гордон

Для оценки четырех способов внесения стартового удобрения (в рядки с семенами, 5x5, 5x0 и лентами шириной 20 см с рядками семян по центру) были проведены полевые опыты на Канзасской северо-центральной опытной станции. Дозы стартового (припосевного) удобрения по азоту составили 5.6, 16.8, 33.6, 50.4 и 67.2 кг N/га, а по фосфору и калию – 16.8 кг P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/га и 5.6 кг K<sub>2</sub>O/га. Был также и контрольный вариант без стартового удобрения. Стартовое удобрение, внесенное в рядки вместе с семенами, снижало густоту стояния растений и урожай зерна. Струйное внесение стартового удобрения узкими лентами по поверхности почвы (5x0) по эффективности было приблизительно равным способу внесения 5x5. Увеличение стартовой дозы азота вплоть до 33.6 кг/га стабильно повышало поглощение P растениями и урожай зерна. Была также проведена оценка применения дикарбоксильного сополимерного продукта в стартовом удобрении, которая показала положительное влияние данного препарата на эффективность P-удобрений и, соответственно, на урожай зерна кукурузы.

В центральной части Великих равнин растет число сельхозпроизводителей, применяющих ресурсосберегающие системы обработки почвы, поскольку данные системы имеют ряд преимуществ. Это и снижение эрозионных потерь почвы, и повыше-

ние эффективности использования почвенной влаги, а также улучшение качественных показателей почвы. Однако большое количество растительных остатков, которое остается на поверхности в системах с минимальной обработкой почвы, понижает температуру в

**Таблица 1.** Влияние состава и способа внесения стартового удобрения на густоту стояния растений в среднем за 3 года.

Стартовая доза N-P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -K <sub>2</sub> O, кг/га	В рядки с семенами	5x5	5x0	Лентами по заданному рядкам	----- Растений/га -----			
5.6 - 16.8 - 5.6	62 227	77 200	76 963	77 200				
16.8 - 16.8 - 5.6	57 141	75 874	78 160	77 906				
33.6 - 16.8 - 5.6	57 548	77 200	75 289	75 528				
50.4 - 16.8 - 5.6	52 664	76 484	75 042	75 289				
67.2 - 16.8 - 5.6	50 299	75 770	75 588	74 810				
В среднем	55 975	76 506	76 207	76 146				

**Таблица 2.** Влияние состава и способа внесения стартового удобрения на урожай зерна кукурузы в среднем за 3 года.

Стартовая доза N-P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -K <sub>2</sub> O, кг/га	В рядки с семенами	5x5	5x0	Лентами по заданному рядкам	----- т/га -----			
5.6 - 16.8 - 5.6	10.78	12.16	11.91	11.22				
16.8 - 16.8 - 5.6	11.10	12.35	12.41	11.29				
33.6 - 16.8 - 5.6	10.91	13.54	13.29	12.04				
50.4 - 16.8 - 5.6	10.72	13.48	13.36	12.23				
67.2 - 16.8 - 5.6	10.22	13.42	13.36	12.60				
В среднем	10.72	12.98	12.85	11.85				

зоне семян, что может замедлять рост корней и снижать поглощение элементов питания растениями.

Доказано, что применение стартового (припосевного) удобрения усиливает поглощение элементов питания растениями, причем даже на почвах, которые обеспечены доступными формами элементов питания растений выше низкого уровня. Многие сельхозпроизводители выигрывают, внося удобрения вместе с семенами (в одну борозду) или применяя поверхностное внесение стартового удобрения (в жидком виде), по причине низкой стоимости первоначальных затрат на навесное оборудование и проблем, возникающих с системами ножей и сошников при большом количестве растительных остатков. Было давно доказано, что размещение избыточного количества азотных и/или калийных удобрений в контакте с семенами может повредить проросткам. Однако поверхностное внесение стартового удобрения является альтернативным способом, который широко не исследовался и не сравнивался с внутрипочвенным внесением. Кроме того, на рынке недавно появился новый класс полимеров с длинной цепью и высокой емкостью катионного обмена, которые, судя по всему, способны усиливать действие P-удобрений. Данный продукт продается под брендом AVAIL<sup>®</sup>. Целью данного исследования являлось установление отзывчивости кукурузы на различные

комбинации жидких стартовых удобрений при использовании четырех способов их внесения, а также оценка эффективности применения препарата AVAIL<sup>®</sup> в составе стартового удобрения.

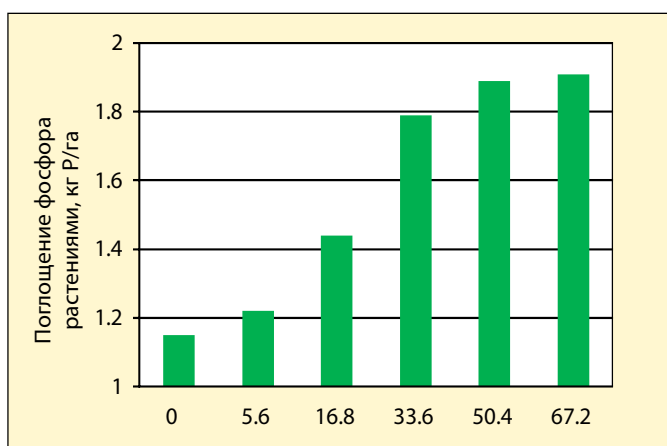
Опыты были проведены на Канзасской североцентральной опытной станции (North Central Kansas Experiment Field) с минимальной обработкой почвы в условиях орошения на пылевато-суглинистой почве серии Крит (Crete) {мелкокомковатый, смектитовый, умеренно-увлажненный Pachic Argiustoll}. Содержание доступного для растений P в почве было ближе к верхней границе средней обеспеченности, а содержание обменного K было высоким. Содержание гумуса в почве составило 2.5%, а pH<sub>H2O</sub> был равен 7.0.

Изучалось четыре способа внесения стартового удобрения: в рядки с семенами; на 5 см сбоку и на 5 см ниже семян при посеве (5x5); струйное внесение узкой лентой по поверхности почвы на 5 см сбоку ряда при посеве (5x0) и внесение лентой шириной 20 см по поверхности почвы с рядом семян по центру ленты. Стартовое удобрение было приготовлено таким образом, чтобы стартовые дозы азота составили 5.6, 16.8, 33.6, 50.4 и 67.2 кг N/га, а фосфора и калия – 16.8 кг P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/га и 5.6 кг K<sub>2</sub>O/га. На всех вариантах, независимо от стартовой дозы азота, было внесено 246 кг N/га, и выравнивание до данной полной дозы азота проводилось за счет внесения раствора КАС (28% N). Стартовое удобрение было приготовлено на основе ЖКУ марки 10-34-0, раствора КАС (28% N) и KCl (хлористого калия). Дополнительно проводилось изучение эффективности применения стартового удобрения с добавлением препарата AVAIL<sup>®</sup>.

При внесении стартового удобрения в дозах по азоту и калию 5.6 кг N/га и 5.6 кг K<sub>2</sub>O/га в рядки с семенами густота стояния растений снизилась более чем на 14 900 растений/га (табл. 1). С увеличением дозы азота густота стояния растений снижалась еще больше. Средняя по всем стартовым дозам урожайность кукурузы при внесении стартового удобрения в рядки с семенами была на 2.26 т/га ниже по сравнению со способом внесения 5x5 (табл. 2).

Между струйным внесением стартового удобрения способом 5x0 и традиционным ленточным внесением способом 5x5 не было статистически значимых различий. Поверхностное ленточное внесение легче выполнимо и дешевле по сравнению с

<sup>1</sup> Упоминание данного продукта не означает его продвижения Университетом штата Канзас или настоящей публикацией.



**Рис. 1.** Влияние стартовых доз N на поглощение P растениями в фазу 6-ти листьев (на фоне P и K, внесенных в дозах 16.8 кг P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/га и 5.6 кг K<sub>2</sub>O/га) в среднем за 3 года.

ленточным внесением способом 5x5. При внесении удобрений лентой шириной 20 см по заделанному ряду семян урожай зерна был выше, чем при внесении в рядки с семенами, но ниже, чем при способах внесения 5x5 или 5x0. При широкой ленте внесение удобрений было слишком рассеянным и не позволяло полностью использовать все преимущества стартового применения удобрений. Вне зависимости от того, каким из двух способов вносилось стартовое удобрение – 5x5 или 5x0, урожай зерна повышался с увеличением стартовой дозы азота вплоть до 33.6 кг N/га. Содержание Р в растениях также повышалось с увеличением дозы азота вплоть до 33.6 кг N/га (рис. 1).

Результаты настоящего исследования показали, что добавление препарата AVAIL® повышает эффективность применения Р-удобрений. В данной работе контрольный вариант без стартового удобрения сравнивался с вариантами, в которых жидкое стартовое удобрение, содержащее N и Р, вносилось без препарата AVAIL® и с данным препаратом. Применение стартового удобрения повышало урожай зерна кукурузы на 1.19 т/га по сравнению с контролем (рис. 2). Добавление полимера AVAIL® в стартовое удобрение повысило урожай зерна еще на 0.56 т/га. Содержание Р в листьях, в пазухах которых развиваются початки, было выше на делянках, получавших стартовое удобрение с полимером, по сравнению с контрольными делянками или делянками, получавшими стартовое удобрение без полимера. Это свидетельствует о том,

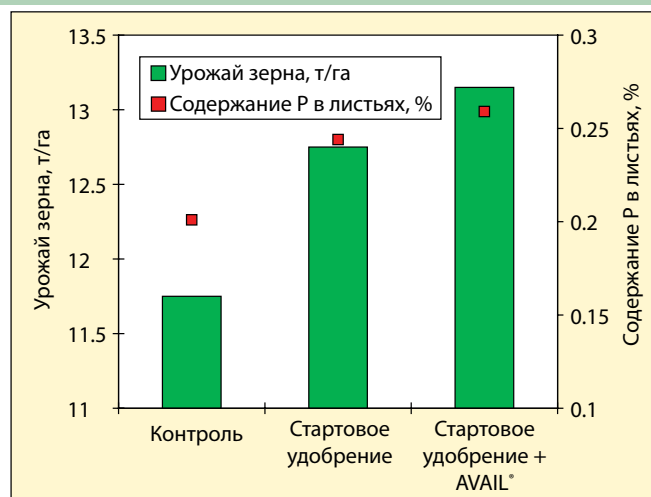


Рис. 1. Влияние применения стартового удобрения совместно с AVAIL® на урожай зерна кукурузы и содержание Р в листьях, в пазухах которых развиваются початки, в среднем за 3 года.

что применение препарата AVAIL® способствует увеличению поглощения Р растениями и, в конечном итоге, получению более высокого урожая зерна.

*Д-р Гордон – исследователь кафедры агрономии Университета штата Канзас, г. Коуртленд, штат Канзас (США); e-mail: bgordon@ksu.edu.*

*Перевод с английского и адаптация: В.В. Носов. Редакция: С.Е. Иванова*

## 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 «Старым 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 рассматриваются четыре из 12-ти вариантов, изначально заложенных в 1967 г.: внесение азотно-фосфорных и одних фосфорных удобрений под бессменную пшеницу («монокультура-NP»,

«монокультура-Р») и в севообороте пар – пшеница – пшеница («севооборот-NP», «севооборот-Р»). В вариантах с внесением фосфорных удобрений в почву ежегодно поступает 9-10 кг Р/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

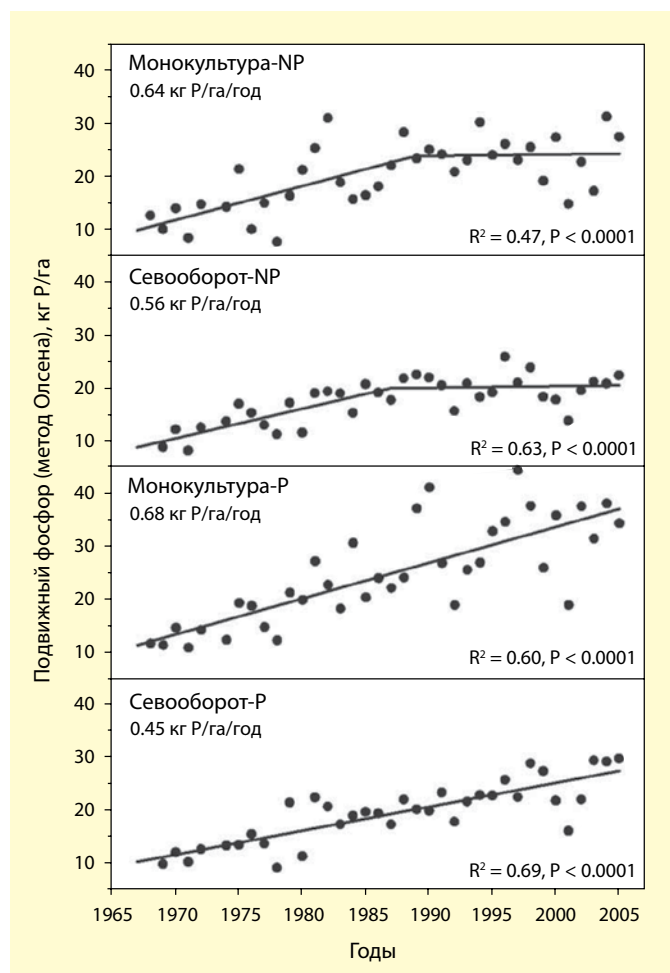
первых 12-ти лет между рассматриваемыми вариантами не было различий. Они появились во время 2-го периода – содержание подвижного фосфора в почве достоверно повысилось под бессменной пшеницей по сравнению с севооборотом, поскольку в первом случае фосфорные удобрения применялись чаще. В 3-ем периоде содержание 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 почве в течение предыдущих 27-ми лет (1967-1993 гг.), оставался в легкодоступных для растений формах. Это подтверждает вывод, согласно которому невне-



**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  $\leq 22$  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  $\leq 20$  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  $P < 0.05$ .

сение 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 вносятся 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 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<sub>N</sub>) рассчитывалась ежегодно. Анализ, проведенный по 5-летним периодам, показывает, что ЭОД<sub>N</sub> не меняется с начала 1990-х гг., оставаясь равной 112 кг N/га (рис. 4). Однако, с конца 1990-х гг. ширина диапазона ЭОД<sub>N</sub> 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 избыточ-

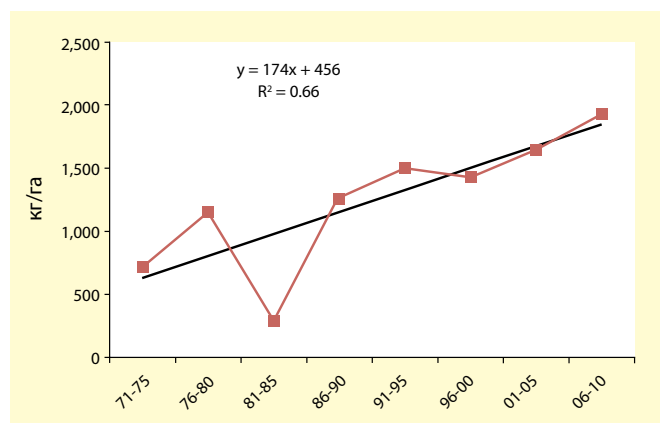


Рис. 2. Прибавка урожайности от внесения азота по 5-летним периодам в многолетнем опыте (США). Расчет прибавки: урожайность в варианте с внесением азота в дозе 112 кг N/га минус урожайность в варианте N0.

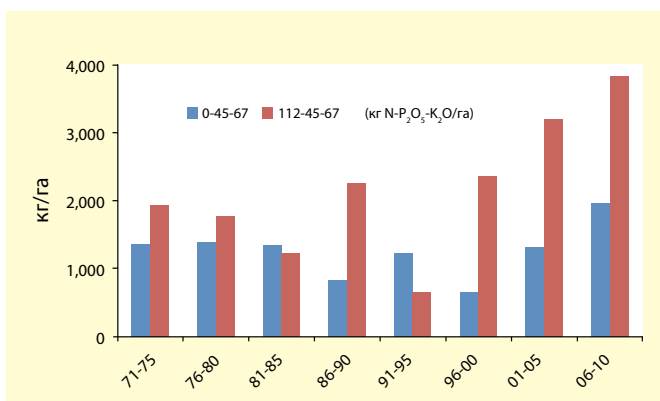


Рис. 3. Разница между максимальной и минимальной урожайностью для 5-летних периодов многолетнего опыта (США).

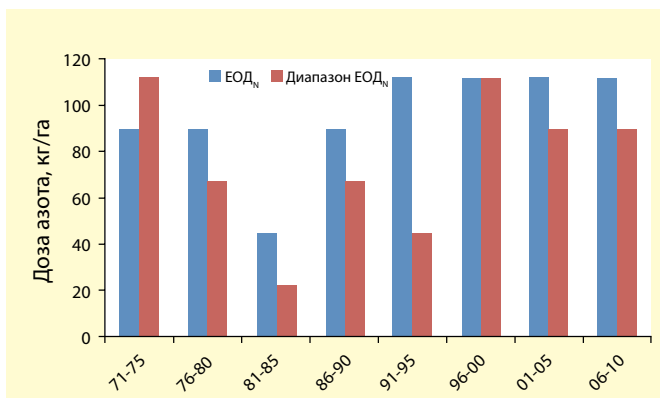


Рис. 4. Экономически оптимальная доза азота (ЭОД<sub>N</sub>) и ширина диапазона ЭОД<sub>N</sub> для 5-летних периодов многолетнего опыта (США).

ному внесению 1672 кг N/га за период 1976-2011 гг. Расчет доз азота, исходя из ЭОД<sub>N</sub> 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 соответствии 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

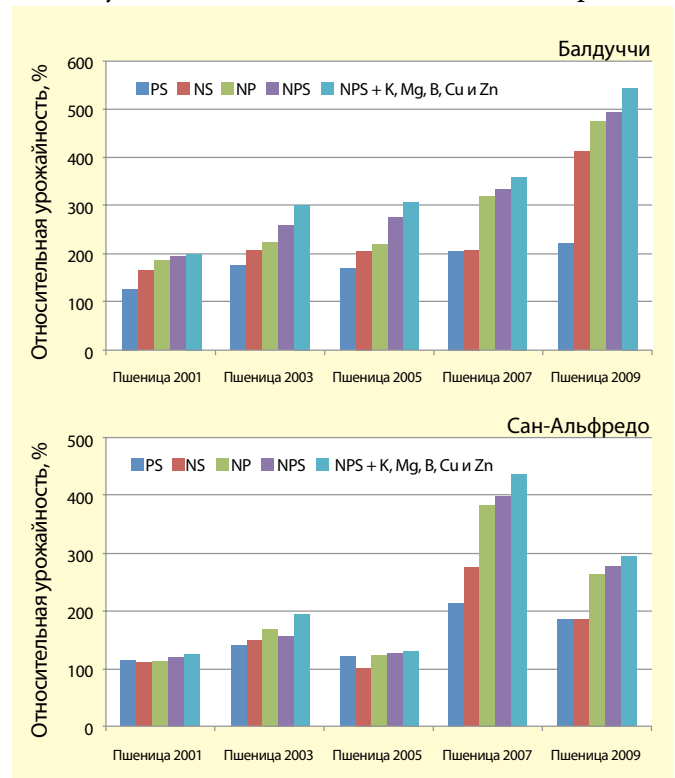


Рис. 5. Относительная урожайность зерна пшеницы в вариантах с внесением удобрений при возделывании в севообороте кукуруза – пшеница/соя: опыты в Балдуччи и Сан-Альфредо (Аргентина). Урожайность в контроле принята за 100%.

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 при-

менению 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. AACSA.

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

# Система применения удобрений под пшеницу в условиях изменчивого климата

Р. Нортон

Внедрение технологий, позволяющих минимизировать риски, способствует рентабельному применению азотных и фосфорных удобрений и обеспечению потребностей сельскохозяйственных культур в азоте и фосфоре в условиях изменчивого климата, например, при возделывании пшеницы в «зерновом поясе» Юго-Восточной Австралии. Потребность растений в азоте и фосфоре можно изначально оценить, исходя из потенциальной урожайности, но, как показывают исследования, у азотных подкормок в период вегетации нет отрицательных моментов. Пока еще не разработано технологий подкормок фосфорными удобрениями, но подобные исследования ведутся, и уже есть определенность относительно направлений дальнейшей работы.

Поэт 19-го века Доротея Маккеллар описывала Австралию, как страну «засух и затопляющих дождей». Данное описание справедливо и в наши дни. Юго-восточный «зерновой пояс» Австралии пережил обширную засуху в конце 1990-х гг.

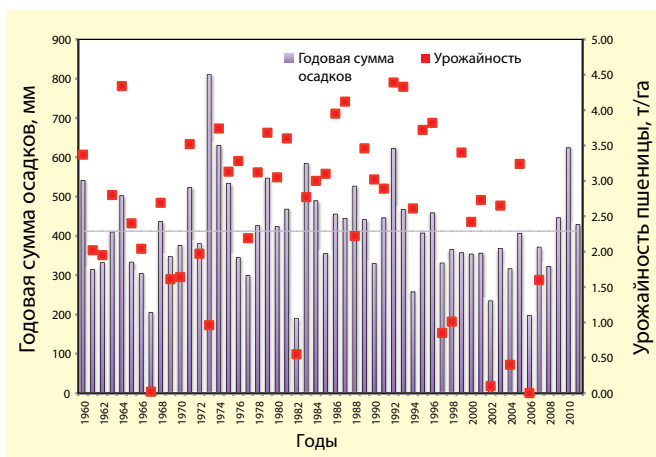
и наводнения в 2010 и 2011 гг. На рис. 1 представлена годовая сумма осадков для района Хоршам – «зернового пояса» штата Виктория. Данный показатель сильно варьирует по годам под влиянием Тихого, Южного и Индийского океанов.



Неустойчивое выпадение осадков приводит к сильному варьированию урожайности – в ряде регионов страны при сильных колебаниях запасов продуктивной почвенной влаги при посеве и количества осадков за период вегетации коэффициент варьирования урожайности достигает 61% (Hochman et al. 2009). На **рис. 1** также показано, как урожайность пшеницы на полях фермера в районе Хоршам зависит от количества выпадающих осадков. Колебания урожайности в данном случае связаны с сильными изменениями суммы осадков по годам. Как простые, так и более сложные модели, разработанные с учетом количества осадков, позволяют сельхозпроизводителям оценить потенциальную урожайность к моменту посева или незадолго до него, а, следовательно, и потребность растений в элементах питания. Избыточное применение азотных и фосфорных удобрений – это неоправданный расход средств и ресурсов, а внесение слишком высоких доз азота, особенно в засушливые сезоны, может привести к уменьшению размера зерна и сильному снижению закупочных цен на продукцию. При недовнесении удобрений потенциальная урожайность не достигается.

### Определение оптимальных доз азота и фосфора

Для расчета доз удобрений необходимо спрогнозировать достижимую (планируемую) урожайность – потенциальную урожайность, лимитированную условиями увлажнения. Ее можно определить, исходя из того, что формирование урожая зерна на единицу израсходованной растением воды составляет 20 кг/га/мм (French and Schultz, 1983). Количество воды, израсходованное растением за вегетационный период, устанавливается с учетом измеренных или рассчитанных запасов продуктивной почвенной влаги и ожидаемого количества осадков. Спрогнози-



**Рис. 1.** Годовая сумма осадков и урожайность зерна пшеницы на полях фермера в районе Хоршам – «зерновом поле» штата Виктория (Австралия).

ровав урожайность пшеницы (**блок 1**), можно затем установить и потребность растений в элементах питания.

Исходя из рассмотренного в **блоке 1** примера, для получения указанной запланированной урожайности пшеницы, согласно расчетам, необходимо внести 116 кг N/га. При подобных расчетах предполагается ряд допущений, например, что глубина проникновения корней ничем не ограничена, коэффициент использования азота из почвы и удобрений составляет 50%, а скорость минерализация почвенного азота соответствует модели, представленной в **блоке 2**. Еще более важно предположение о количестве осадков за вегетационный период (250 мм в приведенном примере), а также о равномерном распределении осадков в течение вегетации, что, как предполагается, позволит достичь запланированной урожайности.

Аналогичный подход можно использовать и для определения потребности растений в фосфоре. При этом также определяются потенциальная урожай-

#### Блок 1: Определение потенциальной урожайности

Запасы продуктивной влаги (в метровом слое почвы) – 100 мм

Ожидаемое количество осадков за вегетационный период – 250 мм

Суммарное количество влаги = 350 мм

Формирование урожая зерна на единицу израсходованной растением воды (Уеив) – 20 кг/га/мм

Непроизводительный расход почвенной влаги – 110 мм

Потенциальная урожайность = Уеив × (суммарное количество влаги – непроизводительный расход влаги) = 20 × (350 – 110) = 4800 кг/га (**4.8 т/га**)

#### Блок 2: Определение потребности в азотных удобрениях

Потенциальная урожайность = 4.8 т/га

Потребность в азоте = 45 кг N/т зерна = 216 кг N/га

Запасы минерального азота в почве при посеве = 50 кг N/га (измерено)

Содержание органического углерода в почве (Сорг.) = 1.2%

Минерализация почвенного азота за вегетационный период = Сорг. × (количество осадков за вегетационный период)/6 = 1.2 × (250)/6 = 50 кг N/га

Поступление азота из почвы = запасы минерального азота при посеве + минерализация за вегетацию = 50 кг N/га + 50 кг N/га = 100 кг N/га

**Потребность в азотных удобрениях для достижения потенциальной урожайности = (216 – 100) = 116 кг N/га**

ность, лимитированная условиями увлажнения, и, соответственно, ожидаемый вынос фосфора из почвы с урожаем. Содержание фосфора в зерне обычно составляет порядка 3 кг P/т зерна, и при планируемой урожайности в 4.8 т/га вынос фосфора с урожаем зерна равен примерно 15 кг P/га. Дозу фосфорных удобрений необходимо скорректировать с учетом потенциальной буферной способности почвы в отношении фосфора, затрат удобрений на повышение содержания подвижного фосфора в почве (если это необходимо), а также потерь фосфора из почвы в результате эрозии. Сельхозпроизводители могут определить содержание фосфора в получаемом зерне и скорректировать, таким образом, вынос фосфора с урожаем для конкретных условий, поскольку содержание фосфора в зерне варьирует в диапазоне от 2.0 до 4.0 кг P/т (Jensen and Norton, 2012).

### Минимизация рисков при определении оптимальной дозы азота

При отсутствии надежного прогноза погоды для предстоящего сезона, то есть в условиях неопределенности относительно количества осадков за вегетацию, при посеве вносится полная доза азота. В полевых исследованиях, проведенных в «зерновом поясе» штата Виктория, Нортон с соавт. (Norton et al., 2009) изучали разные сроки и способы применения азотных удобрений – основное внесение и подкормки при завершении фазы кущения и позже (табл. 1). Внесение всей дозы азота в подкормку при завершении кущения способствовало достоверному росту урожайности в трех опытах и не приводило к снижению урожайности в остальных опытах относительно варианта с внесением полной дозы азота при посеве. Вариант внесения азота 50:50 (50% при посеве и 50% в подкормку) был предпочтительнее в трех опытах, и снижения урожайности в данном варианте в остальных случаях не отмечено.

Согласно полученным результатам, перенесение части азота или всей дозы азота в подкормку не приводило к достоверному снижению урожайности

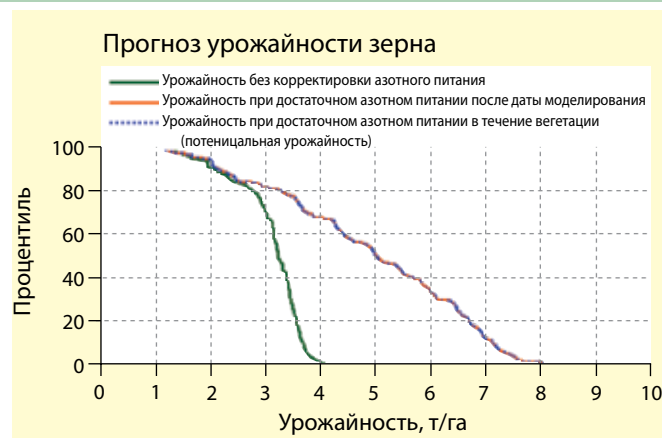


Рис. 2. Прогноз урожайности зерна для конкретного участка посевов в регионе Виммера (штат Виктория, Австралия), выполненный с учетом погодных условий сезона (до даты моделирования – 22-го июня), запасов нитратного азота в почве и агротехники возделывания пшеницы.

пшеницы, включая опыты, где была получена сравнительно высокая урожайность. Следует принять во внимание, что как раз в этих опытах запасы минерального азота в почве при посеве составили как минимум 40 кг N/га. Предположительно, поступление азота из почвы могло быть достаточным для обеспечения потребности пшеницы в данном элементе питания вплоть до фазы кущения, исключая тем самым появление существенного недостатка азота у растений.

Потенциальная урожайность пшеницы корректируется в сторону уменьшения, если в конце зимы или весной выпадает недостаточное количество осадков. Соответствующее уменьшение дозы азота позволяет избежать снижения урожайности в результате чрезмерного кущения и образования большой вегетативной массы в ущерб формированию зерна, а также предотвратить убытки, связанные с низкой эффективностью использования азота из удобрений. Сельхозпроизводители стараются внести примерно 20-30% азота при посеве, а затем в зависимости от погодных условий они принимают решение относительно необходимости азотных

Таблица 1. Влияние сроков и способов внесения азотного удобрения (карбамида) на урожайность зерна пшеницы (т/га): 8 опытолет в «зерновом поясе» штата Виктория (Австралия).

Варианты внесения азота	2005	2006	2007	2005	2007	2005	2006	2007
	Си Лейк	Хоуптаун	Валпеап	Марноо	Калкии	Инверлейг	Инверлейг	Инверлейг
Глубокое ленточное при посеве (100%)	4.35	0.95	1.44	3.95	2.35	3.48	2.20	5.20
Глубокое ленточное при посеве (50%) + подкормка в стадию 31 по Цадоксу (50%)	4.11	0.98	1.40	3.98	2.83	3.40	2.54	5.69
Глубокое ленточное при посеве (33%) + подкормка в стадию 31 по Цадоксу (33%) + подкормка в стадию 41 по Цадоксу (33%)	4.29	-	1.39	4.17	2.77	3.91	-	5.59
Подкормка в стадию 31 по Цадоксу (100%)	4.44	0.93	1.61	4.27	2.72	3.43	2.25	5.24
НСР (p=0.05)	0.27	0.22	0.23	0.30	0.28	0.54	0.23	0.40

подкормок.

Большинство производителей пшеницы используют различные модели для определения потенциальной урожайности и, соответственно, потребности в азоте для ее достижения. Интегрирование эмпирических методов, рассмотренных в **блоках 1 и 2**, с такими сложно устроенными моделями продукционного процесса растений, как, например, модель Yield Prophet® (<http://www.yieldprophet.com.au/yp/wfLogin.aspx>), позволяет в режиме реального времени спрогнозировать потенциальную урожайность, а также отзывчивость растений на внесение азота (Hunt et al. 2010).

На **рис. 2** частично воспроизведен скриншот с веб-сайта модели Yield Prophet®, показывающий прогноз урожайности зерна для конкретного участка посевов в регионе Виммера (штат Виктория). Прогноз основан на урожайности и количестве осадков за 100 лет наблюдений для периода от даты моделирования до созревания. Как видно из графика, без подкормок азотом медианное значение урожайности (50-й перцентиль) составляет примерно 3.3 т/га, и при данных условиях урожайность не превышает 4 т/га. Представленный прогноз для конкретного участка посевов выполнен с учетом текущих запасов азота в почве (101 кг N/га).

Вторая кривая на графике показывает урожайность при проведении азотных подкормок, смоделированную с учетом более чем 100 лет наблюдений. Согласно прогнозу, при достаточном азотном питании медианное значение урожайности с учетом соответствующего количества влаги составляет 5 т/га, а прибавка урожайности от азотной подкормки варьирует от 0 до 4 т/га. Данный прогноз позволяет сельхозпроизводителям оценить величину прибавки урожайности от подкормок азотом, а также ее возможный диапазон в условиях изменчивого климата.

### **Минимизация рисков при определении оптимальной дозы фосфора**

Фосфорные удобрения обычно вносятся в рядки при посеве, поскольку уже в течение достаточно длительного времени данный способ их применения считается наиболее эффективным. Дозы фосфора обычно устанавливаются, исходя из среднего выноса данного элемента питания с урожаем, однако в неблагоприятные годы это приводит к избыточному внесению фосфорных удобрений, а в благоприятные – их недовнесению. Подкормки вразброс не обеспечивают размещения фосфора удобрений рядом с корнями растений, поскольку фосфор относительно малоподвижен в почве и не поступает в зону корней. По аналогии с подкормками азотом подкормки фосфором могут стать общепринятыми при условии, что потребность растений в фосфоре в начале вегетации будет удовлетворяться за счет припосевного внесения стандартных форм фосфорных удобрений, а для внесения враз-

брос будут разработаны новые формы удобрений, не причиняющие вреда растениям при применении в рекомендованных дозах (Noack et al. 2010). Исследования относительно оптимальных форм, доз, сроков и способов внесения фосфорных удобрений в подкормку при выращивании пшеницы в настоящее время находятся в стадии разработки (Noack et al. 2010).

### **Выводы**

В условиях изменчивого климата удовлетворение потребности растений в элементах питания за счет применения удобрений зависит от того, насколько хорошо проведена оценка потенциальной урожайности. При неустойчивой урожайности дозы азота рассчитываются таким образом, чтобы количество вносимого азота было достаточным для предотвращения недостатка данного элемента питания в начале вегетации и исключало его избыток, который может отрицательно сказываться на урожайности. Как только появляется больше ясности относительно погодных условий сезона, в соответствии с повышающейся или понижающейся потенциальной урожайностью и аналогично изменяющейся потребностью растений в азоте, можно принимать решение о необходимости азотной подкормки. Данный подход считается перспективным и в отношении подкормок фосфором – в настоящее время ведутся исследования по изучению наиболее подходящих форм удобрений, включая их дальнейшее производство, чтобы данная технология стала применяться на практике.

*Д-р Нортон – Директор Международного института питания растений по Австралии и Новой Зеландии; e-mail: rnorton@ipni.net.*

### **Литература**

- Hunt J.R., H. van Rees, Z. Hochman, et al. 2006. In N.C. Turner, T. Acuna, R.C. Johnson (Eds.). *Ground-breaking stuff. Proceedings of the 13th Australian Agronomy Conference*. 10-14 Sept. 2006, Perth, W. Aust. (Australian Society of Agronomy). [http://www.regional.org.au/au/asa/2006/concurrent/adoption/4645\\_huntj.htm](http://www.regional.org.au/au/asa/2006/concurrent/adoption/4645_huntj.htm).
- French R.J. and J.E. Schultz. 1984. *Australian Journal of Agricultural Research* 35, 743-764.
- Hochman Z., D. Holzworth, and J.R. Hunt. 2009. *Crop and Pasture Science*, 60, 708-716.
- Jensen, T. and R.M. Norton. 2012. *Wheat Grain Nutrient Concentrations: Widescale Average Values May Not Be Adequate for Field Nutrient Budgets. Better Crops with Plant Food*. Vol. 96:3, 24-25.
- Norton R.M., R. Christie, P. Howie, and C. Walker. 2009. *GRDC Project Report*. <http://anz.ipni.net/articles/ANZ0056-EN>
- Noack, S., T.M. McBeath, and M.J. McLaughlin. 2010. *Crop Past. Sci.* 61:659-669.

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

# Динамика поглощения элементов питания современными гибридами кукурузы

Р.Р. Бендер, Дж.В. Хаегеле, М.Л. Руффо и Ф.Е. Белоу

Достижения в области биотехнологии, селекции и агрономии способствовали росту урожайности кукурузы. Тем не менее, проведено сравнительно мало исследований по разработке систем применения удобрений, способствующих максимальному использованию потенциала урожайности современных гибридов кукурузы. Практика применения удобрений, основанная на разработках десятилетней давности, может не отвечать потребностям современных гибридов кукурузы в элементах питания. Современные гибриды защищены от насекомых-вредителей с помощью методов генной инженерии и возделываются при более высокой густоте стояния, чем раньше. Переоценка динамики потребления и распределения элементов питания по органам растений может стать основой для совершенствования текущей практики применения удобрений под кукурузу с целью максимального использования потенциала урожайности.

Согласно обобщению, проведенному Бруулсемой с соавт. (Bruulsema et al., 2012), оптимизация системы применения удобрений включает оптимизацию форм, доз, сроков и способов внесения удобрений. На этом основана концепция «4-х правил» применения удобрений (4R). Фундаментальные исследования по изучению динамики потребления основных макроэлементов и их распределения по органам растений (Sayre, 1948; Hanway, 1962; Karlen et al., 1988) характеризуют созданные в прошлом гибриды кукурузы и используемые в то время агротехнологии. Возможно, результаты этих исследований нельзя переносить на современные гибриды кукурузы с учетом созданных высокопродуктивных агроценозов. Цель работы состояла в том, чтобы изучить поглощение и усвоение элементов питания современными высокоурожайными трансгенными гибридами кукурузы, устойчивыми к насекомым-вредителям.

Содержание N, P, K, S, Zn и B в растениях определялось в следующие фазы развития кукурузы: 6, 10 и 14 листьев; водянистая спелость; восковая спелость; физиологическая спелость (Hanway, 1963). Полевые опыты были проведены в Агрономическом научно-исследовательском центре Северного Иллинойса (г. Де-Калб) и в Научно-исследовательском и образовательном центре по растениеводству (г. Урбана) в штате Иллинойс (США). Изучалось 6 гибридов кукурузы с продолжительностью вегетационного периода 111-114



Полностью выполненные початки кукурузы свидетельствуют о том, что потребность растений в элементах питания удовлетворялась за счет их поступления из почвы.

дней. Данные гибриды обладают генетической устойчивостью к повреждению западным кукурузным жуком (*Diabrotica virgifera virgifera*), кукурузным мотыльком (*Ostrinia nubilalis*) и другими вредителями из отряда Lepidoptera. Норма высева определялась исходя из густоты стояния растений 84 тыс./га. Для учета и анализа отбирались репрезентативные растения. Анализируются следующие части растений: 1) стебель и листовые влагалища; 2) листовые пластинки; 3) метелка, стержни початков и обертки початков; 4) зерно. Агротехнология возделывания кукурузы включала применение

**Таблица 1.** Поглощение и вынос макро- и микроэлементов растениями кукурузы в полевых опытах, проведенных в Урбане и Де-Калбе, штат Иллинойс (2010 г.).

Элемент питания	Поглощение надземной биомассой	Вынос с урожаем зерна	Относительный вынос с урожаем зерна, %	Вынос с 1 т зерна, кг
	----- кг/га -----			
N	286.7	165.8	58	11.4
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	113.1	89.6	79	6.3
K <sub>2</sub> O	201.6	66.1	33	4.6
S	25.8	14.6	57	1.1
Zn	0.50	0.31	62	0.02
B	0.08	0.02	23	0.001

Приведены средние значения для 6-ти гибридов, возделываемых в двух полевых опытах (средняя урожайность – 14.42 т/га). Относительный вынос элемента питания с урожаем зерна – процентное соотношение между выносом с урожаем зерна и поглощением надземной биомассой растений.  
 Вынос элемента питания с урожаем зерна, кг/га = Урожайность зерна, т/га × Вынос элемента питания с 1 т зерна, кг.

почвенного инсектицида при посеве, а также внесение взброс 168 кг  $P_2O_5$ /га в форме MicroEssentials® SZ<sup>1</sup> и 202 кг N/га в форме карбамида. В фазу 6-ти листьев была проведена междурядная подкормка азотом в дозе 67 кг N/га в форме Super-U (карбамид с ингибитором уреазы и ингибитором нитрификации). В период выметывания метелки – выбрасывания нитей початка провели обработку фунгицидом.

### Потребление и вынос элементов питания растениями

В проведенных в 2010 г. двух полевых опытах урожайность изученных трансгенных гибридов кукурузы, устойчивых к западному кукурузному жуку, составила в среднем 14.42 т/га (при диапазоне урожайности зерна 11.91-15.99 т/га). Мы будем исходить из указанного среднего уровня урожайности при дальнейшем обсуждении потребности растений в элементах питания.

При разработке рекомендаций по применению удобрений в высокопродуктивных агроценозах кукурузы важно учитывать следующие два важных показателя минерального питания растений: 1) количество элемента питания, которое поглощается надземной биомассой растений в течение вегетационного периода – поглощение надземной биомассой; 2) количество элемента питания, которое накапливается в зерне – вынос с урожаем зерна (табл. 1). Данные по выносу элементов питания с урожаем зерна (кг/т), полученные в нашем исследовании (табл. 1), сопоставимы с величинами, которые были использованы в недавней работе по определению возмещения выноса элементов питания из почвы за счет внесения удобрений (Bruulsema et al., 2012). В сравнении с системами земледелия, которые использовались в 1960-х годах (Hanway, 1962), то есть за последние 50 лет, практически удвоилось количество N, P и K, поглощаемое надземной биомассой растений, а также отчуждаемое с урожаем зерна.

Для каждого элемента питания был рассчитан относительный вынос с урожаем зерна – процентное соотношение между выносом с урожаем зерна и поглощением надземной биомассой растений. Элементы питания, потребляемые растениями в наибольших количествах (N, P и K), а также элементы, для которых характерны высокие значения относительного выноса с урожаем зерна (P, Zn, S и N), – это ключевые элементы питания растений, от которых зависит получение высокой урожайности (табл. 1). Почти 80% поглощенного растениями фосфора отчуждается с урожаем зерна. В то же время калий и бор в основном остаются в соломе. Если солома (листья, стебли, метелки, стержни и обертки початков) оставляется в поле, происходит частичный возврат элементов питания в почву. В системах возделывания кукурузы, где надземная биомасса частично или полностью удаляется с поля (получение этанола из целлюлозы, выращивание кукурузы на силос), дополнительно отчуждается 10.4 кг N, 2.0 кг  $P_2O_5$ , 11.7 кг  $K_2O$ , 1.0 кг S, 16 г Zn и 6 г B с 1 т абсолютно сухого вещества.

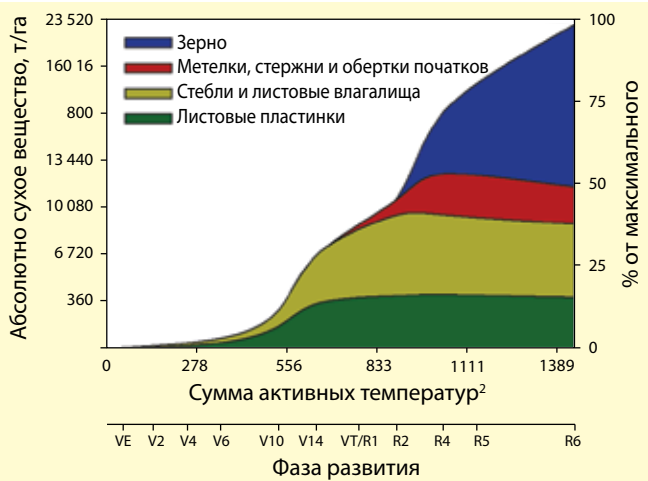
### Максимальная скорость поглощения элементов питания растениями

Дальнейшее совершенствование технологий управления почвенным плодородием должно быть направлено на то, чтобы доступность элементов питания в почве соответствовала динамике их потребления растениями в течение вегетационного периода. Это подразумевает оптимизацию форм, доз и сроков внесения удобрений. Для всех элементов питания максимальная скорость поглощения растениями наблюдалась при наиболее интенсивном накоплении сухого вещества в период вегетативного роста (рис. 1-7). К фазам 10-14-ти листьев растениями было поглощено более 1/3 бора, в то время как относительное потребление других элементов питания находилось в диапазоне 20-30%. Между фазами 10-ти и 14-ти листьев суточное поглощение элементов питания кукурузой с 1 га составило: 8.7 кг N, 2.4 кг  $P_2O_5$ , 6.0 кг  $K_2O$ , 0.63 кг S, 15 г Zn и 4 г B. Поэтому для оптимизации питания растений и получения высокой урожайности наиболее предпочтительны такие формы удобрений, которые могут обеспечить поступление элементов питания с нужной скоростью в определенный период времени в соответствии с потребностью растений.

### Периоды максимального потребления элементов питания растениями

Стрессовой ситуации, связанной с недостатком элементов питания у растений, можно избежать лишь в том случае, когда потребность растений в элементах питания удовлетворяется за счет их поступления из почвы. Это особенно важно в условиях высокопродуктивных агроценозов. При разработке механизмов повышения доступности и оптимизации поступления элементов питания в растения, прослеживается много общего в поведении в экосистемах таких элементов питания, как азот и сера. Однако периоды максимального потребления азота и серы растениями, как оказалось, не совпадают (рис. 2 и 5). Это позволяет предположить, что для оптимизации питания растений азотом и серой должны использоваться разные подходы. Кривая поглощения азота, в отличие от кривой поглощения серы, имеет S-образный вид. К фазам выметывания метелки – выбрасывания нитей початка растения потребляют 2/3 азота. В отличие от азота, значительное накопление серы растениями происходит в фазы налива зерна. Более 50% серы поступает в растения после периода выметывания метелки – выбрасывания нитей початка (рис. 5). Аналогично поглощению азота, к фазам выметывания метелки – выбрасывания нитей початка растения потребляют 2/3 калия (рис. 4). Интересно отметить, что более 50% фосфора поступает в растения после периода выметывания метелки – выбрасывания нитей початка (рис. 3). Полученные кривые позволяют предположить, что поступление фосфора и серы в растения в течение всего периода вегетации имеет критическое значение для питания кукурузы. В то же время основная часть калия и азота потребляется растениями в период вегетативного роста.

<sup>1</sup> Удобрение состава 12-40-0-10S-1Zn (здесь и далее – примечания переводчика).



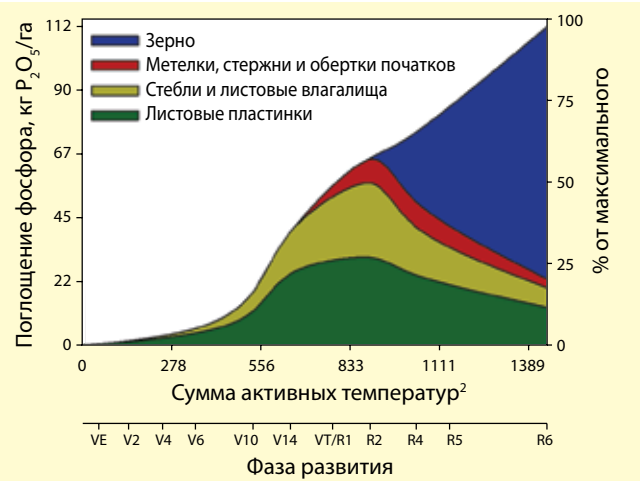
**Рис. 1.** Динамика накопления сухого вещества растениями кукурузы. Средние значения для 6-ти гибридов, возделываемых в двух полевых опытах в 2010 г. (Урбана и Де-Калб, штат Иллинойс).

Фазы развития кукурузы: VE – появление всходов; V1, V2 ... Vn – 1-ый, 2-ой ... n-ый лист (листовой язычок виден у 1-го, 2-го ... n-го листа); VT – выметывание метелки; R1 – выбрасывание нитей початка; R2 – водянистая спелость; R3 – молочная спелость; R4 – восковая спелость; R5 – появление углубления на верхушке зерновки; R6 – физиологическая спелость (появление «черной точки» на основании зерновки).

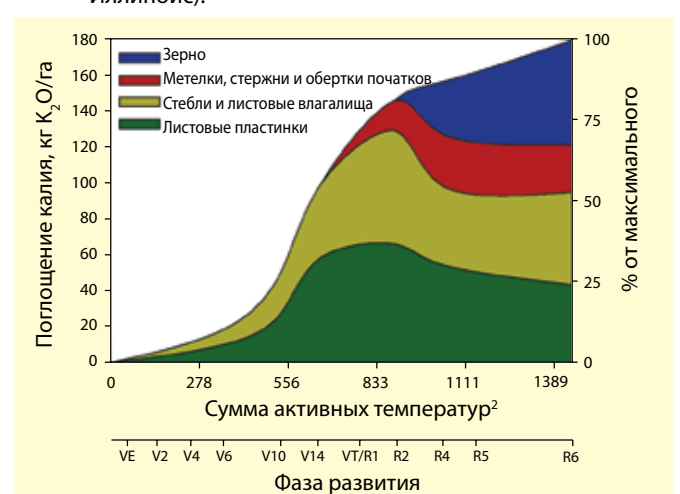


**Рис. 2.** Динамика потребления азота растениями кукурузы. Средние значения для 6-ти гибридов, возделываемых в двух полевых опытах в 2010 г. (Урбана и Де-Калб, штат Иллинойс).

В отличие от потребления N, P, K и S (S-образные кривые либо относительно постоянная скорость поглощения), процесс поглощения микроэлементов растениями характеризуется более сложными зависимостями. Кривые поглощения цинка и бора в начальный период вегетативного роста имеют S-образный вид, а к фазам выметывания метелки – выбрасывания нитей початка выходят на плато (рис. 6 и 7). Для цинка в дальнейшем характерна постоянная скорость поглощения, аналогично поступлению фосфора и серы в растения. В то же время на кривой поглощения бора выделяется второй S-образный участок, завершающийся в фазу образования углубления на верхушке зерновки. Цинк и бор интенсивно поглощаются растениями в течение более коротких периодов времени по сравнению с макроэлементами. Так, в течение



**Рис. 3.** Динамика потребления фосфора растениями кукурузы. Средние значения для 6-ти гибридов, возделываемых в двух полевых опытах в 2010 г. (Урбана и Де-Калб, штат Иллинойс).

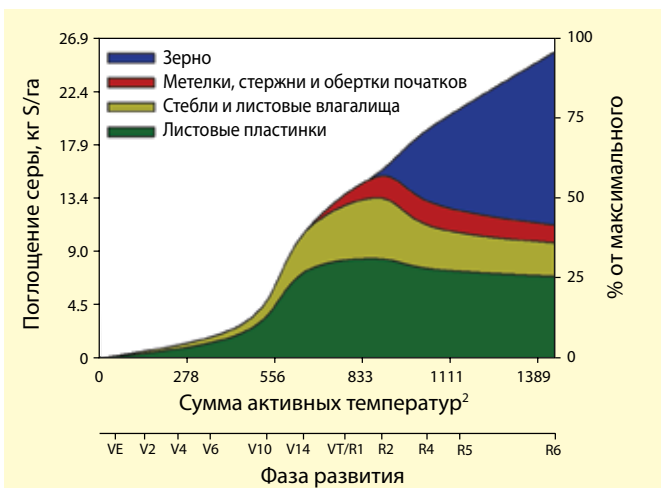


**Рис. 4.** Динамика потребления калия растениями кукурузы. Средние значения для 6-ти гибридов, возделываемых в двух полевых опытах в 2010 г. (Урбана и Де-Калб, штат Иллинойс).

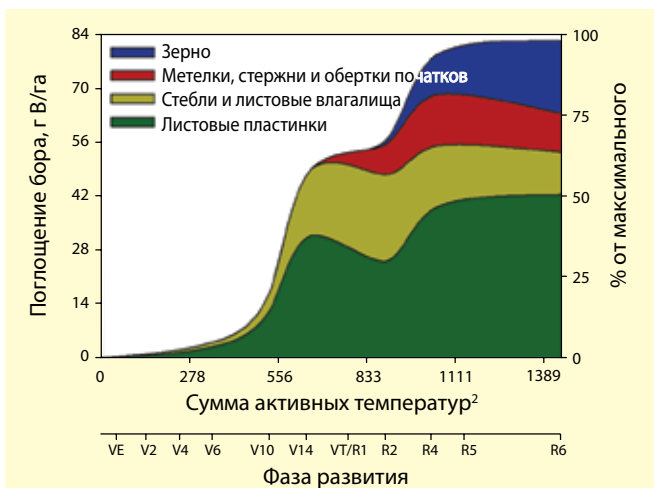
лишь 1/3 вегетационного периода – в конце вегетативного роста и в репродуктивные фазы развития растениями потребляется 71% цинка (рис. 6). Временной интервал максимального поглощения бора также непродолжителен – 65% бора поступает в растения в течение 1/5 вегетационного периода (рис. 7). Удовлетворение потребности кукурузы в микроэлементах в условиях высокопродуктивных агроценозов требует применения соответствующих доз и форм микроудобрений, способных обеспечить растения микроэлементами в ключевые фазы роста.

### Подвижность элементов питания в растениях

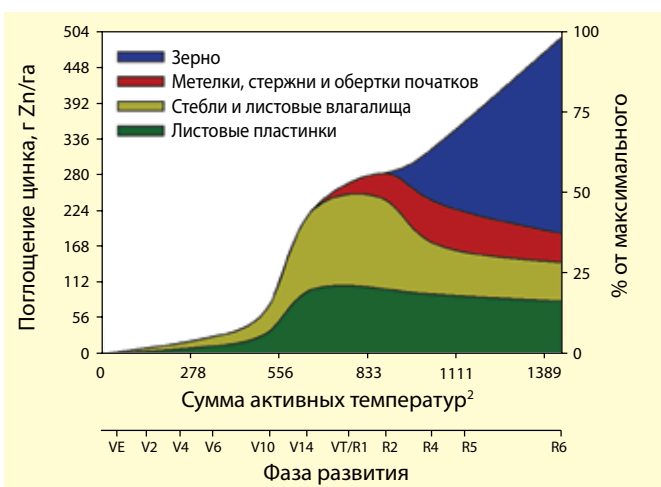
Для ряда элементов питания характерна высокая подвижность в растениях. Такие элементы питания могут сначала усваиваться в одних органах растений, а затем реутилизируются (ремобилизируются) – транспортируются и используются в других органах (Sayre, 1948; Hanway, 1962; Karlen et al., 1988). В зерне кукурузы к периоду созревания относительно больше накапливается N, P, S и Zn, о чем свидетельствуют высокие значения относительного выноса указанных



**Рис. 5.** Динамика потребления серы растениями кукурузы. Средние значения для 6-ти гибридов, возделываемых в двух полевых опытах в 2010 г. (Урбана и Де-Калб, штат Иллинойс).



**Рис. 7.** Динамика потребления бора растениями кукурузы. Средние значения для 6-ти гибридов, возделываемых в двух полевых опытах в 2010 г. (Урбана и Де-Калб, штат Иллинойс).



**Рис. 6.** Динамика потребления цинка растениями кукурузы. Средние значения для 6-ти гибридов, возделываемых в двух полевых опытах в 2010 г. (Урбана и Де-Калб, штат Иллинойс).

элементов питания с урожаем зерна (табл. 1). Накопление данных элементов питания в зерне происходит за счет их ассимиляции в период налива зерна (после выметывания метелки – выбрасывания нитей початка), а также реутилизации из других частей растения. Например, более 50% фосфора потребляется растениями после периода выметывания метелки – выбрасывания нитей початка, и, кроме того, происходит значительная реутилизация фосфора в зерно из листьев и стеблей растений (рис. 3). Величины относительного выноса с урожаем зерна таких элементов питания, как азот и сера, достаточно близки, однако механизмы накопления в зерне данных элементов питания различаются. Накопление серы в зерне происходит главным образом за счет ее поглощения растениями после цветения (рис. 5). Азот же, наоборот, накапливается в зерне в основном за счет реутилизации (рис. 2). Получены уникальные данные по подвижности цинка в растениях. Показано, что стебель кукурузы временно служил основным источником цинка в растении. К фазе физиологической спелости примерно 60% цинка, содержащегося в стеблях, предположительно, было реутилизировано зерном. Содержание бора в листьях

снижалось в период выметывания метелки – выбрасывания нитей початка, что свидетельствует о важной роли бора в репродуктивном развитии растений (рис. 7). Аналогичные результаты были получены Карленом с соавт. (Karlen et al., 1988).

### Оптимизация систем применения удобрений

Управление питанием растений – комплексный процесс. Совершенствование наших представлений о временных интервалах поглощения элементов питания кукурузой, потребляемых количествах, распределении по органам растений и реутилизации позволяет оптимизировать дозы, формы и сроки внесения удобрений. В отличие от других элементов питания, накопление P, S и Zn растениями протекает сильнее в период налива зерна, чем в период вегетативного роста. Следовательно, поступление указанных элементов питания из почвы в течение всего периода вегетации имеет критическое значение для сбалансированного питания кукурузы. Микроэлементы – цинк и бор характеризуются более короткими интервалами максимального поглощения растениями по сравнению с макроэлементами. На первом месте по относительному выносу с урожаем зерна находится фосфор. Фермерами штата Иллинойс в севообороте кукуруза – соя обычно практикуется внесение фосфорных удобрений под кукурузу с учетом их последствие на сое. Фермеры вносят под кукурузу в среднем 104 кг  $P_2O_5$ /га (Fertilizer and Chemical Usage, 2011), и 80% посевов сои используют последствие фосфорных удобрений, остающихся в почве в количестве 14.6 кг  $P_2O_5$ /га исходя из выноса фосфора с урожаем зерна кукурузы (Fertilizer, Chemical Usage, and Biotechnology Varieties, 2010). Эти расчеты свидетельствуют о существующей угрозе потери почвенного плодородия, если с ростом продуктивности агроценозов не будут соответствующим образом скорректированы дозы фосфорных удобрений. Данная информация по питанию растений очень важна для понимания требований, предъявляемых в настоящее время к системам применения удобрений.

## Закключение

Достижения в области агрономии, селекции и биотехнологии в течение последних 50-ти лет позволили выйти на новый уровень урожайности. Однако при достигнутом высоком уровне урожайности происходит значительное снижение обеспеченности почв макро- и микроэлементами. Последнее обследование плодородия почв Северной Америки, результаты которого были обобщены Международным институтом питания растений, свидетельствует о том, что за последние 5 лет в США и Канаде выросла доля почв с содержанием подвижных форм P, K, S и Zn, близким к критическим уровням и ниже данных уровней (Fixen et al., 2010). Снижение почвенного плодородия при возделывании высокоурожайных гибридов предполагает, что потребности растений в элементах питания не удовлетворяются за счет применения удобрений, и что дозы удобрений не компенсируют вынос элементов питания с урожаем, то есть недостаточны для поддержания почвенного плодородия. Обобщение результатов последних исследований по динамике потребления элементов питания основными сельскохозяйственными культурами, включая кукурузу, будет способствовать достижению фундаментальной цели – обеспечению потребности растений в элементах питания за счет оптимизации форм, доз, сроков и способов внесения удобрений.

Авторы выражают благодарность Компании «Мозаик» (The Mosaic Company) за финансовую поддержку исследований. Данная статья – это сокращенная версия научной работы, опубликованной в выпуске *Агрономического Журнала (Agronomy Journal)* за январь-февраль 2013 г.

## 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.

**Ф**осфор – 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 на-

Г-н Бендер – научный ассистент, Университет штата Иллинойс в Урбане-Шампэйн, г. Урбана, штат Иллинойс, США; e-mail: bender14@illinois.edu. Д-р Хаегеле – научный сотрудник, Университет штата Иллинойс в Урбане-Шампэйн, г. Урбана, штат Иллинойс, США; e-mail: haegele1@illinois.edu.

Д-р Руффо – менеджер по агрономии, Компания «Мозаик» (The Mosaic Company), г. Буэнос-Айрес, Аргентина; e-mail: matias.ruffo@mosaicco.com.

Д-р Белоу – профессор по растениеводству, Университет штата Иллинойс в Урбане-Шампэйн, г. Урбана, штат Иллинойс, США; e-mail: fbelow@illinois.edu.

## Литература

- Bruulsema, T.W., P.E. Fixen, and G.D. Sulewski. 2012. *4R Plant Nutrition Manual: A Manual for Improving the Management of Plant Nutrition, North American Version*. International Plant Nutrition Institute, Norcross, GA, USA.
- Fertilizer and Chemical Usage. 2011. *National Agriculture Statistics Service, United States Department of Agriculture*. Illinois Farm Report. 32:8.
- Fertilizer, Chemical Usage, and Biotechnology Varieties. 2010. *Bulletin As11091, Illinois Agricultural Statistics, National Agriculture Statistics Service, United States Department of Agriculture*.
- Fixen, P.E., T.W. Bruulsema, T.L. Jensen, R.L. Mikkelsen, T.S. Murrell, S.B. Phillips, Q. Rund, and W.M. Stewart. 2010. *Better Crops* 94(4):6-8.
- Hanway, J.J. 1962. *Agron. J.* 54:217-222.
- Hanway, J.J. 1963. *Agron. J.* 55:487-492.
- Karlen, D.L. R.L. Flannery, and E.J. Sadler. 1988. *Agron. J.* 80:232-242.
- Sayre, J.D. 1948. *Physiol. Plant* 23:267-281.

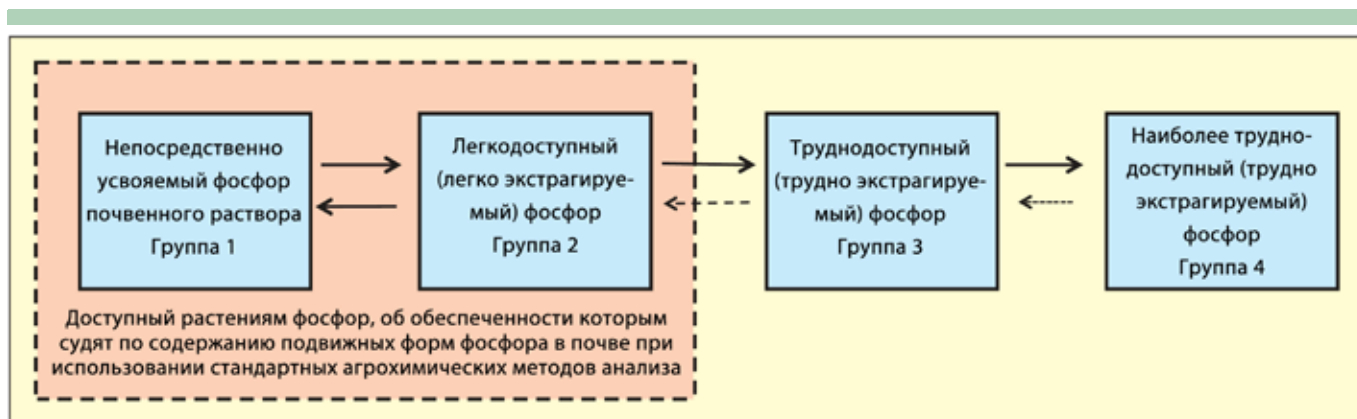
Перевод с английского и адаптация: В.В. Носов.

селения. 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 существо-





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

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

$$((U_p - U_0)/F_p)100,$$

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.

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

Эффективность использования растениями вне-

**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.

**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).

сенного 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 исследований), 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 использова-

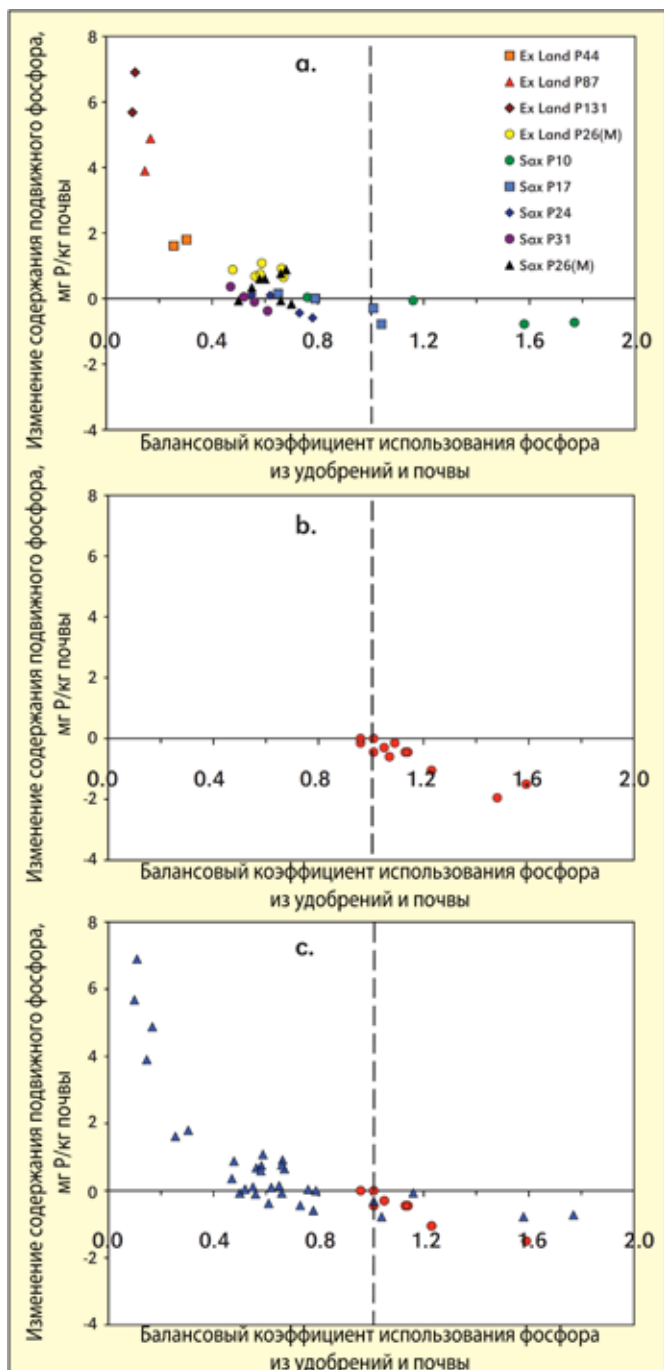
ния фосфора из удобрений и почвы, превышала 90% (табл. 1). Аналогичные полевые опыты по поддержанию содержания доступного растениям фосфора в почве на критическом уровне при компенсации выноса фосфора с урожаем за счет внесения фосфорных удобрений проводились и ранее (Halvorson, Black, 1985; McCollum, 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 единице<sup>1</sup>, 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 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 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

<sup>1</sup> 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):

а – данные двух многолетних полевых опытов, проводимых в Великобритании [P44 и т.д. – ежегодная доза фосфора; М – доза фосфора, компенсирующая вынос с урожаем основной продукции];

б – данные для 12-ти штатов США (П. Фиксен, личные контакты);

с – объединенные данные для США ( ) и Великобритании ( ).

Ex Land = Бессменная озимая пшеница

Sax = Опыт в Саксмундхаме

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 со-

единений 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.

Рецензирование и редактирование перевода с английского: В.В. Носов.

# Содержание подвижных форм фосфора в черноземах обыкновенных Ростовской области и эффективность использования фосфора из удобрений растениями кукурузы

Носов В.В., Бирюкова О.А. и Божков Д.В.

Исследования, проведенные в двух районах Ростовской области на черноземах обыкновенных, свидетельствуют о том, что общепринятый для почвенной зоны метод для определения содержания подвижных форм фосфора адекватно характеризует условия питания растений фосфором. Согласно полученным результатам, оптимизация минерального питания кукурузы при выращивании в относительно засушливых почвенно-климатических условиях региона способствует существенному повышению ее продуктивности. При этом наблюдается высокая эффективность использования фосфора из удобрений растениями кукурузы.

Адекватная оценка обеспеченности почв доступными формами элементов питания растений имеет огромное значение для выработки наиболее оптимальной системы применения удобрений и получения максимальной экономической отдачи. В мировой практике для диагностики обеспеченности карбонатных почв, особенно содержащих более 2%  $\text{CaCO}_3$ , подвижными формами фосфора широко используется метод Олсена (0.5 M  $\text{NaHCO}_3$ , pH = 8.5) (Recommended chemical soil test procedure ..., 1998). В этой связи нами было проведено сравнение данного метода с методом Мачигина (1%-ый раствор  $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ , pH = 9.0), общепринятого для карбонатных почв в России.

Почвы в наших исследованиях – черноземы обыкновенные со слабощелочной реакцией среды ( $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}} = 7.6-7.9$ ) и низким содержанием гумуса (3.0-3.2%). Было проанализировано 27 почвенных образцов, отобранных осенью 2012 г. с площади 39 га в фермерском хозяйстве (ИП Тюрин М.Н., глава КФХ) в Егорлыкском районе Ростовской области. Кроме того, аналогичная работа была проведена и на базе стационарного полевого опыта, который проводится на Целинском ГСУ в Целинском районе в севообороте кукуруза – соя. Опыт повторялся в пространстве и ежегодно включал два экспериментальных участка – под кукурузой и соей. В опыте сравнивались две системы применения удобрений, а именно: практика

хозяйств – средние дозы минеральных удобрений, применяемые в хозяйствах района, и экологическая интенсификация. Кроме того, изучалось действие азотных удобрений при использовании данных агротехнологий. Условия проведения данного опыта были более детально описаны ранее (Носов и др., 2014). Почвенные образцы отбирались весной до внесения удобрений. Таким образом, в общей сложности за 3 года (2012-2014 гг.) с учетом 4-х повторностей было отобрано и проанализировано 96 почвенных образцов (смешанный образец с делянки при отборе из 5-ти точек).

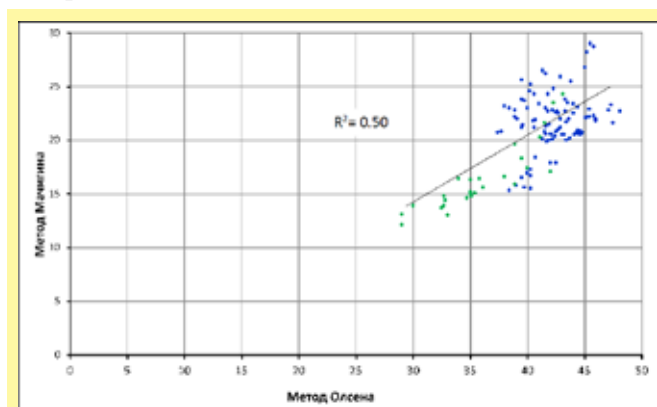


Рис. 1. Зависимость между содержанием подвижных форм фосфора, извлекаемых из почв с помощью методов Мачигина и Олсена (мг  $\text{P}_2\text{O}_5$ /кг почвы).

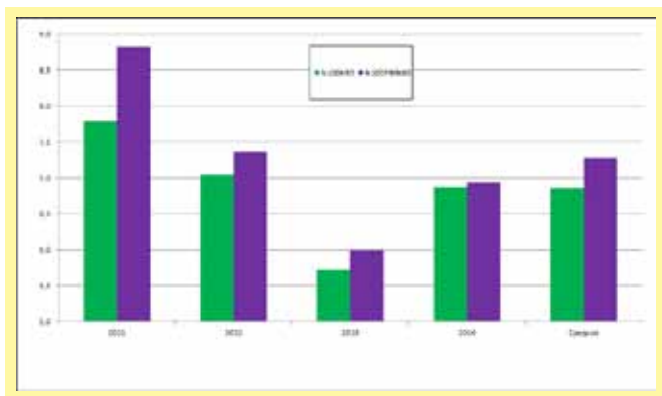
Как видно из **рис. 1**, при использовании метода Мачигина из почвы в целом извлекается меньшее количество фосфора по сравнению с методом Олсена, но между полученными с помощью данных экстрагентов значениями прослеживается тесная корреляционная связь. При этом результаты анализа почвенных образцов, отобранных в соседних районах области, по-видимому, можно рассматривать в рамках одной совокупности.

Использование описательного метода, заключающегося в расчете разности между двумя измерениями, средней величины и стандартного отклонения разности (Бирюкова и др., 2014), ранее позволило сделать вывод о систематическом расхождении результатов для двух методов определения содержания подвижного фосфора в почве стационарного опыта, как с вероятностью 0.95, так и 0.99. При более низком содержании фосфора в почве оба метода дают близкие значения, а при более высоком – расхождение возрастает.

Для изучения отзывчивости кукурузы на внесение в почву отдельных элементов питания в Целинском районе в типичном севообороте в течение 4-х лет были дополнительно проведены однолетние полевые опыты с кукурузой. Схема опытов включала варианты с внесением и без внесения фосфорных удобрений – N100P80K60 и N100K60 соответственно. Удобрения вносились под предпосевную культивацию. Изучались несколько повышенные дозы элементов питания, чтобы исключить их недостаток у растений. Проводилась также обработка семян сульфатом цинка.

Содержание подвижных форм фосфора в слое почвы 0-20 см перед закладкой опытов находилось в довольно узком диапазоне, а именно: 22.0-24.4 мг  $P_2O_5$ /кг почвы – по методу Мачигина и 36.8-40.5 мг  $P_2O_5$ /кг почвы – по методу Олсена. За счет применения фосфорных удобрений урожайность зерна кукурузы в среднем за годы исследований повышалась на 6% (**рис. 2**). Максимальная прибавка урожайности от фосфора в 13% была получена в наиболее благоприятном 2011 г., когда продуктивность культуры была максимальной.

Для однолетних опытов был рассчитан ряд показателей, используемых для оценки эффективности использования фосфора из удобрений растениями кукурузы, а также коэффициенты вариации данных показателей. Под агрономической эффективностью



**Рис. 2.** Отзывчивость кукурузы на применение фосфорных удобрений в однолетних опытах (т/га).

**Таблица 1.** Показатели оценки эффективности использования фосфора из удобрений растениями кукурузы.

Показатель	2011	2012	2013	2014	Среднее
АЭ, кг зерна/ кг $P_2O_5$	12.9	4.1	3.4	1.0	5.4
CV, %	23	31	84	-	
КИУ, %	103	76	56	88	81
CV, %	8	45	20	12	
БКИУП, %	112	96	71	71	88
CV, %	4	3	10	5	

применения фосфорных удобрений понималась окупаемость фосфора прибавкой урожая зерна кукурузы:

$$AЭ = (Y - Y_0)/D,$$

где: АЭ – агрономическая эффективность применения фосфорных удобрений (кг зерна/кг  $P_2O_5$ ); Y – урожайность зерна в варианте с внесением фосфорных удобрений (т/га);  $Y_0$  – урожайность зерна в варианте без внесения фосфорных удобрений (т/га); D – доза фосфорных удобрений (кг  $P_2O_5$ /га).

Коэффициент использования фосфора из удобрений растениями рассчитывался разностным способом по следующей формуле:

$$КИУ = ((B - B_0)/D)100,$$

где: КИУ – коэффициент использования фосфора из удобрений растениями (%); B – вынос фосфора надземной биомассой растений в варианте с внесением фосфорных удобрений (кг  $P_2O_5$ /га);  $B_0$  – вынос фосфора надземной биомассой растений в варианте без внесения фосфорных удобрений (кг  $P_2O_5$ /га); D – доза фосфорных удобрений (кг  $P_2O_5$ /га).

Так называемый балансовый коэффициент использования элемента питания из удобрений и почвы растениями рассчитывался по формуле, представленной ниже:

$$БКИУП = (B/D)100,$$

где: БКИУП – балансовый коэффициент использования фосфора из удобрений и почвы растениями (%); B – вынос фосфора зерном в варианте с внесением фосфорных удобрений (кг  $P_2O_5$ /га); D – доза фосфорных удобрений (кг  $P_2O_5$ /га).

Агрономическая эффективность (АЭ) применения фосфорных удобрений в среднем за 4 года составила 5.4 кг зерна/кг  $P_2O_5$  (**табл. 1**). Это относительно высокий показатель с учетом того, что в опытах вносились повышенные дозы фосфора. Условная граница рентабельности, согласно нашим оценкам, составляет 4.4 кг зерна/кг  $P_2O_5$ . Расчет в данном случае проводился без учета затрат на внесение удобрений в почву, а также уборку и доработку прибавки урожая. При оптимизации дозы фосфора (исходя из изучения отзывчивости растений на внесение возрастающих доз), безусловно, можно ожидать гораздо большую отдачу от применения фосфорных удобрений. Следует отметить, что для агрономической эффективности применения

фосфорных удобрений было характерно очень сильное варьирование, о чем свидетельствуют высокие значения коэффициента вариации (CV).

Как отмечается в ряде работ (Johnston с соавт., 2009; Johnston с соавт., 2014), показатель КИУ, рассчитанный с учетом прямого действия фосфора на зерновых культурах, как правило, имеет очень низкие значения. В связи с этим, эффективность использования фосфора из удобрений растениями в севообороте можно ошибочно интерпретировать, как невысокую. Исходя из последействия фосфорных удобрений, в практических целях указанными авторами предложено применять балансовый коэффициент использования фосфора из удобрений и почвы (БКИУП), который отражает использование растениями ранее накопленных почвенных запасов фосфора. Однако в наших опытах показатель КИУ имел достаточно высокие значения (81% в среднем за 4 года исследований), и был ненамного меньше БКИУП (88%). Это свидетельствует о высоком использовании фосфора из удобрений растениями кукурузы непосредственно в год внесения удобрений на черноземе обыкновенном со средней обеспеченностью подвижными формами фосфора (по Мачигину).

В заключении следует отметить, что общепринятый для карбонатных почв метод для определения содержания подвижных форм фосфора вполне адекватно характеризует условия питания растений фосфором в изученных почвах. Полученные результаты свидетельствуют о том, что оптимизация минерального питания кукурузы при выращивании в относительно засушливых почвенно-климатических условиях региона способствует существенному повышению ее продуктивности. При этом наблюдается высокая эффективность использования фосфора из внесенных удобрений растениями кукурузы.

## Повышение агрохимической эффективности комплексных фосфорсодержащих удобрений за счет гуматной добавки

Левин Б.В., Озеров С.А., Гармаш Г.А., Латина Н.В., Гармаш Н.Ю.

За несколько лет исследований установлено, что урожайность зерновых культур (яровой и озимой пшеницы, ярового ячменя) и рапса возрастала при внесении гуматизированных удобрений по сравнению с аналогичными дозами традиционных удобрений. Наибольший эффект от применения гуматизированных удобрений был получен на яровой пшенице и яровом рапсе в условиях засухи 2010 года. Внесение возрастающих доз минеральных удобрений в условиях засухи не привело к увеличению урожая яровой пшеницы и ярового рапса. При применении в аналогичных условиях такого же количества гуматизированных удобрений получена достоверная прибавка урожая изучаемых культур.

**П**рименение минеральных удобрений (даже в высоких дозах) не всегда приводит к прогнозируемому увеличению урожая.

Многочисленные исследования свидетельствуют о том, что погодные условия вегетационного периода оказывают настолько сильное влияние на развитие растений, что экстремально неблагоприятные погодные условия фактически нивелирует эффект

Носов В.В. – региональный директор по Югу и Востоку России Международного института питания растений, кандидат биологических наук; e-mail: vnosov@ipni.net.

Бирюкова О.А. – доцент кафедры почвоведения и оценки земельных ресурсов Южного федерального университета, доктор сельскохозяйственных наук; e-mail: olga\_alexan@mail.ru.

Божков Д.В. – аспирант кафедры почвоведения и оценки земельных ресурсов Южного федерального университета.

## Литература

Recommended chemical soil test procedure for the North Central region. North Central Regional Research Publication No. 221 (Revised). Missouri Agricultural Experiment Station SB 1001. Revised January 1998. 73 p.

Носов В.В., Бирюкова О.А., Купров А.В. и Божков Д.В. 2014. Питание Растений. Вестник Международного института питания растений, 1: 5-8. <http://eeca-ru.ipni.net/article/EECARU-2230>

Бирюкова О.А., Божков Д.В. и Носов В.В. 2014. Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета, 09 (103). IDA [article ID]: 1031409038. <http://ej.kubagro.ru/2014/09/pdf/38.pdf>

Johnston A.E., Syers J.K. A New Approach to Assessing Phosphorus Use Efficiency in Agriculture // Better Crops with Plant Food. 2009. Vol. 93. №3. P. 14-16. [www.ipni.net/publication/bettercrops.nsf/issue/BC-2009-3](http://www.ipni.net/publication/bettercrops.nsf/issue/BC-2009-3)

Johnston J., Fixen P., Poulton P. The efficient use of phosphorus in agriculture // Better Crops with Plant Food. 2014. Vol. 98. №4. P. 22-24. [www.ipni.net/publication/bettercrops.nsf/issue/BC-2014-4](http://www.ipni.net/publication/bettercrops.nsf/issue/BC-2014-4)

любые новые приемы повышения эффективности минеральных удобрений в районах неустойчивого земледелия заслуживают внимания.

Один из приемов увеличения эффективности использования питательных веществ из удобрений и почвы, укрепления иммунитета растений к неблагоприятным факторам среды и повышения качества получаемой продукции - использование гуминовых препаратов при возделывании сельскохозяйственных культур.

За последние 20 лет, значительно повысился интерес к гуминовым веществам, применяемым в сельском хозяйстве. Тема гуминовых удобрений не является новой ни для исследователей, ни для практиков-аграриев. Начиная с 50-х годов прошлого столетия изучалось влияние гуминовых препаратов на рост, развитие, урожай различных сельскохозяйственных культур. В настоящее время в связи с резким подорожанием минеральных удобрений гуминовые вещества широко применяются для увеличения эффективности использования питательных веществ из почвы и удобрений, повышения иммунитета растений к неблагоприятным факторам среды и повышения качества урожая получаемой продукции.

Разнообразно сырье для производства гуминовых препаратов. Это могут быть угли бурые и темные, торф, озерный и речной сапропель, вермикомпост, леонардит, а также различные органические удобрения и отходы.

Основным способом получения гуматов на сегодняшний день является технология высокотемпературного щелочного гидролиза сырья, в результате которой происходит высвобождение поверхностно-активных высокомолекулярных органических веществ различной массы, характеризующихся определенным пространственным строением и физико-химическими свойствами. Препаративная форма гуминовых удобрений может представлять собой порошок, пасту или жидкость с различными удельным весом и концентрацией действующего вещества.

Основным отличием для различных гуминовых препаратов является форма действующего компонента гуминовых и фульвокислот и (или) их солей - в водорастворимой, усвояемой или трудноусвояемой формах. Чем выше содержание органических кислот в гуминовом препарате, тем ценнее он как для индивидуального применения, так и особенно для получения комплексных удобрений с гуматами.

Различны способы применения гуминовых препаратов в растениеводстве: обработка посевного материала, некорневые подкормки, внесение водных растворов в почву.

Гуматы могут применяться как отдельно, так и в сочетании со средствами защиты растений, регуляторами роста, макро- и микроэлементами. Спектр их использования в растениеводстве чрезвычайно широк и включает практически все сельскохозяйственные культуры, производимые как в крупных аграрных предприятиях, так и в личных подсобных хозяйствах. В последнее время значительно выросло их использование на различных декоративных куль-

турах.

Гуминовые вещества обладают комплексным действием, улучшающим состояние почвы и системы взаимодействия «почва – растения»:

- повышают подвижность усвояемого фосфора в почве и почвенных растворах, ингибируют иммобилизацию усвояемого фосфора и ретроградацию фосфора;

- кардинально улучшают баланс фосфора в почвах и фосфорное питание растений, выражающееся в увеличении доли фосфорорганических соединений, ответственных за перенос и трансформацию энергии, синтез нуклеиновых кислот;

- улучшают структуру почв, их газопроницаемость, водопроницаемость тяжелых почв;

- поддерживают органо-минеральный баланс почв, препятствуя их засолению, закислению и другим негативным процессам, приводящим к снижению или потере плодородия;

- сокращают вегетативный период за счет улучшения белкового обмена, концентрированной доставки питательных компонентов к плодовой части растений, насыщению их высокоэнергетическими соединениями (сахара, нуклеиновые кислоты и др. органические соединения), а также подавляют накопление нитратов в зеленой части растений;

- усиливают развитие корневой системы растения за счет полноценного питания и ускоренного деления клеток.

Особенно важными являются полезные свойства гуминовых компонентов для поддержания органо-минерального баланса почв при интенсивных технологиях. В статье Пола Фиксена «Концепция повышения продуктивности сельскохозяйственных культур и эффективности использования элементов питания растениями» (Фиксен, 2010) приведена ссылка на системный анализ методов оценки эффективности использования элементов питания растениями. В качестве одного из значимых факторов, влияющих на эффективность использования элементов питания, указывается интенсивность технологий возделывания сельскохозяйственных культур и связанные с ними изменения структуры и состава почвы, в частности, иммобилизация элементов питания и минерализация органического вещества. Гуминовые компоненты в сочетании с ключевыми макроэлементами, прежде всего фосфором, поддерживают плодородие почв при интенсивных технологиях.

В работе Ивановой С.Е., Логиновой И.В., Тиндалл Т. «Фосфор: механизмы потерь из почвы и способы их снижения» (Иванова и др., 2011) химическая фиксация фосфора в почвах отмечена как один из основных факторов низкой степени использования фосфора растениями (на уровне 5 - 25% от внесенного в 1-ый год количества фосфора). Повышение степени использования фосфора растениями в год внесения имеет выраженный экологический эффект - снижение попадания фосфора с поверхностным и подземным стоком в водоемы. Сочетание органической составляющей в виде гуминовых веществ с минеральной в удобрениях препятствует химической фиксации фосфора в малорастворимые фосфаты

№	Показатель	Ед. изм.	Величина
1	Массовая доля органического вещества	%	60
2	Массовая доля солей гуминовых кислот в органическом веществе	%	65
3	Na <sub>2</sub> O	%	6
4	pH		8,0-9,5

кальция, магния, железа и алюминия и сохраняют фосфор в доступной для растений форме.

По нашему мнению, очень перспективно применение гуминовых препаратов в составе минеральных макроудобрений.

В настоящее время существует несколько способов введения гуматов в сухие минеральные удобрения:

- поверхностная обработка гранул гранулированных промышленных удобрений, которая широко применяется при приготовлении механических ту-космесей;

- механическое введение гуматов в порошок с последующей грануляцией при малотоннажном производстве минеральных удобрений.

- введение гуматов в плав при крупнотоннажном производстве минеральных удобрений (промышленное производство).

Очень широкое распространение в России и за рубежом получило применение гуминовых препаратов для производства жидких минеральных удобрений, используемых для листовых обработок посевов.

Цель настоящей публикации - показать сравнительную эффективность гуматизированных и обычных гранулированных минеральных удобрений на зерновых культурах (озимой и яровой пшенице, ячмене) и яровом рапсе в различных почвенно-климатических зонах России.

В качестве гуминового препарата для получения гарантированных высоких результатов по агрохимической эффективности был выбран гумат натрия «Сахалинский» со следующими показателями (табл. 1).

Производство гумата «Сахалинский» основано на использовании бурых углей Солнцевского месторождения о. Сахалин, имеющих очень высокую концентрацию гуминовых кислот в усвояемой форме (более 80%). Щелочная вытяжка из бурых углей этого месторождения представляет собой практически полностью растворимый в воде негигроскопичный и несслеживающийся порошок темно-коричневого цвета. В состав продукта переходят также микроэлементы и цеолиты, способствующие аккумуляции питательных веществ и регулированию обменного процесса.

Кроме указанных показателей гумата натрия «Сахалинский», важным фактором его выбора в качестве гуминовой добавки было производство концентрированных форм гуминовых препаратов в промышленных количествах, высокие агрохимические показатели индивидуального применения, со-

держание гуминовых веществ преимущественно в водорастворимой форме и наличие жидкой формы гумата для равномерного распределения в грануле при промышленном производстве, а также государственная регистрация в качестве агрохимиката.

В 2004 г. на ОАО «Аммофос» в г. Череповец была выпущена опытная партия нового вида удобрения – азофоски (нитроаммофоски) марки 13:19:19, с добавкой гумата натрия «Сахалинский» (щелочная вытяжка из леонардита) в пульпу по технологии, разработанной в ОАО «НИУИФ». Показатели качества гуматизированной аммофоски 13:19:19 приведены в табл. 2.

Основной задачей при проведении промышленных испытаний было обоснование оптимального способа ввода гуматной добавки «Сахалинский» с сохранением водорастворимой формы гуматов в продукте. Известно, что гуминовые соединения в кислых средах (при pH<6) переходят в формы водорастворимых гуматов (Н-гуматы) с потерей их эффективности.

Ввод порошкообразного гумата «Сахалинский» в ретур при производстве комплексных удобрений обеспечил отсутствие контакта гумата с кислой средой в жидкой фазе и его нежелательных химических трансформаций. Это подтвердил последующий анализ готовых удобрений с гуматами. Ввод гумата фактически на финальной стадии технологического процесса определил сохранение достигнутой производительности технологической системы, отсутствие возвратных потоков и дополнительных выбросов. Не отмечено и ухудшения физико-химических комплексных удобрений (слеживаемость, прочность

№	Показатель	Ед. изм.	Норма по ТУ 2186-182-00209438-04	Фактическое
1	Азот	%	13+/-1	13.2
2	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	%	19+/-1	18.6
3	K <sub>2</sub> O	%	19+/-1	18.0
4	Содержание гумата натрия	%	0.2	0.20
5	Влага	%	1.3	1.0
6	Статическая прочность молекул	МПа	3	3.8
7	Рассыпчатость	%	100	100
8	Массовая доля гранул			
	менее 1 мм	%	3	0.2
	1 - 6 мм	%	97	99.8

Варианты опыта	Урожайность, т/га	Содержание белка в зерне, %
Аммофоска	3.10	11.0
Аммофоска+гумат	3.43	12.6
Относительная прибавка, %	10.6	14.5



гранул, пылимость) при наличии гуминовой составляющей. Аппаратурное оформление узла ввода гумата также не представляло сложностей.

В 2004 г. в ЗАО «Сет-Орел Инвест» (Орловская область) был проведен производственный опыт с внесением гуматизированной аммофоски под ячмень. Прибавка урожая ячменя на площади 4532 га от применения гуматизированного удобрения по сравнению со стандартной аммофоской марки 13:19:19 составила 0.33 т/га (11%), содержание белка в зерне повысилось с 11 до 12.6% (табл. 3), что дало хозяйству дополнительную прибыль в размере 924 руб/га.

В 2004 г. в ГФУП ОПХ «Орловское» ВНИИ зернобобовых и крупяных культур (Орловская область) проводились полевые опыты по изучению влияния гуматизированной и обычной аммофоски (13:19:19) на урожай и качество яровой и озимой пшеницы.

Схема опытов:

1. Контроль (без удобрений)
2. N26 P38 K38 кг д.в./га
3. N26 P38 K38 кг д.в./га гуматизированное
4. N39 P57 K57 кг д.в./га
5. N39 P57 K57 кг д.в./га гуматизированное.

Опыты с озимой пшеницей (сорт Московская-39) проводились по двум предшественникам - черный и сидеральный пар. Анализ результатов опыта с озимой пшеницей показал, что гуматизированные удобрения оказывают положительное влияние на урожайность, а также содержание белка и клейковины в зерне по сравнению с традиционным удобрением. Максимальная урожайность (3.59 т/га) наблюдалась в варианте с внесением повышенной дозы гуматизированного удобрения (N39 P57 K57). В этом же варианте получено самое высокое содержание белка и клейковины в зерне (табл. 4).

В опыте с яровой пшеницей (сорт Смена) максимальная урожайность 2.78 т/га наблюдалась также

при внесении повышенной дозы гуматизированного удобрения. В этом же варианте наблюдалось самое высокое содержание белка и клейковины в зерне. Как и в опыте с озимой пшеницей, внесение гуматизированного удобрения статистически значимо увеличивало урожайность и содержание белка и клейковины в зерне по сравнению с внесением такой же дозы стандартного минерального удобрения. Последний работает не только как индивидуальный компонент, но и улучшает усвояемость растениями фосфора и калия, уменьшает потери азота в азотном цикле питания и в целом улучшает обмен между почвой, почвенными растворами и растениями.

Значимое улучшение качества урожая и озимой и яровой пшеницы свидетельствует о повышении эффективности минерального питания продукционной части растения.

По результатам действия гуматную добавку можно сравнить с влиянием микрокомпонентов (бор, цинк, кобальт, медь, марганец и др.). При относительно небольшом содержании (от десятых долей до 1%) гуматные добавки и микроэлементы обеспечивают практически одинаковое повышение урожайности и качества сельскохозяйственной продукции. В работе (Аристархов, 2010) изучено влияние микроэлементов на урожайность и качество зерна зерновых и зернобобовых и показано увеличение белка и клейковины на примере озимой пшеницы при основном внесении на различных типах почв. Направленное влияние микроэлементов и гуматов на продуктивную часть культур сопоставимо по получаемым результатам.

Высокие агрохимические результаты производства при минимальной доработке аппаратурной схемы крупнотоннажного производства комплексных удобрений, полученные от применения гуматизированной аммофоски (13:19:19) с гуматом натрия «Сахалинский», позволили расширить спектр гуматизированных марок комплексных удобрений с

**Таблица 4.** Влияние гуматизированного минерального удобрения марки 13:19:19 на урожайность и качество зерна пшеницы

№ п/п	Варианты опыта	Урожайность, т/га	Содержание в зерне, %	
			Клейковина	Белок
Озимая пшеница (сорт Московская-39)				
1	Контроль (без удобрений)	2.62	18.9	16.4
2	N26 P38 K38	3.22	19.7	16.9
3	N39 P57 K57	3.47	21.8	17.1
4	N26 P38 K38 +гумат	3.37	22.4	17.3
5	N39 P57 K57 +гумат	3.59	24.9	17.6
НСР <sub>05</sub>		0.23		
Относительная прибавка от гумата, %			13.7 - 14.2	2.3 - 2.9
Яровая пшеница (сорт Смена)				
1	Контроль (без удобрений)	1.98	18.3	15.0
2	N26 P38 K38	2.36	19.9	16.2
3	N39 P57 K57	2.50	22.9	17.0
4	N26 P38 K38 +гумат	2.62	22.4	17.0
5	N39 P57 K57 +гумат	2.78	24.5	17.5
НСР <sub>05</sub>		0.24		
Относительная прибавка от гумата, %			7.0 - 12.5	2.9 - 4.9

включением нитратсодержащих марок.

В 2010 г. в ОАО «Минеральные удобрения» (г. Россошь, Воронежская область) была произведена партия гуматизированной азофоски 16:16:16 ( $N:P_2O_5:K_2O$ ) с содержанием гумата (щелочная вытяжка из леонардита) – не менее 0.3% и влаги – не более 0.7%.

Азофоска с гуматами представляла собой гранулированное органоминеральное удобрение светлого цвета, отличающееся от стандартного только присутствием в нем гуминовых веществ, что придавало едва заметный светло-серый оттенок новому удобрению. Азофоска с гуматами была рекомендована в качестве органоминерального удобрения для основного и «припосевного» внесения в почву и для корневых подкормок под все культуры, где возможно применение обычной азофоски.

В 2010 и 2011 гг. на опытном поле ГНУ Московский НИИСХ «Немчиновка» проводили исследования с гуматизированной азофоской производства ОАО «Минеральные удобрения» в сравнении со стандартной, а также с калийными удобрениями, содержащими гуминовые кислоты, в сравнении с традиционным калийным удобрением KCl (хлористым калием).

Полевые опыты проводили по общепринятой методике (Доспехов, 1985) на опытном поле Московского НИИСХ «Немчиновка».

Отличительная особенность почв опытного участка - высокое содержание фосфора (порядка 150-250 мг/кг), и среднее калия (80-120 мг/кг). Это обусловило отказ от основного внесения фосфорных удобрений. Почва дерново-подзолистая среднесуглинистая. Агрохимическая характеристика почвы перед закладкой опыта: содержание органического вещества – 3.7%,  $pH_{сол.}$  – 5.2,  $NH_4^-$  – следы,  $NO_3^-$  – 8 мг/кг,  $P_2O_5$  и  $K_2O$  (по Кирсанову) – 156 и 88 мг/кг соответственно, CaO – 1589 мг/кг, MgO – 474 мг/кг.

В опыте с азофоской и рапсом размер опытной делянки составлял 56 м<sup>2</sup> (14м x 4м), повторность – четырехкратная. Предпосевная обработка почвы после основного внесения удобрений – культиватором и непосредственно перед посевом – РБК (ротационной бороной-культиватором). Посев – сеялкой Амазон в оптимальные агротехнические сроки, глубина заделки семян 4-5см - для пшеницы и 1-3см – для рапса. Нормы высева: пшеницы – 200 кг/га, рапса – 8 кг/га.

В опыте использовали яровую пшеницу сорт МИС и яровой рапс сорт Подмосковный. Сорт МИС - высокопродуктивный среднеспелый, позволяющий стабильно получать зерно, пригодное для производства макаронных изделий. Сорт устойчив к полеганию; значительно слабее стандарта поражается бурой ржавчиной, мучнистой росой и твердой головней.

Яровой рапс Подмосковный - среднеспелый, вегетационный период 98 дней. Экологически пластичен, отличается равномерным цветением и созреванием, устойчивостью к полеганию 4.5-4.8 балла. Низкое содержание глюкозинолатов в семенах позволяет использовать жмых и шроты в рационах животных и птицы в повышенных нормах.

Урожай пшеницы убирали в фазу полной спелости зерна. Рапс скашивали на зеленый корм в фазу цветения. Опыты для яровой пшеницы и рапса заложены по одной схеме.

Анализ почвы и растений проводили согласно стандартным и общепринятым в агрохимии методам.

Схема опытов с азофоской:

1. Фон (50кг д.в. N/га в подкормку)
2. Фон+азофоска основное внесение 30кг д.в. NPK/га
3. Фон+азофоска с гуматом основное внесение 30кг д.в. NPK/га
4. Фон+азофоска основное внесение 60кг д.в. NPK/га
5. Фон+азофоска с гуматом основное внесение 60кг д.в. NPK/га
6. Фон+азофоска основное внесение 90кг д.в. NPK/га
7. Фон+азофоска с гуматом основное внесение 90кг д.в. NPK/га

Агрохимическую эффективность комплексные удобрения с гуматами продемонстрировали и в экстремально засушливых условиях 2010 г., подтвердив ключевое значение гуматов для стрессоустойчивости культур за счет активации обменных процессов при водном голодании.

В годы проведения исследований погодные условия значительно отличались от средних многолетних для Нечерноземной зоны. В 2010 году май и июнь были благоприятными для развития сельскохозяйственных культур, и у растений были заложены генеративные органы с перспективой на будущий урожай зерна порядка 7т/га у яровой пшеницы (как в 2009 году) и 3т/га – у рапса. Однако, как и во всем Центральном регионе РФ, в Московской области с начала июля и до уборки урожая пшеницы в начале августа наблюдалась длительная засуха. Среднесуточные температуры в этот период были превышены на 7°C, а дневные температуры в течение длительного времени были выше 35°C. Отдельные кратковременные осадки выпадали в виде ливневых дождей и вода стекала с поверхностным стоком и испарялась, лишь частично впитываясь в почву. Насыщение почвы влагой в кратковременные периоды дождей не превышало глубины проникновения 2-4 см. В 2011 году в первой декаде мая после посева и во время всходов растений осадков выпало почти в 4 раза меньше (4 мм) средневзвешенной многолетней нормы (15 мм).

Среднесуточная температура воздуха в этот период (13.9°C) была значительно выше среднесуточной многолетней температуры (10.6°C). Количество осадков и температура воздуха во 2-ую и 3-ю декады мая значительно не отличались от количества средневзвешенных осадков и среднесуточных температур. Четвертая декада мая, также, как и первая, характеризовалась значительно меньшим количеством осадков и более высокими температурами воздуха.

В июне осадков выпало значительно меньше средней многолетней нормы, температура воздуха пре-

Варианты опыта	Урожай	Прибавка	Масса 1000 зерен	Содержание в зерне, %			
	т/га			азот	фосфор	калий	белок
Фон (N50)	2.73	-	28	2.00	0.46	0.42	11.4
Фон (N50) + азофоска (N30P30K30)	3.27	0.54	27	2.09	0.48	0.44	11.9
Фон (N50) + азофоска с гуматом (N60P60K60)	3.48	0.75	27	2.16	0.43	0.38	12.3
Фон (N50) + азофоска (N60P60K60)	3.06	0.33	27	2.58	0.42	0.41	14.7
Фон (N50) + азофоска с гуматом (N90P90K90)	3.57	0.84	27	2.46	0.47	0.38	14.0
Фон (N50) + азофоска (N90P90K90)	3.24	0.51	27	2.59	0.50	0.39	14.8
Фон (N50) + азофоска с гуматом (N90P90K90)	3.69	0.96	27	2.59	0.47	0.37	14.8
НСР <sub>05</sub>	0.32						

вышла среднесуточные на 2-4°C.

Жарким и сухим был июль. Всего за вегетационный период осадков выпало на 60 мм меньше нормы, а среднесуточная температура воздуха была примерно на 2°C выше средней многолетней. Неблагоприятные погодные условия 2010 и 2011 годов не могли не сказаться на состоянии посевов. Засуха совпала с фазой налива зерна у пшеницы, что, в конечном итоге, привело к значительному снижению урожая.

Длительная воздушная и почвенная засуха в 2010 году не дали ожидаемого эффекта от возрастающих доз азофоски. Это проявилось как на пшенице, так и на рапсе.

Дефицит влаги оказался главным препятствием в реализации заложенного почвенного плодородия, при этом урожайность пшеницы в целом была в два раза ниже, чем в аналогичном опыте 2009 года (Гармаш и др., 2011). Прибавки урожая при внесении 200, 400 и 600 кг/га азофоски (физического веса) были практически одинаковы (табл. 5).

Низкая урожайность пшеницы обусловлена, в основном, щуплостью зерна. Масса 1000 зерен на всех вариантах опыта равнялась 27 – 28 грамм. Данные по структуре урожая на вариантах достоверно не различались. В массе снопа зерно составляло около 30% (при нормальных погодных условия этот показатель составляет до 50%). Коэффициент кущения равен 1.1-1.2. Масса зерна в колосе составляла 0.7-0.8 грамм.

В то же время, в вариантах опыта с гуматизированной азофоской получена достоверная прибавка урожая при увеличении доз удобрений. Это обусловлено, прежде всего, лучшим общим состоянием растений и развитием более мощной корневой системы при применении гуматов на фоне общего стресса посевов от длительной и продолжительной засухи.

Значительный эффект от применения гуматизированной азофоски проявился на начальном этапе развития растений рапса. После посева семян рапса в результате кратковременного ливня с последующими высокими температурами воздуха на поверхности почвы образовалась плотная корка. Поэтому всходы на вариантах с внесением обычной азофоски были неравномерными и сильно изреженными по сравнению с вариантами с гуматизированной азофоской, что привело к значительным различиям в урожае зеленой массы (табл. 6).

В опыте с калийными удобрениями площадь опытной делянки составляла – 225 м<sup>2</sup> (15м x 15м),

повторность опыта – четырехкратная, расположение делянок – рендомизированное. Площадь опыта – 3600 м<sup>2</sup>. Опыт проведен в звене севооборота озимые зерновые – яровые зерновые - занятый пар. Предшественник яровой пшеницы – озимое тритикале.

Удобрения вносили вручную из расчета: азота – 60, калия – 120 кг д.в. на га. В качестве азотных удобрений применяли аммиачную селитру, в качестве калийных – калий хлористый и новое удобрение КалиГум. В опыте выращивали яровую пшеницу сорт Злата, рекомендованный для возделывания в Центральном регионе. Сорт раннеспелый с потенциалом продуктивности до 6.5 т/га. Устойчив к полеганию, значительно слабее стандартного сорта поражается бурой ржавчиной и мучнистой росой, на уровне стандартного сорта – септориозом. Семена до посева обрабатывали протравителем «Винцит» в рекомендуемых производителем нормах. В фазе кущения проводили подкормку посевов пшеницы аммиачной селитрой из расчета 30 кг д.в. на 1 га.

Схема опытов с калийными удобрениями:

1. Контроль (без удобрений).
2. N60 основное + N30 подкормка
3. N60 основное + N30 подкормка + K 120 (KCl)
4. N60 основное + N30 подкормка + K 120 (КалиГум)

В опытах с калийными удобрениями отмечена тенденция увеличения урожая зерна пшеницы в варианте с испытуемым удобрением КалиГум по

Вариант	Урожай зеленой массы	Прибавка
	т/га	
Фон (N50)	10.1	-
Фон (N50) + азофоска (N30P30K30)	12.0	1.9
Фон (N50) + азофоска с гуматом (N60P60K60)	18.5	8.4
Фон (N50) + азофоска (N60P60K60)	12.4	2.3
Фон (N50) + азофоска с гуматом (N90P90K90)	20.1	10.0
Фон (N50) + азофоска (N90P90K90)	13.2	3.1
Фон (N50) + азофоска с гуматом (N90P90K90)	22.6	12.5
НСР <sub>05</sub>	2.1	

**Таблица 7.** Эффективность гуматизированного калийного удобрения КалиГум и стандартного KCl

Вариант	Урожайность	Прибавка урожая	Масса 1000 зерен, г	Содержание в зерне, %			
	т/га			Азот	Фосфор	Калий	Белок
Контроль (без удобрений)	2,17	-	38,4	2,6	0,43	0,42	14,7
N 90	2,48	0,31	38,6	2,6	0,40	0,40	14,6
N90+K120 (KCl)	2,62	0,45	38,0	2,2	0,41	0,44	12,5
N90+K120 (КалиГум)	2,76	0,59	38,1	2,4	0,43	0,42	13,8
НСР <sub>05</sub>	0,21						

сравнению с традиционным хлористым калием. Содержание белка в зерне при внесении гуматизированного удобрения КалиГум было выше на 1.3% по сравнению с KCl. Самое высокое содержание белка наблюдалось на вариантах с минимальным урожаем – контроле и варианте с внесением азота (N60 + N30). Данные по структуре урожая на вариантах достоверно не различались. Масса 1000 зерен и масса зерна в колосе по вариантам были практически одинаковы и составляли 38.1-38.6 г и 0.7-0.8 г соответственно (табл. 7).

Таким образом, полевыми опытами достоверно доказана агрохимическая эффективность комплексных удобрений с добавками гуматов, определяемые по прибавке урожайности и содержанию белка в зерновых культурах. Для обеспечения этих результатов необходим правильный выбор гуминового препарата с высокой долей водорастворимых гуматов, его формы и места ввода в технологический процесс на финальных стадиях, это позволяет достигать относительно небольшого содержания гуматов (0.2 - 0.5% мас.) в гуматизированных удобрениях и обеспечивать равномерное распределение гуматов по грануле. При этом важным фактором является сохранение высокой доли водорастворимой формы гуматов в гуматизированных удобрениях.

Комплексные удобрения с гуматами повышают устойчивость сельскохозяйственных культур к негативным погодно-климатическим условиям в частности, к засухе, ухудшению структуры почв. Они могут быть рекомендованы как эффективные агрохимикаты в зонах рискованного земледелия, а также при использовании интенсивных методов земледелия со съемом нескольких урожаев в год для поддержания высокого плодородия почв в частности, в расширяющихся зонах с дефицитным водным балансом и аридных зонах. Высокая агрохимическая эффективность гуматизированной аммофоски (13:19:19) определяется комплексным действием минеральной и органической частей с усилением действия питательных компонентов, прежде всего фосфорного питания растений, улучшением обмена веществ между почвой и растениями, повышением стрессоустойчивости растений.

*Левин Борис Владимирович – кандидат технических наук, заместитель ген. директора, директор по технической политике АО «ФосАгро-Череповец»; e-mail: BLevin@phosagro.ru.*

*Озеров Сергей Александрович – начальник управле-*

*ния анализа рынка и планирования продаж АО «ФосАгро-Череповец»; e-mail: Sozerov@phosagro.ru.*

*Гармаш Григорий Александрович - заведующий лабораторией аналитических исследований ФГБНУ «Московский НИИСХ «Немчиновка», кандидат биологических наук; e-mail: niicrnz@mail.ru.*

*Гармаш Нина Юрьевна - ученый секретарь ФГБНУ «Московский НИИСХ «Немчиновка», доктор биологических наук; e-mail: niicrnz@mail.ru.*

*Латина Наталья Валерьевна - генеральный директор ООО «Биомир 2000», директор производства ГК Сахалинские Гумат; e-mail: green\_island@inbox.ru.*

## Литература

- Пол И. Фиксен Концепция повышения продуктивности сельскохозяйственных 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.
- Страпеняц 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: Гидрометиздат, 1985. – 144 с.
- Юркин С.Н., Пименов Е.А., Макаров Н.Б. Влияние почвенно-климатических условий и удобрений на расход основных элементов питания урожаем 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, Центральной Азии и Ближнему Востоку, кандидату биологических наук Ивановой С.Е. за помощь в подготовке статьи.*

# Поступление фосфора в поверхностный сток при весеннем снеготаянии на севере Великих равнин

Т. Дженсен, К. Тиссен, Э. Салвано, А. Калищук и Д.Н. Флатен

*Недавние исследования, проведенные в штатах Альберта и Манитоба (Канада), подтвердили, что на севере Великих равнин Северной Америки поверхностный сток при снеготаянии доминирует в общем годовом стоке с сельскохозяйственных водосборов. Для данного региона характерен относительно выровненный рельеф и засушливый климат с холодной зимой и теплым летом. Методы, используемые для оценки риска попадания фосфора в поверхностные водотоки и озера, в основном были разработаны для теплых и влажных климатических условий, а также расчлененного рельефа. В таких условиях доминирует дождевой сток, и нерастворимый взвешенный фосфор, попадающий в поверхностный сток в результате эрозии почвы, служит главным источником поступления фосфора с сельскохозяйственных земель. Однако на севере Великих равнин, особенно во время весеннего снеготаяния, фосфор в поверхностном стоке в основном представлен растворенными фосфатами поверхностного слоя почвы, растительных остатков и поверхностно внесенного навоза. Методы контроля эрозии почв, помогающие снизить потери фосфора с поверхностными водами в условиях теплого и влажного климата, могут быть менее эффективными на севере Великих равнин. Недавние исследования, проведенные в регионе, также позволили предположить, что содержание подвижного фосфора в почве тесно коррелирует с общими потерями фосфора с поверхностным стоком при снеготаянии. Как было показано для севера Великих равнин, наиболее эффективное снижение и дальнейший контроль потерь фосфора с поверхностным стоком возможны тогда, когда в почве подерживается не слишком высокое содержание подвижных форм фосфора*

**П**еремещение элементов питания с поверхностным стоком – это естественный процесс, протекающий в природной среде. В так называемый доколониционный период на севере Великих равнин элементы питания естественным образом перемещались с поверхностным стоком с целинных степных, лесостепных и лесных территорий. В поверхностном стоке элементы питания находятся главным образом в двух формах, а именно: растворимой и нерастворимой – взвешенной форме (удерживаются поверхностями почвенных частиц). Перемещение элементов с поверхностным стоком имеет большое значение для функционирования акваэкосистем, так как микроорганизмы, водные растения и животные именно за счет этого получают необходимые им элементы питания.

Однако в результате деятельности человека, включая сельское и лесное хозяйство, урбанизацию, промышленное производство, а также растущую рекреационную нагрузку, может повышаться поступление элементов питания с водосборов в водоемы. Усилению потерь элементов питания могут способствовать такие виды деятельности, как расчистка территорий, внесение в почву минеральных и органических удобрений, очищенных бытовых и промышленных сточных вод, а также, осадка сточных вод. Например, проведенное на протяжении 8-ми лет изучение качества поверхностных вод на 23-х сельскохозяйственных водосборах в провинции Альберта показало, что с повышением интенсификации сельскохозяйственного производства качество вод ухудшается, включая повышение концентраций азота и фосфора (Lorenz и др., 2008). Такой прирост наряду с продолжающимся поступлением элементов питания с целинных степных, лесостепных и лесных территорий способствует накоплению элементов питания в поверхностных водах.

Чрезмерно высокие концентрации фосфора и, в меньшей степени, азота могут ускорить рост водо-

рослей (так называемое «цветение» воды) и других водных растений, что ведет к эвтрофикации пресноводных водотоков, заболоченных водоемов ( стариц, устьев рек) и озер. Рост, последующее отмирание и разложение водорослей может приводить к снижению содержания кислорода (аноксии) в вышеуказанных поверхностных водоемах. Это, в свою очередь, оказывает угнетающее воздействие на водные растения и животный мир. В качестве примера можно привести ухудшение качества воды в озере Виннипег в канадской провинции Манитоба (10-м по площади пресноводном озере в мире). Водосборный бассейн озера Виннипег включает большую часть южных территорий провинций Альберта, Саскачеван и Манитоба. В последние годы в этом озере, как и в других



Сток талых вод на севере Великих равнин.

Фотография любезно предоставлена Департаментом развития сельского хозяйства и сельских территорий провинции Альберта

водных объектах на севере Великих равнин, неоднократно происходило интенсивное «цветение» воды, что связывают главным образом с избыточным поступлением фосфора с водосборной площади (Совет по контролю за состоянием озера Виннипег, 2006).

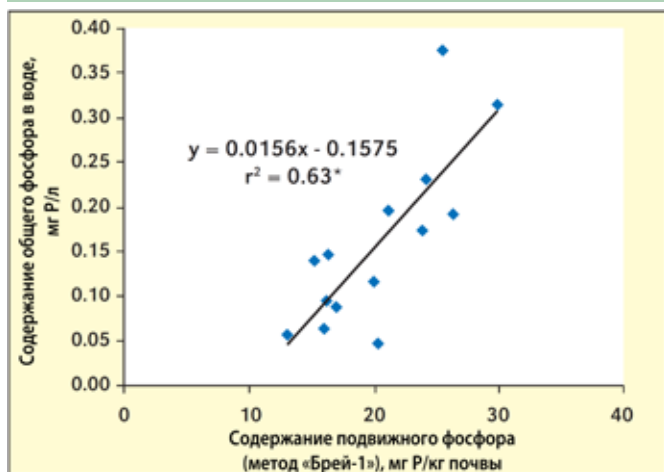
Практически на всей территории севера Великих равнин, для которой характерно регулярное выпадение осадков в виде снега, фосфор поступает в поверхностные воды в основном со стоком талых вод. В этом заключается отличие данного региона от других регионов мира с более теплыми и влажными климатическими условиями, где фосфор поступает в поверхностные воды, как правило, с дождевым стоком, возникающим в результате выпадения интенсивных осадков. Под влиянием стока дождевых вод часто происходит эрозия почв. В результате этого большая часть фосфора, попадающего в поверхностные воды, находится во взвешенной форме. В отличие от дождевого стока сток талых вод вызывает меньшую эрозию почв, так как талые воды обладают меньшей кинетической энергией по сравнению с дождевыми каплями и потоками и оказывают меньшее разрушающее воздействие на почву, которая часто еще находится в мерзлом состоянии. Большая часть фосфора в талых водах находится в растворенной, а не во взвешенной форме. Два исследования, недавно проведенные в провинциях Альберта и Манитоба, показали, что величина потерь фосфора в процессе снеготаяния сильно зависит от содержания подвижных форм фосфора в поверхностном слое почвы (Little и др., 2007; Salvano и др., 2009).

В провинции Альберта на протяжении 3-х лет проводился мониторинг поверхностного стока с 8-ми водосборов, занятых сельскохозяйственными полями (Little и др., 2007). Одна из целей исследования заключалась в том, чтобы установить, насколько содержание фосфора в поверхностном стоке (общий и растворенный – химически активный фосфор) зависит от содержания подвижного фосфора в почве и степени насыщения почвы фосфором. Данные по объему воды и содержанию элементов питания в образцах воды с водосборов, занятых сельскохозяйственными полями, получали во время весеннего снеготаяния и летних дождей. Для всех участков была характерна высокая величина потенциального смыва почвы. Все они одинаково обрабатывались и не испытывали влияния как со стороны животноводства, так и со стороны других факторов, не связанных с сельским хозяйством. Площадь исследуемых водосборов варьировала от 2 до 248 га. Большая часть поверхностного стока (более 90% по всем участкам) формировалась во время весеннего снеготаяния. В результате проведенного исследования была выявлена тесная линейная корреляционная связь между содержанием подвижного фосфора в почве и содержанием фосфора в поверхностном стоке. С таким фактором, как содержание подвижного фосфора в почве, связано 88% варьирования содержания общего фосфора в стоке с водосборов. При снижении содержания подвижного фосфора в почве после прекращения внесения навоза наблюдалось непосредственное снижение содержания фосфора в поверхностном стоке. В вышеуказанной работе были изучены различные схемы отбора

почвенных образцов. Однако было установлено, что содержание фосфора в поверхностном стоке можно хорошо спрогнозировать исходя из такого простого показателя, как среднее содержание подвижного фосфора во всех отобранных почвенных образцах. Корреляционные зависимости между содержанием фосфора в поверхностном стоке и содержанием подвижного фосфора в почве при разной глубине отбора почвенных образцов (0-2.5, 0-5.0 и 0-15.0 см) существенно не отличались. Следовательно, при прогнозировании содержания фосфора в поверхностном стоке с сельскохозяйственных земель в провинции Альберта может быть использована общепринятая в агрономии глубина отбора почвенных образцов (0-15 см). Несмотря на то, что для прогнозирования потерь фосфора с поверхностным стоком, а также в результате выщелачивания может применяться такой показатель, как степень насыщенности почвы фосфором, при анализе почвенных образцов в провинции Альберта стандартно определяется только содержание подвижного фосфора. Полученные результаты свидетельствуют о том, что для использования степени насыщенности почвы фосфором вместо содержания подвижного фосфора нет серьезных оснований.

В исследовании, проведенном Салвано с соавт. (Salvano и др., 2009) в провинции Манитоба, изучалась взаимосвязь между качеством воды – содержанием в ней фосфора и следующими тремя показателями, разработанными для оценки потерь данного элемента питания на региональном уровне: 1) «коэффициент потерь» фосфора по Бирру и Мулле (Birr and Mulla's P Index), разработанный для штата Миннесота (США); 2) «первичный индикатор» риска потерь фосфора (Preliminary P Risk Indicator), разработанный для провинции Манитоба (Канада); 3) «индикатор» риска загрязнения воды фосфором, разработанный для Канады – предварительный вариант (Canada's National Indicator of Risk of Water Contamination by Phosphorus). Валидация вышеуказанных подходов к оценке риска потерь фосфора была проведена с использованием данных многолетнего мониторинга качества воды, включая концентрацию общего фосфора, полученных для 14-ти водосборов в провинции Манитоба. В восточных областях вышеуказанной провинции водосборы имеют практически выровненный рельеф, а в западных – холмистый. Мониторинг качества воды, поступающей с водосборов, проводился на протяжении 11-ти лет (1989-1999 гг.). Данные по содержанию подвижного фосфора в почве по полям каждого водораздела за 2000-2003 гг. были предоставлены лабораторией «Бодикот тестинг групп» (Bodycote Testing Group). Полученные результаты сопоставлялись с дозами внесения фосфорных удобрений в рассматриваемом регионе, расчет которых проводился исходя из Сельскохозяйственной статистической базы данных за 2001 г. и потребления удобрений в Канаде.

Как отмечают Салвано с соавт. (Salvano и др., 2009), корреляция между величиной реальных потерь фосфора с поверхностным стоком и вышеуказанными показателями, используемыми для оценки риска потерь фосфора, была слабой и в целом незначимой. Слабая корреляция, по предположению авторов, свя-



**Рис. 1.** Зависимость между содержанием общего фосфора в поверхностных водах и содержанием подвижного фосфора в почвах (метод «Брей-1» - перевод с учетом соответствующих коэффициентов): усредненные данные для 14-ти водосборов в провинции Манитоба (Канада).

\* Статистически значимая корреляционная связь ( $p < 0.01$ ) [Адаптировано из: Salvano и др., 2009]

зана с тем, что в алгоритмах расчета данных показателей делается упор на оценке риска развития эрозии почвы. Однако доля взвешенного фосфора в поверхностном стоке в период весеннего снеготаяния была небольшой. Кроме того, сток талых вод преобладал над дождевым. Для сравнения, 63% варьирования ( $p < 0.01$ ) содержания общего фосфора в пробах воды было связано с таким фактором, как содержание подвижного фосфора в почве (рис. 1). Хотя три рассмотренных подхода к оценке риска потерь фосфора с поверхностным стоком учитывают в основном развитие эрозии почвы, содержание общего фосфора в поверхностном стоке сильнее всего зависит от содержания подвижных форм фосфора в почве. Таким образом, придание слишком большого значения эрозии почвы делает нерациональным использование рассматриваемых комплексных показателей для оценки риска потерь фосфора в условиях провинции Манитоба.

Крайне слабая связь между интенсивностью эрозионных процессов и содержанием общего фосфора в поверхностном стоке ставит вопрос о роли противоэрозионных мер в снижении фосфорной нагрузки с водосборов в регионе прерий в провинции Манитоба. Так, недавно проведенные исследования показали, что накопление фосфора в водных артериях провинции Манитоба либо незначительно уменьшалось, либо даже увеличивалось в результате применения таких традиционно эффективных противоэрозионных мероприятий, как создание буферных полос (Sheppard и др., 2006) и использование ресурсосберегающих технологий обработки почвы (Glozier и др., 2006). Таким образом, для определения риска потерь фосфора с поверхностным стоком и их количественной оценки в условиях практически выровненного рельефа прерий в южной части провинции Манитоба необходимо проводить исследования в другом направлении. Так, Салвано с соавт. (Salvano и др., 2009) предлагают разрабатывать и изучать рациональные приемы, направленные на уменьшение потерь фосфора при снеготаянии (главным образом в растворенной форме).

Продолжая работу Глозиера с соавт. (Glozier и др., 2006), Тиссен с соавт. (Tiessen и др., 2010) провели сравнение объемов поверхностного сезонного стока и потерь элементов питания с двух длительно существующих парных водосборов в южной части провинции Манитоба. Площадь первого водосбора составила 4.1 га. Здесь применялась традиционная система обработки почвы (первичная и вторичная обработка с последующим боронованием перед посевом, покрытие почвы растительными остатками после посева – менее 30%). Площадь второго водосбора составила 5.3 га. На территории этого водосбора применялась ресурсосберегающая система обработки почвы (прямой посев – нулевая обработка почвы с умеренным механическим воздействием, покрытие почвы растительными остатками предшественника после посева – более 30%) (рис. 2). Мониторинг состояния указанных парных водосборов проводился в 1993-2007 гг., а ресурсосберегающая технология обработки почвы на водосборе площадью 5.3 га была введена в 1997 г. Полученные данные были сгруппированы по трем периодам: 1) 4-летний «калибровочный» период (1993-1996 гг.); 2) 7-летний переходный период (1997-2003 гг.) и 3) 4-летний итоговый период. Изучаемые водосборы находятся в 150 км юго-западнее г. Виннипег (провинция Манитоба).

Закономерности колебаний годового поверхностного стока с изученных парных водосборов – это наличие пика в период весеннего снеготаяния (обычно в марте или апреле), а также многочисленных пиков с мая по ноябрь, связанных с выпадением дождей. Обычно период снеготаяния в этом районе канадских прерий длится несколько дней или даже недель, а дождевые стоки образуются менее 5-ти раз в год (Tiessen и др., 2010). Полученные данные были разделены для двух сезонных периодов – снеготаяния и выпадения дождей. Отбор почвенных образцов с двух водосборов проводился в 2004-2007 гг. ежегодно осенью после уборки (до традиционной обработки полей). Степень покрытия почвы растительными остатками предшественника определялась после проведения весенних полевых работ. С целью установления количества воды, поступающей с каждого водосбора, в конце зимы непосредственно перед началом весеннего снеготаяния измерялась глубина и плотность снежного покрова (табл. 1).

Тиссен с соавт. (Tiessen и др., 2010) отмечают, что за время проведения наблюдений доля осадков в виде



**Рис. 2.** Граница парных водосборов: традиционная обработка почвы (слева) и ресурсосберегающая (справа). Октябрь 2005 г.

**Таблица 1.** Степень покрытия растительными остатками и агрохимическая характеристика почв: усредненные данные за 2004-2007 гг. для парных водосборов в провинции Манитоба (Tiessen и др., 2010).

Водосбор	Степень покрытия почвы растительными остатками, %	Запасы воды в снеге, мм	Запасы N-NO <sub>3</sub> (0-15 см), кг/га	Подвижный фосфор по Олсену (0-15 см), мг Р/кг почвы	Гумус (0-15 см), %
Ресурсосберегающая обработка почвы	56 a*	8.13	6.5 b	19.1 a	3.8
Традиционная обработка почвы	19 b	7.87	8.3 a	13.1 b	3.5

\* Разные буквы указывают на достоверные различия (p<0.05).

снега составила всего 25% от общего годового количества осадков. Однако доля стока талых вод с обоих водосборов достигала 80-90% от общего годового стока. В данном исследовании концентрации растворенных элементов питания в стоке в среднем были выше в период снеготаяния, чем в периоды выпадения дождей. В то же время содержание твердых частиц, а также взвешенных форм элементов питания в стоке было выше в период выпадения дождей. Однако в связи с тем, что снеготаяние было основным гидрологическим процессом, большие потери элементов питания во взвешенной и растворенной формах происходили именно в период снеготаяния (рис. 3).

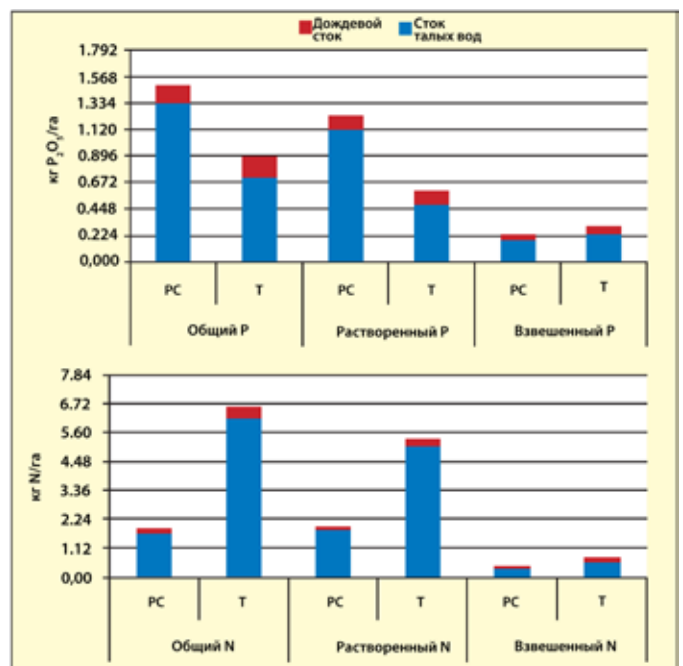
Следует также отметить, что как весной, так и летом в поступлении азота и фосфора с двух водосборов растворенная форма преобладала над взвешенной. Это было особенно очевидно в период весеннего снеготаяния, когда более 80% азота и фосфора поступало именно в растворенной форме (рис. 3).

Эффективность использования нулевой обработки почвы для уменьшения потерь твердых частиц была хорошо задокументирована (Baker и Lafen, 1983). Однако, как показали предыдущие исследования, при нулевой обработке почвы общие потери элементов питания снижаются в связи со значительным уменьшением объема стока и перемещаемой массы твердых частиц. В работе Тиссена с соавт. (Tiessen и др., 2010) объем стока талых вод был сопоставим при использовании ресурсосберегающей и традиционной системы обработки почвы, составив соответственно 726 и 729 м<sup>3</sup>/га. В то же время объем дождевого стока был в два раза меньше при использовании ресурсосберегающей системы обработки почвы по сравнению с традиционной (80 и 173 м<sup>3</sup>/га соответственно). Согласно полученным результатам, в условиях субгумидного климата южной части провинции Манитоба ресурсосберегающая обработка почвы может быть эффективным приемом для уменьшения дождевого стока. Сток же талых вод при этом не уменьшается. Одна из предполагаемых причин заключается в том, что в более влажной восточной части севера Великих равнин формируется мощный снежный покров. В этой связи запасы воды в снеге были практически одинаковыми как на водосборе с традиционной обработкой почвы, так и на водосборе с ресурсосберегающей обработкой (табл. 1). В более засушливой западной части севера Великих равнин выпадает меньше снега, и эпизодически зимой и ранней весной дует теплый ветер «Чинук» (Chinook). Здесь могут проявляться различия в толщине снежного покрова, в протекании процессов снеготаяния, а также в объемах поверхностного стока при использовании традиционной и ресурсосберегающей системы обработки почвы (Pomeroy и Gray,

1995). В регионах с небольшим количеством выпадающего снега предполагается максимальная эффективность снегозадержания в результате применения ресурсосберегающей технологии обработки почвы.

Интересно также отметить, что Тиссен с соавт. (Tiessen и др., 2010) выявили влияние систем обработки почвы на величину потерь азота и фосфора с поверхностным стоком (рис. 3). Переход на ресурсосберегающую технологию способствовал уменьшению потерь общего азота, но в то же время – увеличению потерь общего фосфора. Учитывая различия между двумя водосборами, существовавшие до перехода на ресурсосберегающую технологию обработки почвы на одном из них, а также сезонную и годовую вариабельность климатических и гидрологических параметров, было показано, что после перехода на ресурсосберегающую технологию потери фосфора во взвешенной форме уменьшились на 37%.

Однако после перехода на ресурсосберегающую технологию обработки почвы потери фосфора в растворенной форме увеличились на 36%. При этом снижение потерь фосфора во взвешенной форме никак не могло компенсировать увеличение его потерь в растворенной форме, поскольку с двух водосборов фосфор поступал в основном именно в растворенной форме. Данное увеличение потерь фосфора вызвано тем, что при использовании ресурсосберегающей



**Рис. 3.** Годовые потери разных форм фосфора и азота с поверхностным стоком при двух системах обработки почвы (средние данные за 4 года: 2004-2007 гг.).

Примечание: без учета имевшихся различий между водосборами, а также сезонной вариабельности климатических показателей.



технологии обработки почвы усиливаются потери фосфора в растворенной форме с поверхностным стоком талых вод. Вероятно, это происходит в результате дифференциации пахотного слоя почвы по содержанию подвижного фосфора (табл. 1), а также вымывания фосфора из растительных остатков и сорняков. Потери общего фосфора в данном исследовании (1.49 кг P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/га/год в среднем за 2004-2007 гг. с водосбора, где применялась ресурсосберегающая система обработки почвы), по-видимому, оказывают слабое влияние на состояние почвенного плодородия. Тем не менее, эти потери значимы для экологии, так как ускорение эвтрофикации озер в США связывают с фосфорной нагрузкой в диапазоне 2.24-5.60 кг P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/га/год (Sharpley и Rekolainen, 1997).

Такие агротехнологии, как ресурсосберегающие приемы обработки почвы, применяются для улучшения качества поверхностных вод за счет уменьшения выноса твердых частиц и, соответственно, потерь элементов питания во взвешенной форме с сельскохозяйственных полей и водосборов. В регионах с теплым и влажным климатом это может быть эффективно для уменьшения объемов твердого стока и потерь азота. Однако данные агротехнологии менее эффективны для снижения потерь фосфора в регионах с холодным и сухим климатом, где потери элементов питания происходят в основном в растворенной форме в процессе снеготаяния. В данных условиях может быть более эффективным применение таких систем земледелия, которые позволили бы уменьшить накопление элементов питания в поверхностном слое почвы и в растительных остатках. В работе Тиссена с соавт. (Tiessen и др., 2010) была предложена одна из возможных схем. По мнению авторов, осенняя обработка почвы перед промерзанием и выпадением снега могла бы иметь положительные последствия. Использование данного приема позволило бы заделать в почву часть растительных остатков и сорняков, а также внесенный навоз. В результате этого на поверхности почвы оставалось бы меньшее количество фосфора в водорастворимой форме, который подвержен вымыванию с полей с поверхностным стоком талых вод. Однако для проверки данной гипотезы необходимо проведение дальнейших исследований.

Все описанные выше исследования имеют практическую значимость. Они показали, что содержание подвижного фосфора в почве – это очень важный показатель при оценке потерь фосфора из почв на севере Великих равнин. В связи с этим предполагается, что потери фосфора с поверхностным стоком можно минимизировать, если не допускать накопления подвижного фосфора в почве до чрезмерно высокого уровня. Те же принципы могут быть применены и при регулировании потерь азота. Внесение азота в составе навоза и минеральных удобрений должно быть достаточным для удовлетворения потребностей сельскохозяйственных культур в данном элементе питания. Однако оно не должно быть избыточным, так как это может привести к высокому накоплению остаточного минерального азота (NO<sub>3</sub><sup>-</sup> и NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) в верхнем слое почвы. Для разработки рекомендаций по необходимым уровням содержания подвижного фосфора в почвах,

а также агротехнологий, с помощью которых можно было контролировать потери фосфора из почв в районах Северной Америки с холодным климатом требуется проведение дальнейших исследований.

*Д-р Дженсен – региональный директор Международного института питания растений по Северу Великих равнин, г. Саскатун, провинция Саскачеван; e-mail: tjensen@ipni.net.*

*Д-р Тиссен – бывший научный сотрудник Университета Манитобы, г. Виннипег, провинция Манитоба, старший программный координатор Международного исследовательского центра по вопросам развития (IDRC), г. Оттава, провинция Онтарио.*

*Д-р Салвано – специалист по вопросам изменения климата Департамента развития сельскохозяйственных, продовольственных и сельских инициатив провинции Манитоба, г. Виннипег, провинция Манитоба.*

*А. Калищук – руководитель отдела по вопросам качества воды Департамента развития сельского хозяйства и сельских территорий провинции Альберта, г. Летбридж, провинция Альберта.*

*Д-р Флатен – профессор кафедры почвоведения Университета Манитобы, г. Виннипег, провинция Манитоба.*

## Литература

- Baker, J.L. and J.M. Laflen. 1983. *J. Soil Water Conserv.* 38:186-193.
- Glozier, N.E., J.A. Elliott, B. Holliday, J. Yarotski, and B. Harker. 2006. *National Water Research Institute, Environment Canada, Saskatoon, SK, Canada.*
- Lake Winnipeg Stewardship Board. 2006. *Reducing Nutrient Loading to Lake Winnipeg and its Watershed – Our Collective Responsibility and Commitment to Action. Report to the Minister of Water Stewardship. December 2006. Lake Winnipeg Stewardship Board, Winnipeg, MB, Canada.*
- Little, J.L., S.C. Nolan, J.P. Casson, and B.M. Olson. 2007. *J. Environ. Qual.* 36:1289-1300.
- Lorenz, K., S. Depoe, and C. Phelan. 2008. *Assessment of Environmental Sustainability in Alberta's Agricultural Watersheds, Project. Vol. 3: AESA Water Quality Monitoring Project. Alberta Agriculture and Rural Development, Edmonton, Alberta, Canada.*
- Pomeroy, J.W. and D.M. Gray. 1995. *Snowcover accumulation, relocation and management. NHRI Science Rep. 7, Cat En36-513/7E. Minister of Supply and Services Canada, Ottawa, ON, Canada.*
- Salvano, E., D.N. Flaten, A.N. Rousseau, and R. Quilbe. 2009. *J. Environ. Qual.* 38:2096-2105.
- Sharpley, A.N. and S. Rekolainen. 1997. *Phosphorus in agriculture and its environmental implications. p. 1-53. In H. Tunney, O.T. Carton, P.C. Brookes, and A.E. Johnston (ed.) Phosphorus Loss from Soil to Water. Center for Agriculture and Biosciences International, New York.*
- Sheppard, S.C., M.I. Sheppard, J. Long, B. Sanipelli, and J. Tait. 2006. *Can. J. Soil Sci.* 86:871-884.
- Tiessen, K.H.D., J.A. Elliot, J. Yartoski, D.A. Lobb, D.N. Flaten, and N.E. Glozier. 2010. *J. Environ. Qual.* 39:964-980.

*Редактирование перевода с английского: В.В. Носов.*

# Признаки дефицита фосфора у сельскохозяйственных культур



Недостаток фосфора у капусты белокачанной.

Капуста выращивалась на кислой почве с низким содержанием подвижного фосфора



Недостаток фосфора у хлопчатника

Старые листья приобретают окраску от темно-фиолетовой до красной, но при сильном дефиците фосфора указанные признаки распространяются и на молодые листья. Замедляется скорость роста растений, задерживается созревание.



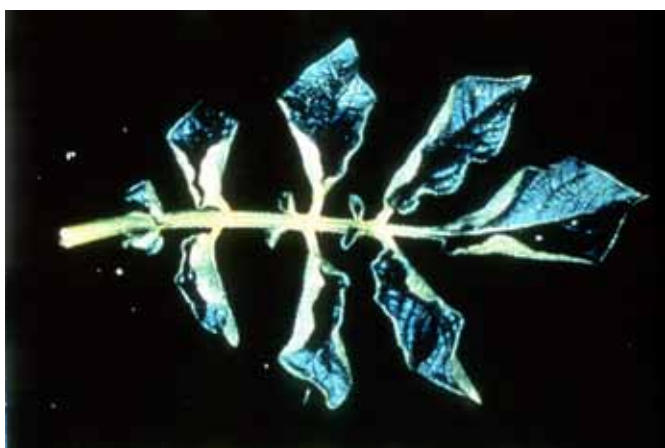
Недостаток фосфора у сорго

Фиолетовая окраска нижних листьев у растения сорго, испытывающего недостаток фосфора.



Недостаток фосфора у капусты белокачанной

Оптимизация питания фосфором способствовала росту биомассы растений, повышению урожайности кочанов и улучшению их окраски.



Недостаток фосфора у винограда (сорт каберне Совиньон)



Недостаток фосфора у рапса



Недостаток фосфора у люцерны.

Мелкий лист растения при дефиците фосфора и лист здорового растения (справа)



Недостаток фосфора у ячменя.

Фиолетовая окраска листьев меняется на темно-желтую или оранжево-красную



Недостаток фосфора у винограда (сорт каберне Совиньон)



Недостаток фосфора у картофеля (сорт Рассет Бербанк)



Недостаток фосфора у кукурузы.

Кукуруза посеяна 12 апреля; фотография сделана 16 июня в фазу 9-ти листьев. Содержание фосфора в растениях 22 мая составило 0.12%



Недостаток фосфора у озимой пшеницы

Пшеница после длительного возделываемой и плохо удобрявшейся люцерны. Ослабленный рост растений вызван пропуском стартового удобрения. Содержание подвижного фосфора в почве под рядами с плохо развитыми растениями составило 3 мг P/кг, а под рядами с хорошо развитыми растениями - 13 мг P/кг.



Недостаток фосфора у кукурузы

Молодые листья приобретают фиолетовую окраску, а початки либо не образуются, либо формируются недоразвитыми. Вариант опыта - без внесения NPK. Содержание подвижного фосфора в почве - 8 мг/кг почвы. В течение 45 дней наблюдались продолжительные дожди. Низкое содержание органического вещества в почве - результат частичного удаления верхнего горизонта почвы при выравнивании поля.



Недостаток фосфора у рапса

Прямой посев по стерне люцерны. Люцерна истощила запасы доступного фосфора в почве. У фермера при последних проходах посевного агрегата закончилось фосфорное удобрение, вносившееся вместе с семенами. Дефицит фосфора вызвал задержку роста растений.



Недостаток фосфора у сои.

Сравниваются две делянки опыта: вариант с внесением 120 кг P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/га (слева) и вариант без внесения фосфорных удобрений (справа). При дефиците фосфора наблюдался замедленный рост растений сои – высота растений и размер листьев был меньше.



Недостаток фосфора у пшеницы



Недостаток фосфора у ячменя.

Темно-фиолетовое окрашивание начинается с верхушек и краев листьев и прогрессирует вниз, охватывая всю площадь листьев.



Недостаток фосфора у риса

Верхушки старых листьев приобретали фиолетовую окраску, которая затем распространялась к основанию листьев. Запасы подвижного фосфора в почве низкие (6 кг P/га)



Недостаток фосфора у пшеницы

Ослабленный рост и появление красновато-фиолетового оттенка на старых листьях у растения пшеницы, испытывающего недостаток фосфора.

## Компании - члены IPNI

	Agrium, Inc.		Shell Sulphur Solution
	Arab Potash Company		Simplot
	Белорусская калийная компания		Sinofert Holdings Limited
	BHP Billiton		SQM
	CF Industries Holdings, Inc.		Toros Tarim
	Compass Minerals Speciality Fertilizers		ОАО «ОХК «Уралхим»
	International Raw Materials Ltd.		ОАО «Уралкалий»
	LUXI Fertilizer Industry Group		Arab Fertilizer Association (AFA)
	K+S KALI GmbH		ANDA - Associação Nacional para Difusão de Adubos
	The Mosaic Company		Canadian Fertilizer Institute (CFI)
	OCP S.A.		The Fertilizer Association of India
	ОАО «ФосАгро»		The Fertilizer Institute (TFI)
	PotashCorp		International Fertilizer Industry Association (IFA)
	Qatar Fertilizer Company		International Potash Institute (IPI)



МЕЖДУНАРОДНЫЙ  
ПИТАНИЯ РАСТЕНИЙ  
ИНСТИТУТ

Восточная Европа и Центральная Азия

125466 Российская Федерация, Москва, ул. Ландышевая, д.12, пом. 17а  
Тел./Факс: 8 (495) 580 64 14  
<http://eeca-ru.ipni.net>  
<http://www.ipni.net>  
[ipni-eeca@ipni.net](mailto:ipni-eeca@ipni.net)

*Выше урожай и качество, сохраняя окружающую среду...  
С помощью науки*