

# Сбалансированное внесение калия под зерновые культуры с помощью «Экспертной программы расчета доз удобрений» (Nutrient Expert®): Повышение урожайности и рентабельности, снижение эмиссии парниковых газов

Сударшан Кумар Датта, Каушик Маджумдар и Т. Сатьянараяна

*Недостаточное и несбалансированное применение минеральных удобрений, особенно калийных, при выращивании зерновых культур в Индии ведет к снижению их продуктивности и, соответственно, валовых сборов зерна в стране. Одна из основных причин сложившейся ситуации – отсутствие алгоритма рекомендаций, приемлемого для мелких фермеров с ограниченными техническими ресурсами. «Экспертная программа расчета доз удобрений» (Nutrient Expert®) позволяет выработать рекомендации по сбалансированному применению удобрений в зависимости от планируемого уровня урожайности, а также обеспеченности фермеров техническими ресурсами. Рекомендации по применению минеральных удобрений, полученные с помощью модели Nutrient Expert®, позволяют фермерам вносить в почву необходимое количество калия и других элементов питания. Это способствует росту продуктивности зерновых культур, повышению рентабельности растениеводства, а также снижению эмиссии парниковых газов из сельскохозяйственных почв.*

За последние четыре десятилетия применение минеральных удобрений в Индии значительно выросло. В период между 1969-1970 гг. и 2011-2012 гг. ежегодное потребление NPK (N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> и K<sub>2</sub>O) выросло примерно в 12 раз – с 2 до 25.5 млн т (FAI, 2014). Однако при этом наблюдается несбалансированное соотношение между тремя элементами питания. Так, на долю азота приходится порядка 66% от общего потребления NPK в стране (Majumdar и др., 2014), а доля P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> и K<sub>2</sub>O составляет 26% и 8% соответственно (FAI, 2014). Это вызывает серьезную озабоченность, особенно в регионах с преобладанием зерновых севооборотов, где вынос калия из почвы растениями равен или превышает вынос азота. Недостаточное применение калийных удобрений ведет к отрицательному балансу калия, что вызывает истощение почвенных резервов калия (Dutta и др., 2013) и оказывает негативное влияние на продуктивность сельскохозяйственных культур.

Несбалансированное применение минеральных удобрений, а точнее низкие дозы внесения калия, – одна из главных причин снижающейся отзывчивости растений на внесение остальных элементов питания и, соответственно, замедления роста продуктивности сельскохозяйственных культур в Индии. Накоплено достаточное количество научно-обоснованных данных, свидетельствующих о положительной роли калия в повышении урожайности сельскохозяйственных культур. Результаты большого количества полевых опытов, проведенных на полях фермеров на Индо-Гангской равнине, свидетельствуют о том, что при невнесении калийных удобрений урожайность зерна риса, пшеницы и кукурузы снижается в среднем на 621, 723 и 699 кг/га соответственно (Majumdar и др., 2012). Значительные прибавки урожайности зерна от внесения калия в рисово-пшеничных севооборотах (до 2 т/га) были также получены в полевых опытах, проведенных на Индо-Гангской равнине (Majumdar и др., 2014).

Несмотря на доказанные экономические, социальные и экологические преимущества сбалансированного применения минеральных удобрений, производители зерна в Индии все еще применяют недостаточные количества калийных удобрений. Это может быть связано с отсутствием максимально универсального алгоритма рекомендаций, который был бы приемлем для расчета доз удобрений мелкими фермерами, а также мог бы использоваться ведущими профессиональными консультантами.

В Индии мелкие фермеры обрабатывают небольшие земельные участки, и применяемые агротехнологии сильно зависят от уровня образования фермеров и их обеспеченности техническими ресурсами. В результате использования разных агротехнологических решений наблюдается сильное пространственно-временное варьирование обеспеченности почв фермерских полей элементами питания растений. В идеале система применения удобрений в таких мелких хозяйствах должна выстраиваться и корректироваться с учетом местных почвенно-климатических условий для того, чтобы избежать внесения избытка элементов питания, а также их недовнесения в почву. Исходя из существующей практики применения минеральных удобрений в Индии, используемые фермерами подходы в целом реализуются без интегрирования информации о поступлении элементов питания из почвы и потребностях сельскохозяйственных культур в элементах питания. В свою очередь, рекомендации по применению удобрений для каждого штата страны основаны на результатах полевых опытов по изучению отзывчивости сельскохозяйственных культур на внесение отдельных элементов питания, однако эти результаты экстраполируются на большие территории. При этом пространственно-временное варьирование обеспеченности почв фермерских полей элементами питания растений не принимается во внимание. И в фермерской практике применения

удобрений, и в рекомендуемых системах применения удобрений для штатов Индии внесению в почву калия уделяется мало внимания, что ведет к экономическим потерям из-за недобора урожая (Singh и др., 2013, 2014).

Системы применения удобрений, разработанные с учетом конкретных почвенно-климатических условий, успешно использовались исследователями для определения сбалансированных доз элементов питания и, соответственно, достижения высокого уровня урожайности зерновых культур на полях фермеров (Witt и др., 1999; Setiyono и др., 2010; Chuan и др., 2013). Однако широкомасштабное внедрение данных подходов в фермерских хозяйствах долгое время оставалось проблематичным. Международным институтом питания растений (IPNI) было установлено, что основное препятствие для использования вышеуказанных подходов в производственных условиях – это отсутствие практичного алгоритма, способного помочь и фермерам, и консультантам быстро рассчитать дозы удобрений для конкретного поля. В связи с этим институтом была проведена работа, в которой ранее полученные данные по отзывчивости сельскохозяйственных культур на отдельные элементы питания были дополнены современными опытными данными, что позволило разработать систему поддержки принятия решений по применению удобрений. Она проста в использовании и может функционировать как при наличии данных почвенных анализов, так и при их отсутствии. В проведении вышеуказанной работы Международному институту питания растений оказывали поддержку Международная ассоциация производителей удобрений (IFA) и Международный центр по улучшению кукурузы и пшеницы (CIMMYT), а также большое количество национальных партнеров, включая национальные научно-исследовательские и консультационные институты, сельскохозяйственные университеты, государственные департаменты сельского хозяйства, компании-производители минеральных удобрений и семян и неправительственные организации. В результате проведенной работы была разработана динамическая модель для расчета доз удобрений – программа Nutrient Expert®. С ее помощью для конкретного фермерского хозяйства можно рассчитать дозы удобрений под основные зерновые культуры – кукурузу, пшеницу и рис – на основе подходов, учитывающих местные почвенно-климатические условия (Ramprolino и др., 2012). При выработке рекомендаций по сбалансированному применению удобрений данной моделью анализируется информация по условиям выращивания сельскохозяйственных культур, включая географическое положение, систему земледелия, а также обеспеченность фермера техническими ресурсами. Программа Nutrient Expert® выработывает рекомендации по применению минеральных удобрений исходя из поступления конкретного элемента питания из почвы, а также потребностей сельскохозяйственных культур в данном элементе питания для достижения запланированного уровня урожайности, приемлемого для конкретного фермера. Использование рекомендаций по сбалансированному применению удобрений, по-

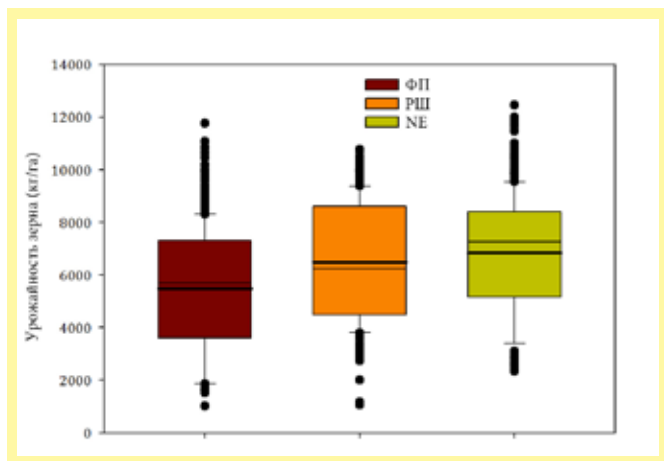
лученных с помощью программы Nutrient Expert® с учетом местных почвенно-климатических условий, способствует росту урожайности зерновых культур, повышению эффективности использования элементов питания из удобрений растениями и, соответственно, более экономному применению удобрений. В результате этого улучшаются экономические показатели растениеводства, а также устраняются негативные последствия для окружающей среды.

Изначально планировалась разработка модели Nutrient Expert® для зерновых культур, поскольку более ¾ обрабатываемых площадей в Индии занято тремя главными зерновыми культурами – рисом, пшеницей и кукурузой. Под данные культуры вносятся основная часть удобрений в стране. К настоящему времени разработана модель Nutrient Expert® для пшеницы и гибридной кукурузы. Модель прошла валидацию и уже доступна для всеобщего использования. Nutrient Expert® для риса сейчас проходит валидацию в национальном масштабе с участием государственных научно-исследовательских и консультационных организаций. В ближайшем будущем планируется разработать соответствующие модели и для следующих трех культур: хлопчатник, сахарный тростник и соя.

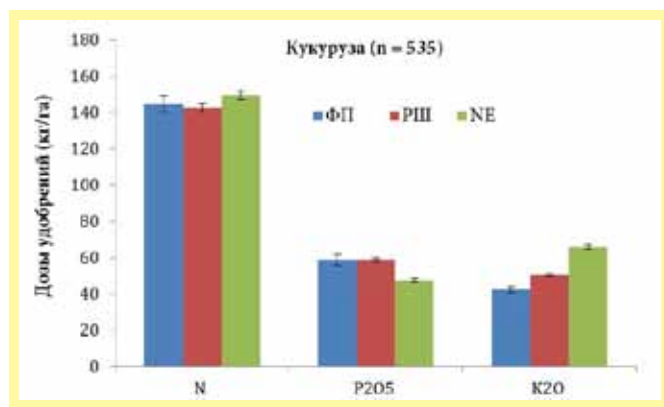
Программное обеспечение Nutrient Expert® работает на базе MS Access и состоит из 4-х или 5-ти рабочих модулей в зависимости от сельскохозяйственной культуры, для которой оно предназначено. Например, приложение для кукурузы включает 5 модулей, а для пшеницы и риса – 4 модуля. В процессе работы с данными модулями фермеры отвечают на простые вопросы. Исходя из полученных ответов, модель Nutrient Expert® оценивает поступление элементов питания из почвы (с учетом их возврата в почву с растительными остатками, внесения с органическими удобрениями, а также накопления азота бобовыми предшественниками) и отзывчивость сельскохозяйственных культур на внесение N, P и K. В конечном итоге, исходя из запланированного уровня урожайности, вырабатываются наиболее приемлемые рекомендации по применению минеральных удобрений. В данной динамической модели предусмотрена опция, позволяющая снизить запланированный уровень урожайности в зависимости от обеспеченности фермера материально-техническими ресурсами. Соответственно, рекомендации прорабатываются с учетом данной корректировки. Дозы элементов питания для конкретного поля пересчитываются на физический вес минеральных удобрений, выбранных из списка с учетом наличия у дистрибьюторов. В конечном итоге фермер получает рекомендации, соответствующие концепции «4-х правил» (4R) применения удобрений (подразумевает оптимизацию форм, доз, сроков и способов внесения удобрений). Предусмотрена также сравнительная экономическая оценка для рекомендуемой системы применения удобрений, выработанной моделью с учетом конкретных почвенно-климатических условий, и для системы применения удобрений, практикуемой фермером. Это позволяет оценить прибыльность при использовании полученных рекомендаций.

Для валидации модели Nutrient Expert® для кукурузы и пшеницы в основных зонах возделывания данных зерновых культур в Индии была проведена серия полевых опытов. При этом рекомендации, полученные с помощью вышеуказанной модели, сравнивались с имеющимися региональными рекомендациями по применению удобрений в каждом конкретном штате страны, а также с практикуемой фермерами системой применения удобрений. Схема опытов, таким образом, включала три варианта с расположением опытных делянок в один ряд на каждом поле (размер делянок  $\geq 100 \text{ м}^2$ ).

Согласно результатам 535-ти полевых опытов с кукурузой, проведенных в разных регионах Индии, рекомендации по применению минеральных удобрений, разработанные с помощью модели Nutrient Expert®-Maize, способствовали значительному повышению урожайности зерна по сравнению с фермерской практикой (ФП) и рекомендациями для штатов страны (РШ) [рис. 1]. В соответствии с расчетами по вышеуказанной модели необходимо было вносить несколько более высокие дозы азота и более низкие дозы фосфора по сравнению с рекомендациями для штатов, а также фермерской практикой. Однако дозы калия, рассчитанные с помощью модели Nutrient Expert®-Maize, значительно превышали дозы калия,



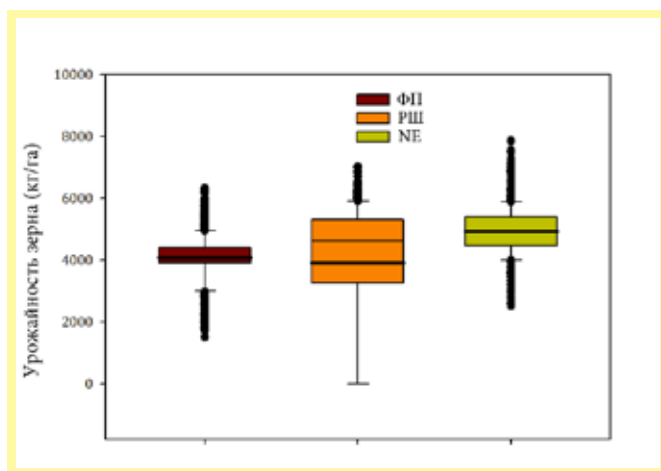
**Рис. 1.** Средняя урожайность зерна кукурузы в полевых опытах по валидации модели Nutrient Expert®-Maize в Индии (n=535): ФП – фермерская практика применения удобрений; РШ – рекомендации по применению удобрений для штатов страны; NE – модель Nutrient Expert®-Maize.



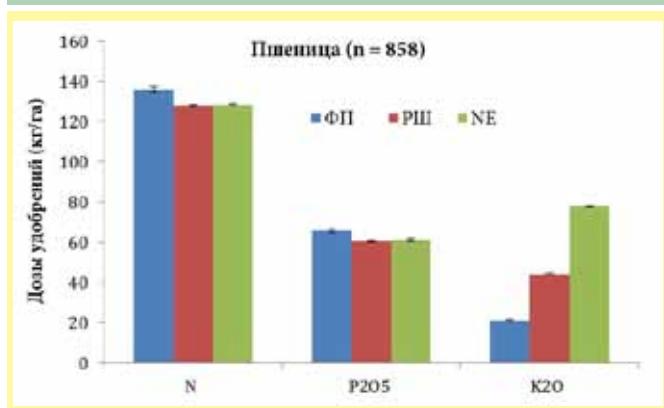
**Рис. 2.** Средние дозы внесения минеральных удобрений под кукурузу в полевых опытах по валидации модели Nutrient Expert®-Maize (обозначения, как на рис. 1).

вносимые фермерами (в среднем на  $24 \text{ кг K}_2\text{O/га}$ ), а также рекомендуемые по штатам Индии (в среднем на  $15 \text{ кг K}_2\text{O/га}$ ). Данная модель вырабатывает рекомендации по дозам минеральных удобрений с учетом планируемого уровня урожайности. Кроме того, учитывается баланс элементов питания в севообороте, исходя из применения удобрений (минеральные + органические) под предшествующую культуру и величины ее урожайности. Согласно проведенным оценкам, дозы калия под кукурузу недостаточны как в практикуемых фермерами, так и в рекомендуемых по штатам страны системах применения удобрений. Следует отметить, что у большей части из проведенных 535-ти опытов с кукурузой дозы калия, рассчитанные с помощью модели, были выше доз калия, вносимых фермерами, а также рекомендуемых по штатам страны. Полученные результаты свидетельствуют о недооценке применения калийных удобрений даже под такую калиелюбивую культуру, как кукуруза, которая выносит большое количество калия из почвы. Недовнесение калийных удобрений признано одной из основных причин снижения урожайности зерна кукурузы в основных зонах возделывания этой культуры в Бангладеш (Timsina и др., 2013).

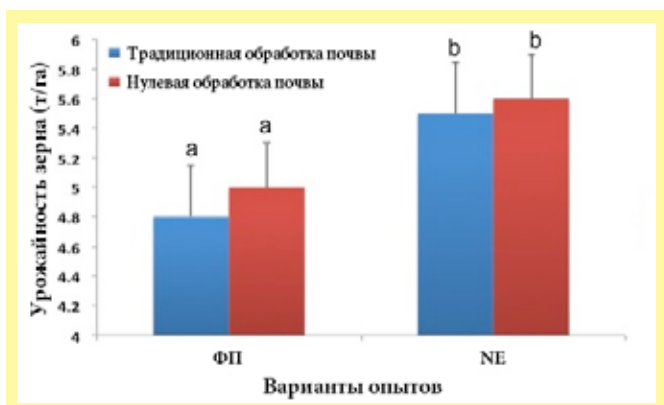
Средняя урожайность зерна пшеницы в полевых опытах, проведенных на полях фермеров (n = 858), была максимальной при внесении доз минеральных удобрений, рассчитанных с помощью модели Nutrient Expert®-Wheat ( $4927 \text{ кг/га}$ ), по сравнению с фермерской практикой ( $4079 \text{ кг/га}$ ) и рекомендованной системой применения удобрений по штатам страны ( $3897 \text{ кг/га}$ ) [рис. 3]. На рис. 4 четко показана разница в дозах калийных удобрений под пшеницу между тремя протестированными системами применения удобрений. В проведенных опытах дозы азота и фосфора, рассчитанные с помощью вышеуказанной модели, были либо близки, либо меньше доз азота и фосфора, соответствующих фермерской практике и рекомендациям для штатов. Однако расчеты по модели Nutrient Expert®-Wheat выявили необходимость дополнительного внесения калия –  $57$  и  $34 \text{ кг K}_2\text{O/га}$  по сравнению с фермерской практикой и рекомендациями для шта-



**Рис. 3.** Средняя урожайность зерна пшеницы в полевых опытах по валидации модели Nutrient Expert®-Wheat в Индии (n=858): ФП – фермерская практика применения удобрений; РШ – рекомендации по применению удобрений для штатов страны; NE – модель Nutrient Expert®-Wheat.



**Рис. 4.** Средние дозы внесения минеральных удобрений под пшеницу в полевых опытах по валидации модели Nutrient Expert®-Wheat (обозначения, как на рис. 3).



**Рис. 5.** Средняя урожайность зерна пшеницы при разных системах применения удобрений и способах обработки почвы. Разные буквы указывают на статистически достоверные различия ( $P \leq 0.01$ ) [обозначения, как на рис. 3].

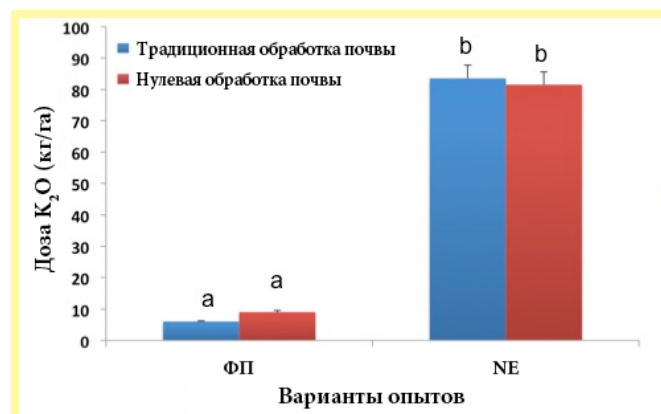
тов соответственно. Это свидетельствует о сильно несбалансированном применении удобрений под пшеницу в фермерских хозяйствах. Согласно полученным результатам, в вариантах со сбалансированным применением удобрений, включая внесение необходимых доз калия, урожайность зерна повышалась в среднем примерно на 1 т/га. Большая часть полевых опытов с пшеницей была проведена на Загангской равнине Индии – в штатах Пенджаб и Харьяна. Фермеры в этих штатах обычно вносят недостаточные дозы калийных удобрений, поскольку почвы данного региона традиционно считаются богатыми калием из-за преобладания минералов группы иллита в составе илистой фракции, а также существенного поступления калия с поливными водами. Однако результаты наших исследований четко свидетельствуют о получении значительной прибавки урожайности зерна пшеницы за счет сбалансированного применения удобрений, включая внесение необходимых доз калия.

Датта с соавт. (Dutta и др., 2014) приводят результаты полевых опытов по оценке пригодности модели Nutrient Expert®-Wheat для агротехнологий выращивания пшеницы, использующих как традиционную, так и нулевую обработку почвы. Данные опыты проводились на полях фермеров ( $n = 109$ ). Выращивание озимой пшеницы при нулевой обработке почвы набирает популярность, поскольку при этом сокращается промежуток времени между уборкой риса, выращи-

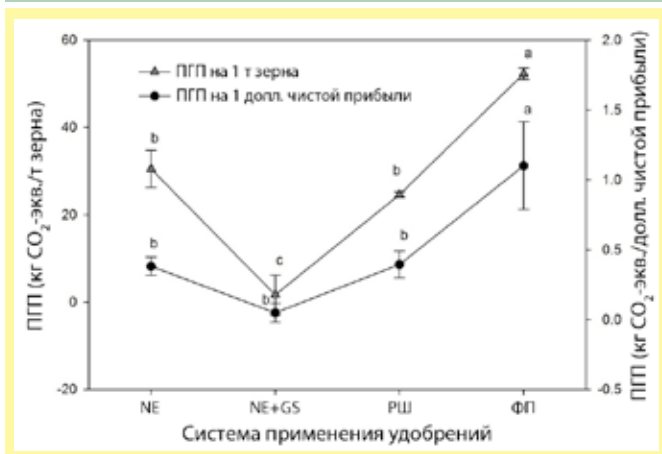
ваемого в дождливый сезон, и посевом пшеницы. Достижения в сельскохозяйственном машиностроении позволяют мелким фермерам проводить прямой посев пшеницы по стерне предшественника – риса. Вышеуказанное исследование включало 65 полевых опытов, проведенных на полях фермеров с традиционной обработкой почвы, и 44 опыта с нулевой обработкой. При этом фермерская практика применения удобрений сравнивалась с рекомендациями, выработанными с использованием модели Nutrient Expert®-Wheat. Полученные результаты свидетельствуют о статистически значимом ( $P \leq 0.01$ ) повышении урожайности пшеницы при внесении доз минеральных удобрений, определенных с помощью вышеуказанной модели, по сравнению с фермерской практикой (рис. 5). Дозы калийных удобрений при расчете по модели Nutrient Expert®-Wheat были значительно выше по сравнению с фермерской практикой как при традиционной системе обработки почвы, так и при нулевой (рис. 6). При применении минеральных удобрений согласно расчетам по модели отношение полученной прибыли к затратам было в 4 раза выше, чем при фермерской практике применения удобрений (Dutta и др., 2014).

Использование рекомендаций, полученных с помощью модели Nutrient Expert®-Wheat, способствует не только росту урожайности зерновых культур и повышению рентабельности их выращивания, но и снижению эмиссии парниковых газов из сельскохозяйственных почв Северо-Запада Индии. Как показало недавно проведенное исследование (Sarkota и др., 2014), при использовании рекомендаций по применению удобрений под пшеницу, выработанных с помощью данной модели, уменьшается эмиссия парниковых газов из почвы. Это ведет к снижению потенциала глобального потепления (ПГП<sup>1</sup>). Согласно проведенным оценкам, ПГП, выраженный в кг  $CO_2$ -экв. на единицу полученного урожая, а также на 1 амер. доллар чистой прибыли, статистически значимо ( $P < 0.01$ ) изменялся в зависимости от системы применения удобрений. Для фермерской практики была получена максимальная величина ПГП при расчете на 1 т зерна. Система применения удобрений, основанная

<sup>1</sup> ПГП – потенциал глобального потепления



**Рис. 6.** Средние дозы внесения калийных удобрений под пшеницу при разных системах применения удобрений и способах обработки почвы. Разные буквы указывают на статистически достоверные различия ( $P \leq 0.05$ ) [обозначения, как на рис. 3].



**Рис. 7.** Потенциал глобального потепления (ППП), выраженный в кг CO<sub>2</sub>-экв. на 1 т урожая зерна пшеницы и на 1 амер. доллар чистой прибыли, в зависимости от системы применения удобрений при нулевой обработке почвы в штате Харьяна: NE – модель Nutrient Expert®-Wheat; NE+GS – модель Nutrient Expert®-Wheat в комбинации с использованием оптического сенсора Green Seeker; ПШ – рекомендации по применению удобрений для штата; ФП – фермерская практика применения удобрений.

на модели Nutrient Expert®-Wheat в комбинации с использованием оптического сенсора Green Seeker для определения доз азотной подкормки, характеризовалась минимальной величиной ППП (рис. 7). При использовании вышеуказанной комбинации (Nutrient Expert®-Wheat + Green Seeker) за счет проведения азотных подкормок повышалась эффективность использования азота из удобрений растениями. При этом дозы и количество азотных подкормок соответствовали физиологическим потребностям растений. По-видимому, это способствовало снижению содержания остаточного нитратного азота удобрений в почвенном профиле и, таким образом, минимизировало газообразные потери азота из почвы в виде N<sub>2</sub>O. Кроме того, достаточное внесение в почву калия в соответствии с расчетами по модели повышало эффективность использования других элементов питания из удобрений растениями, а особенно азота. Это улучшало усвоение азота растениями и, соответственно, снижало его газообразные потери из почвы.

В целом, использование рекомендаций по применению минеральных удобрений, разработанных с помощью модели Nutrient Expert®, помогает фермерам повысить урожайность зерновых культур, а также улучшить экономическую эффективность производства зерна в результате сбалансированного применения удобрений с учетом местных почвенно-климатических условий. Результаты полевых опытов, проведенных на полях фермеров, четко свидетельствуют о важной роли калия в повышении продуктивности зерновых культур в Индии. Сбалансированное применение удобрений, включая внесение необходимых доз калия, способствовало повышению урожайности зерновых культур. Кроме того, при вышеуказанной системе применения удобрений замедляется истощение почвенных резервов калия. Следовательно, широкомасштабное внедрение программы

Nutrient Expert® может способствовать сбалансированному применению удобрений в мелких фермерских хозяйствах Индии и, соответственно, достижению устойчивой продовольственной безопасности.

## Литература

- Chuan, L., He, P., Jin, J., Li, S., Grant, C., Xu, X., Qiu, S., Zhao, S. and Zhou, W. (2013) Estimating nutrient uptake requirements for wheat in China. *Field Crops Research* 146, 96–104.
- Dutta, S. K., Majumdar, K., Khurana, H. S., Sulewski, G., Govil, V., Satyanarayana, T., and Johnston, A. 2013. Potassium budgets: Mapping soil depletion across different states of India. *Better Crops – South Asia* 7: 28–31.
- Dutta, S. K., Majumdar, K., Shahi, V., Kumar, A., Kumar, V., Gupta, N., Satyanarayana, T., Jat, M. L., Pampolino, M. and Johnston, A. 2014. Nutrient Expert® – Wheat: A Tool for increasing crop yields and farm profit. *Better Crops – South Asia* 8: 11–13.
- FAI. 2014. *Fertiliser Statistics*. The Fertiliser Association of India, New Delhi, India.
- Majumdar, K., Dey, P. and Tewatia, R. K. 2014. Current nutrient management approaches: Issues and strategies. *Indian Journal of Fertilizer* 10(5): 14–27.
- Majumdar, K., Kumar, A., Shahi, V., Satyanarayana, T., Jat, M. L., Kumar, D., Pampolino, M., Gupta, N., Singh, V., Dwivedi, B. S., Meena, M. C., Singh, V. K., Kamboj, B. R., Sidhu, H. S. and Johnston, A. 2012. Economics of potassium fertiliser application in rice, wheat and maize grown in the Indo-Gangetic Plains. *Indian Journal of Fertilizer* 8(5): 44–53.
- Pampolino, M. F., Witt, C., Pasuquin, J. M., Johnston, A., Fisher, M. J. 2012. Development approach and evaluation of the Nutrient Expert software for nutrient management in cereal crops. *Computer and Electronics in Agriculture* 88: 103–110.
- Sapkota, T. B., Majumdar, K., Jat, M. L., Kumar, A., Bishnoi, D. K., McDonald, A. J. and Pampolino, M. 2014. Precision nutrient management in conservation agriculture based wheat production of Northwest India: Profitability, nutrient use efficiency and environmental footprint. *Field Crops Research* 155: 233–244.
- Setiyono, T. D., Walters, D. T., Cassman, K.G., Witt, C., Dobermann, A. (2010) Estimating the nutrient uptake requirements of maize. *Field Crops Research*, 118 (2): 158–168
- Singh, V. K., Dwivedi, B. S., Buresh, R. J., Jat, M. L., Majumdar, K., Gangwar, B., Govil, V. and Singh, S. K. (2013) Potassium fertilization in rice–wheat system across Northern India: Crop performance and soil nutrients. *Agronomy Journal* 105, 471–481.
- Singh, V. K., Dwivedi, B. S., Tiwari, K.N., Majumdar, K., Rani, M., Singh, S. K. and J. Timsina (2014) Optimizing nutrient management strategies for rice–wheat system in the Indo-Gangetic Plains of India and adjacent region for higher productivity, nutrient use efficiency and profits. *Field Crops Research* 164, 30–44.
- Timsina, J., Singh V. K., Majumdar K. J. (2013) Potassium management in rice–maize systems in South Asia. *Plant Nutrition and Soil Science* 176, 317–330.
- Witt, C., Dobermann, A., Abdurachman, S., Gines, H. C., Wang, G. H., Nagarajan, R., Satawathananont, S., Son, T. T., Tan, P. S., Tiem, L. V., Simbahan, G. C. and Olk, D. C. (1999) Internal nutrient efficiencies of irrigated lowland rice in tropical and subtropical Asia. *Field Crops Research* 63, 113–138.

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