

УДК 631.81:633.11“321”(571.1)

МЕТОДЫ АНАЛИЗА И ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ УДОБРЕНИЯ ЯРОВОЙ ПШЕНИЦЫ ДЛЯ ФОРМАЛИЗАЦИИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В УСЛОВИЯХ ЗАУРАЛЬЯ¹

© 2020 г. Н. В. Степных^{1,*}, А. Н. Копылов¹, Е. В. Нестерова¹, А. М. Заргарян¹

¹ ФГБНУ “Уральский федеральный аграрный научно-исследовательский центр
Уральского отделения Российской академии наук”
620142, г. Екатеринбург, ул. Белинского, д. 112 а, Россия

*E-mail: kniish@ketovo.zaural.ru

Поступила в редакцию 19.08.2019 г.

После доработки 11.10.2019 г.

Принята к публикации 13.01.2020 г.

Рассмотрены методы анализа и проектирования системы удобрения для ее применения в геоинформационных технологиях управления растениеводством в условиях Зауралья. Одним из критериев выбора методики определения доз удобрений является возможность формализации расчета. Анализ литературных данных показал, что в сельхозпредприятиях применяются различные по точности и сложности методы: самый простой – рекомендации научных организаций, более адаптированный – нормативный метод. При наличии базы данных агрохимических, почвенных, гидротехнических и других параметров полей, а также поправочных коэффициентов могут применяться балансовые расчеты. Авторами на базе многолетних агрохимических опытов предложен свой экспертный метод определения дозы удобрения на основе 8 ведущих факторов, влияющих на эффективность удобрений. Наибольшую информативность об эффективности удобрений в конкретных условиях дают полевые эксперименты, но проводить их традиционными методами трудоемко и затратно. В современном земледелии это решается с помощью геоинформационных технологий. Дифференцированное внесение удобрений и картирование урожайности позволяют повысить производительность труда сотрудников, существенно увеличить количество опытных участков. Для установления наиболее значимых факторов, влияющих на эффективность удобрений в агротехнологиях, целесообразно применять системно-когнитивный анализ. При ограниченности материальных ресурсов в хозяйстве для рационального планирования применения удобрений в полях рекомендуется использовать функциональную надстройку в программе EXCEL “Поиск решения”.

Ключевые слова: методы проектирования, дозы удобрений, яровая пшеница, балансовый расчет, дифференцированное внесение, производственный опыт.

DOI: 10.31857/S0002188120040110

ВВЕДЕНИЕ

Применение удобрений является одним из важнейших и эффективных элементов системы земледелия. В то же время удобрения – дорогой ресурс, что требует взвешенного подхода к принятию решений по их применению. Несмотря на дороговизну удобрений в настоящее время, отдача от них в развитых странах составляет ≈ 15 кг зерна/кг д.в., в России – ≈ 7 кг и больше. В зависимости от повышения уровня наукоемкости агротехнологий окупаемость затрат становится выше: для нормальных технологий возделывания пшеницы она находится на уровне 7–9 кг, для ин-

тенсивных – 10–12, для точных – 13–15 кг зерна/кг д.в. с учетом последствия удобрений [1]. Существенно снизить затраты на производство можно за счет их дифференцированного внесения на микроучастках с почвенной разностью. Это требует высокого уровня информационного обеспечения, а именно наличия баз данных соответствующих показателей для элементарных участков агроландшафтов.

В то же время к точному земледелию с дифференцированными по микроучасткам дозами удобрений большинство сельскохозяйственных предприятий еще не готовы. Зачастую в производстве дозы удобрений и вовсе ограничиваются средними величинами, установившимися многолетней практикой. Более реально и перспективно

¹ Работа выполнена при поддержке программы фундаментальных исследований УрО РАН, проект № 18-8-9-3.

в ближайшие годы распределение удобрений в зависимости от агрохимических, почвенных и других параметров полей. Но и в этом случае встает вопрос о том, каким именно образом принимать решение о величине дозы удобрения.

Общие методы оптимизации доз удобрений широко изучены и представлены в агрохимических монографиях, учебниках и методических руководствах [2, 3]. Для проектирования системы удобрения важно также учитывать рекомендации региональных научных учреждений и производственный опыт по определению дозы внесения элементов питания.

При этом необходимо предусмотреть влияние всех параметров природных и антропогенных факторов, однако это усложняет возможность их формализации. В то же время основное влияние на результат оказывают лишь несколько лимитирующих факторов, которые и могут быть учтены для разработки алгоритма принятия решений в цифровых технологиях, что и было использовано авторами настоящего исследования.

Цель работы — изучение методов анализа и проектирования системы удобрения яровой пшеницы при различных уровнях информационного обеспечения для их использования в алгоритмах компьютерных программ управления агротехнологиями.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование выполнено в Курганском научно-исследовательском институте сельского хозяйства — филиале УрФАНИЦ УрО РАН, в лаборатории экономики и инновационного развития. Объектом исследования были методы определения доз удобрений. Для достижения цели использован аналитический подход. Проведен обзор литературных данных с точки зрения определения дозы удобрения. С целью проверки в условиях реального производства некоторые методы были протестированы на примере научных и производственных полевых экспериментов при выращивании яровой пшеницы в Курганском НИИСХ. На основе многолетних данных стационарных исследований предложен формализованный алгоритм принятия решений по выбору доз азотных удобрений для яровой пшеницы в условиях Зауралья.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ научной литературы показал большое разнообразие применяемых методов определения доз удобрений. Для планирования растениеводства Министерством СХ РФ рекомендован нормативный метод — на основании нормативов

затрат минеральных удобрений на планируемый урожай (или на прибавку урожая) [4]. Более точными являются методы, основанные на обобщении данных с использованием балансовых расчетов. Они учитывают вынос элементов питания запланированным урожаем, эффективное плодородие почвы, коэффициенты использования питательных веществ из почвы и удобрений.

Метод балансового расчета доз удобрений разработан Шатиловым И.С. (1987 г.) и Каюмовым М.К. (1989 г.) [5, 6], широко применяется в научной и производственной практике. На его основе существует несколько способов, предусматривающих расчет доз питательных элементов по выносу всем запланированным урожаем или на планируемую прибавку урожая. При этом важно учитывать степень удобрённости предшествующей культуры, чтобы учесть последствие удобрений (из расчета 10–15% исходного количества д.в. в них).

Балансовый метод наиболее верный с точки зрения биологической потребности растений, но требует высокого уровня информационного обеспечения, в частности, базы данных для полей, наличия карты, в том числе почвенной, книги истории полей. Кроме того, разработанные в 1980–1990-х гг. нормативы требуют соответствующей корректировки и дальнейшего совершенствования в связи с изменениями плодородия почв, внедрением в производство новых сортов, химических и биологических средств и переходом на более высокие технологии [7]. Табличные данные выноса питательных элементов, несмотря на их получение опытным путем, в конкретных условиях также могут существенно отличаться, что требует дополнительных экспериментальных данных. Например, вынос азота для яровой пшеницы, по данным разных авторов, варьирует от 27 до 47 и более, калия — от 18 до 25, фосфора — от 9 до 18 кг/т основной продукции. В свою очередь, с единицы площади при одном и том же стартовом содержании нитратов в слое 0–40 см в засушливый год вынос азота растениями пшеницы снижается в 1.8–2.5 раза [8].

Принятие решения усложняется тем, что необходимо выявить эффективность как минимум 2-х, а иногда и больше, видов удобрений, а для получения одного уровня урожайности на разных участках могут быть необходимы разные дозы удобрений. В связи с этим распространение получили различные методы и модификации балансовых расчетов.

Метод элементарного баланса предусматривает в расчете коэффициенты использования элементов почвы (КИП). Метод расчетов на плано-

вую прибавку урожая учитывает обеспеченность почв питательными элементами и возможный урожай без удобрений. Расчет оптимальных доз с помощью балансовых коэффициентов использования удобрений, дифференцированных по плодородию почв является лучшим методом, т.к. позволяет одновременно регулировать и обеспеченность почвы питательными элементами. Так же применяют расчеты оптимальных доз удобрений с помощью коэффициентов возврата (возмещения) или интенсивности баланса.

Определение доз удобрений с учетом ежегодного повышения плодородия почвы и выноса питательного элемента урожаем по методу Н.Н. Михайлова (1966 г.) [9] позволяет определить дозу удобрения не только на планируемый урожай, но и на реальные темпы повышения запасов питательных веществ в почве по их заданному содержанию.

Расчет доз удобрений по балльной оценке почв, предложенный Т.Н. Кулаковской (1978 г.) [10] основан на разработанной системе стоимости балла пашни в кг продукции/балл. Пользуясь показателями окупаемости единицы питательных веществ, рассчитывают дозу удобрений на дополнительный урожай, учитывая благоприятное соотношение N:P:K [3].

Метод определения действительно возможного урожая (ДВУ) основан на том, что содержание элементов питания в почве является лимитирующим фактором и определяет получение ДВУ. По этому методу, кроме содержания питательных веществ в почве, важно знать и соотношение каждого из элементов, принимавших участие в формировании урожая, а также степень доступности их растениям. Коэффициенты использования питательных веществ растениями из почвенных запасов для Сибири определены Ю.И. Ермохиным и А.Ф. Неклюдовым (2002 г.) в следующих диапазонах: нитратный азот – 0.6–0.8 (60–80%), подвижный фосфор – 0.1 (10%), обменный калий – 0.2–0.3 (20–30%) [11].

Методы расчета доз удобрений на планируемый урожай, разработанные Н.К. Болдыревым (1983 г.) [12], включают комплексные методы листовой и почвенной диагностики, т. е. химический состав листьев, содержание подвижных питательных веществ в почве, балансовый метод расчета доз удобрений и др.

Несмотря на достаточную изученность отдельных элементов системы удобрения и многообразие методов расчета оптимальных доз, формализация этих знаний пока находится на низком уровне, не позволяющем проводить качествен-

ный автоматизированный анализ данных и проектирование доз удобрений. Сложность расчета потребности растений в минеральных удобрениях связана с тем, что содержание питательных элементов в почве, особенно минерального азота, изменяется в широких пределах в зависимости от происходящих в почве каждого агроландшафта химических, биологических, физических и других процессов. При разных условиях произрастания растений меняется их способность использовать питательные элементы из почвы и удобрений [13].

Поэтому в настоящее время самым распространенным и простым для формализации способом определения доз удобрений является использование рекомендаций, полученных научными учреждениями в агроландшафтных зонах. Это методы, основанные на обобщении данных с эмпирическими дозами удобрений. В результате опытов Географической сети ВИУА и агрохимической службы ЦИНАО для основных почвенно-климатических зон на преобладающих типах почв со средним содержанием подвижного фосфора и обменного калия разработаны оптимальные дозы макроудобрений под основные культуры, а также дозы и способы внесения микроудобрений [3].

Региональные НИУ предлагают более детальные рекомендации. В условиях Зауралья установлена наибольшая потребность яровой пшеницы в азотных и фосфорных удобрениях. Из-за высокого естественного фона содержания калия в почве потребности в дополнительном внесении этого элемента нет [14]. Потребность в азотных удобрениях определяется по шкале А.Е. Кочергина (1965 г.) [15], а детализацию доз проводят на основании многолетних исследований. По данным опытов Курганского НИИСХ, в центральной и южной зонах с более выраженной засушливостью климата и легким гранулометрическим составом почв на выщелоченных черноземах оптимальной и экономически целесообразной является доза азота N40. В восточной зоне, по данным Макушинского опытного поля, достаточно вносить N20 в сочетании с фосфорным удобрением (P15). В условиях северо-западной зоны эффективной и окупаемой является доза N50. Оптимальными дозами припосевного внесения фосфорного удобрения в центральной зоне являются 15–20 кг д.в./га при условии достаточной обеспеченности азотом. В северо-западной зоне дозу фосфора не рекомендуют увеличивать более 20–25 кг д.в./га [14].

Длительные полевые опыты представляют большой практический и научный интерес, т.к. позволяют проследить влияние предшественника и последействия удобрений. В алгоритме проектирования доз удобрений рекомендуемые дозы

привязывают к агроландшафтным зонам и по умолчанию выбирают в соответствующих технологиях выращивания сельхозкультур. Такой подход уже используют в программе по проектированию агротехнологий, разработанной в Курганском НИИСХ [16]. Этот метод применяют чаще всего при недостаточном уровне информационной обеспеченности и цифровизации предприятия.

С развитием информационных технологий эмпирические методы определения доз удобрений трансформируются и совершенствуются, основываются на масштабном статистическом обобщении многолетних экспериментальных данных полевых опытов, предусматривают в том числе расчетные методы и модификации с моделированием и применением электронной техники [3, 17]. Недостатком этих методов является науко- и трудоемкость, необходимость большого набора вариантов, но самое главное – недооценка биологических потребностей культур в питательных элементах.

Таким образом, основные методы расчета доз удобрений сводятся к трем группам: нормативные, балансовые и статистические [1, 3]. Каждый из них имеет как достоинства, так и недостатки. Во всех используют те или иные поправочные коэффициенты на условия вегетации, связанные с содержанием элементов в почве, удобрениях и растениях, но почти не учитываются предшественники, степень окультуренности почвы и другие показатели, существенно влияющие на коэффициент использования питательных веществ растениями из почвы и удобрения. Поэтому их нужно рассматривать как весьма ориентировочные, особенно если их берут из справочных источников [18]. Кроме того, приведенные методы не учитывают экономическую целесообразность. Диспаритет цен на зерно и удобрения, которые, обеспечивая в интенсивных технологиях существенный прирост урожайности культур, в среднем 1.26 т/га [14, 19], все же не гарантирует хозяйствам получение стабильной прибыли [8].

В связи с этим необходима гибкая система расчетов доз удобрений, при этом стратегия их оптимальной дифференциации должна быть ориентирована не на получение максимальной или заданной (равной) продуктивности культур при разных условиях в пределах конкретного хозяйства, а на обеспечение целесообразной агрономической и экономической эффективности при условии поддержания необходимого уровня плодородия почв, о чем пишет в своей статье О.Г. Чуян [18].

Для Зауралья и Сибири установление оптимальных доз удобрения осложняется неблагопри-

ятными погодными условиями. В засушливые годы эффективность, например, внесенного азота сводится к минимуму, неиспользованный азот вымывается в нижние слои почвы, что резко ограничивает верхние пределы эффективных доз удобрений.

Многолетние исследования сибирских ученых показали, что оптимальные дозы всех 3-х макроэлементов в условиях Сибири могут определяться на основе единого подхода, основанного на учете их количества во фракциях, представляющих ближайший резерв элементов для растений. Дополнительное внесение должно быть в дозе, равной отчуждению элемента с поля урожаем (в среднем за ротацию севооборота), т.е. за счет поддержания в почве оптимальных количеств с помощью компенсирующих доз элементов минерального питания, с распределением между культурами севооборота в соответствии с их относительными потребностями (выносом) по методу расчета элементарного баланса [8].

В условиях Зауралья расчетный метод элементарного баланса зачастую экономически себя не оправдывает, т.к. в засушливые годы эффективность азотных удобрений сводится к минимуму, а во влажные оставшийся азот используется растениями лишь частично. В связи с этим учеными Курганского НИИСХ на основе анализа многолетних исследований в стационарных опытах (с 1967 г.), проведенных в различных почвенно-климатических зонах и в разные по тепло- и влагообеспеченности годы, даны рекомендации по принятию решений при определении оптимальных доз удобрений [14, 20]. Статистический анализ полученных многолетних данных позволил установить коэффициенты значимости 8-ми основных факторов, лимитирующих условия вегетации растений, предложена своя экспертная методика определения оптимальных доз азотных удобрений под яровую пшеницу (табл. 1, 2).

Исходя из условий конкретного поля доза азотных удобрений определяется по суммарному баллу (ΣK_3), исходя из суммы баллов указанных коэффициентов, умноженной на балл обеспеченности фосфором, как представлено в формуле и табл. 2:

$$\Sigma K_3 = (Z + P + Pr + U + D + O + Za) \times S,$$

где Z , P , Pr , U , D , O , Za , S – коэффициенты значимости следующих факторов: Z – зона, P – почва, Pr – предшественник, U – урожайность предшественника, D – доза азота под предшественник, O – обработка почвы, Za – засоренность предшественника, S – содержание фосфора в почве.

Таблица 1. Коэффициенты значимости факторов (K_3) для расчета по экспертной методике дозы азотных удобрений при возделывании яровой пшеницы в условиях основных природных зон Зауралья

1	Зона (Z)				Тип (подтип) почвы (P)					
2	центральная	восточная	северо-западная	южная	$Ч^T_B$	$Ч^C_B$	$Ч^L_B$	$Ч^L_{осн}$		
3	20	21	6	17	7	18	18	23		
1	Предшественник (Pr)									
2	черный пар	поверхностный пар	химический пар	1-я пшеница после пара	2-я пшеница после пара	бессеменная пшеница	рапс	кукуруза	зернобобовые	
3	45	30	24	14	11	7	5	4	18	
1	Урожайность предшественника (U), ц/га									
2	0–8		8–15	15–20		20–25		25>		
3	10		6	4		2		0		
1	Доза азота под предшественник (D), кг/га					Обработка почвы (O)				
2	0–15	15–30	30–50	50–70	>70	вспашка	поверхностная 5–10	мелкая		без обработки
3	0	3	6	8	10	10	3	10–15	15–25	
1	Засоренность предшественника (Za)					Содержание фосфора в почве (S), г/кг				
2	сильная	средняя		слабая	нет сорняков	От 0 до 44		45–60		60 и более
3	0	3		6	10	10		1.35		1

Примечания: 1. В строке 1 – фактор, 2 – показатель фактора, 3 – балл коэффициента значимости фактора. 2. $Ч^T_B$ – чернозем выщелоченный тяжелосуглинистый, $Ч^C_B$ – чернозем выщелоченный среднесуглинистый, $Ч^L_B$ – чернозем выщелоченный легкосуглинистый, $Ч^L_{осн}$ – чернозем обыкновенный солонцеватый легкоглинистый.

Таблица 2. Доза азотных удобрений в соответствии с суммарным баллом коэффициентов значимости условий выращивания сельскохозяйственных культур (ΣK_3), кг д.в./га

ΣK_3	110 и более	105–109	100–104	95–99	90–94	85–89	80–84	75–79
Доза	0	10	15	17	20	23	25	27
ΣK_3	70–74	65–69	60–64	55–59	50–54	45–49	40–44	35–39
Доза	30	33	35	37	40	43	45	47
ΣK_3	30–34	25–29	25–29	20–24	15–19	10–14		
Доза	50	55	55	60	65	70		

Коэффициент значимости обеспеченности почвы фосфором в формуле вынесен за скобку в связи с тем, что на фоне низкого содержания этого элемента все рекомендации по применению азота становятся экономически неэффективными, требуется обязательное применение фосфорного удобрения, которое рекомендуют вносить в дозе P15–20 [5]. Более высокая доза экономически нецелесообразна, т.к. экономически неэффективна.

Данный алгоритм является экспертным и получен методом подбора. Тем не менее, он может быть использован для создания экспертно-советующей системы, встроенной в программу по проектированию агротехнологий в условиях Зауралья как для нормальных, так и для интенсивных технологий.

С этой целью данный метод был апробирован на производственных полях Курганского НИИСХ. Для каждого поля в институте ведется электрон-

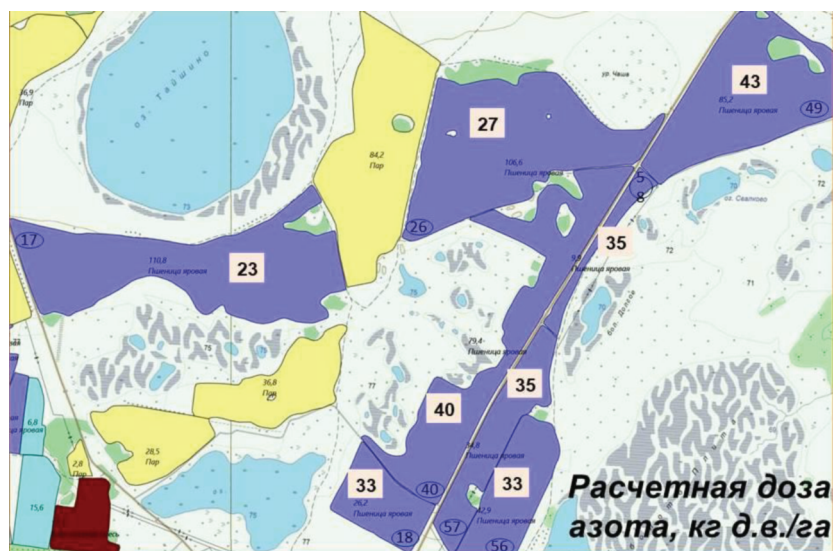


Рис. 1. Фрагмент карты с распределением различных расчетных доз азотного удобрения в зависимости от условий каждого поля (Курганский НИИСХ, 2019 г.).

ная книга истории полей. На основании информации о каждом поле в 2019 г. проведен расчет и даны рекомендации по выбору доз азотных удобрений. Результаты показали, что расчетная доза азота для некоторых полей меньше, чем общепринятая в центральной зоне (N40) (рис. 1). Это позволило сэкономить количество удобрений. Например, общая потребность в азоте под посев пшеницы после зернового предшественника на запланированных 11-ти полях площадью 434 га по новой экспертной методике составила 15.8 т, что на 1.5 т д.в. (или в переводе на стоимость – на 65.2 тыс. рублей) меньше в сравнении с традиционно рекомендуемой.

При высоком уровне информационного обеспечения и цифровизации управления распространение получают более совершенные методы расчета доз удобрений, основанные на широком спектре показателей состояния растений и почвы и цифровых системах сбора и обработки данных, полученных с помощью высокоточного оборудования, космических снимков и другого инструментария. На основании расчетной информации о получении действительно возможной урожайности, максимальной для реального уровня плодородия каждого поля, возможен выбор оптимальной технологии возделывания сельскохозяйственных культур в зависимости от потребностей и финансовых возможностей товаропроизводителя [21].

Перспективно использование карт-заданий при дифференцированном применении агрохимикатов, основанных на агрохимических показателях почвы и растений, индексах NDVI, позволя-

ющих распределять удобрения по полю с учетом потребности растений. Например, с помощью специальных датчиков фиксируется свет, отраженный от растений, бортовой компьютер вычисляет индекс вегетации и дозу удобрения или средств защиты растений, передает команду на открытие дозатора для выдачи препарата. В то же время технические и программные средства для дифференцированного внесения удобрений еще далеки от совершенства, имеют высокую стоимость, а соответствующие методы расчета оптимальной дозы по потребности растений в элементах питания требуют отбора и анализа почвенных образцов на конкретном микроучастке.

Анализ всего многообразия методических подходов к определению доз внесения удобрений под пшеницу показал, что на фоне жесткой экономической конкуренции в борьбе за каждый рубль окупаемости универсального метода быть не может. При этом все варианты доз, условий и технических возможностей в научных учреждениях на делянках изучить невозможно, тем более при учете особенностей агроландшафтных зон. Возникает необходимость изучения технологий в конкретных условиях хозяйства.

Для проверки эффективности технологий на различных полях авторами был проведен полевой эксперимент на полях Курганского НИИСХ по изучению эффективности удобрений, который показал, что на разных полях при прочих равных условиях эффективность удобрений существенно различалась и отличалась от данных, полученных на опытных участках.

При одинаковых предшественнике, сорте и технологии возделывания яровой пшеницы эффективность удобрения сульфоаммофос (0.8 ц/га) была различной: прибавка на поле 27 составила 5.0, на поле 36 – 3.6 ц/га. При стоимости зерна яровой пшеницы 4-го класса 10 тыс. руб./т с каждого гектара на первом поле получили дополнительно 1400 руб. прибыли только за счет почвенных различий (почвы тяжелее, гумуса и фосфора в почве больше (3.9 против 3.2% и 104 против 71 мг/кг соответственно). Накопление подобной информации о поле позволяет использовать ее в проектировании системы удобрений. Дополнительную информацию (почвенные характеристики, погодные условия, сроки посева и уборки и т.п.) можно хранить в электронной книге (базе данных) истории полей, привязанной к электронной карте. Авторами создана компьютерная программа управления базой данных полей [22].

Внедрение цифровых технологий в производство открывает новые возможности для проведения массовых экспериментов в производственных условиях. Речь идет об использовании системы картирования урожайности и дифференцированного внесения удобрений на основе задания, содержащегося в компьютерной программе и электронной карте.

Для определения доз удобрений в Агрофизическом институте широко апробирован метод прецизионных (точных) опытов. В соответствии со схемой производят автоматическое внесение удобрений в различных дозах в нескольких повторениях, а также оставляют контрольные участки без удобрений. Во время уборки ведут учет урожайности с помощью системы картирования. Приемник сигналов GPS, ГЛОНАСС в реальном времени привязывает показания датчиков урожайности к электронной карте. В результате проведения прецизионного эксперимента и обработки его результатов средствами геоинформационных систем генерируется единая информационная база о наиболее целесообразных дозах удобрений в условиях пространственной неоднородности опытного поля [23, 24]. Система картирования урожайности в такой технологии является одним из методов сбора информации. На проблемных участках с низкой урожайностью анализируют запасы влаги, агрохимический состав, определяют элементы, находящиеся в дефиците, затем составляют электронную карту-задание доз удобрений по микроучасткам для выравнивания урожайности по установленным нормам.

Таким образом, необходимо комплексное использование научного и производственного опыта. Схемы опытов должны предусматривать воз-

можность обобщения их результатов с использованием современных экономико-математических методов и ПЭВМ [14]. На первых этапах удобным инструментом могут стать электронные книги истории полей, анализ которых позволит получать дополнительную информацию о системе земледелия для каждого сельхозпредприятия.

Для анализа экспериментальных и производственных данных, характеризующих состояние агроценоза и особенности агротехнологий для принятия решений при проектировании, как правило, применяют статистические методы. В то же время большое разнообразие и количество получаемых при этом данных делает их анализ проблематичным и требует специальных методов работы с так называемыми “большими данными”, обзор которых предполагает отдельную проблему. Один из интересных и перспективных способов анализа данных – системно-когнитивный анализ, для которого Е.В. Луценко разработал доступный программный инструментарий (универсальную когнитивную аналитическую систему “Эйдос”). По мнению автора, метод обеспечивает возможность разумной содержательной интерпретации результатов, выявление силы и направления влияния сотен или даже тысяч факторов, является непараметрическим, позволяет корректно обрабатывать неполные (фрагментированные) данные; эффективно подавлять шум в данных. Суть метода системно-когнитивного анализа состоит в последовательном повышении степени формализации модели и преобразовании данных в информацию, а ее – в знания и решения на основе этих знаний задач идентификации (распознавания, классификации и прогнозирования), поддержки принятия решений и исследования моделируемой предметной области [25].

Для апробации этого метода анализа данных с помощью системы “Эйдос” авторами проанализированы результаты многолетних исследований технологий выращивания сельскохозяйственных культур в 3-х природно-климатических зонах Курганской обл. (северо-западной, центральной и восточной). В отдельных стационарах изучали севообороты, способы обработки почвы, подготовки пара, дозы удобрений, применение гербицидов – всего 30 факторов в 257 вариантах. Необходимо было определить влияние технологических факторов на урожайность и рентабельность выращивания зерновых культур. Простой анализ такого количества факторов одновременно не представляется возможным, т.к. не соблюдается классический в опытном деле принцип единственного различия.

Код	Наименование признака	Значимость
1	УРОЖАЙНОСТЬ, Ц/ГА-1/3-{10.4030008, 17.668...}	
2	УРОЖАЙНОСТЬ, Ц/ГА-2/3-{17.6687781, 24.934...}	
3	УРОЖАЙНОСТЬ, Ц/ГА-3/3-{24.9345553, 32.200...}	
4	РЕНТАБЕЛЬНОСТЬ, %-1/3-{0.2285537, 0.2350...}	
5	РЕНТАБЕЛЬНОСТЬ, %-2/3-{0.2350613, 40.6987...}	
6	РЕНТАБЕЛЬНОСТЬ, %-3/3-{40.6987762, 81.162...}	
22	НАИМЕНОВАНИЕ ПАРА-Механический пар с дискованием	3.106
38	УДОБРЕНИЯ-N60(P30 последствие)	2.866
19	СИСТЕМА ОБРАБОТКИ ПОЧВЫ-Отвальная	2.317
5	СЕВООБОРОТ-Пар-Пшеница-Пшеница-Овес	1.911
44	ОБРАБОТКА ГЕРБИЦИДАМИ-С гербицидами	1.021
9	СЕВООБОРОТ-Пар-Пшеница	0.955
29	УДОБРЕНИЯ-N120(P30 последствие)	0.955
12	ЗОНА-Северо-Западная	0.911
35	УДОБРЕНИЯ-N40(P30 последствие)	0.911
6	СЕВООБОРОТ-Пар-Пшеница-Пшеница-Пшеница	0.374
7	СЕВООБОРОТ-Пар-Пшеница-Пшеница	0.374
24	НАИМЕНОВАНИЕ ПАРА-Механический пар со вспашкой	-0.028
2	СЕВООБОРОТ-Бессменный овес	-0.045
31	УДОБРЕНИЯ-N20P20	-0.045
33	УДОБРЕНИЯ-N40P20 последствие)	-0.045
34	УДОБРЕНИЯ-N40(P20 последствие)P20	-0.045
40	УДОБРЕНИЯ-P20	-0.045
42	УДОБРЕНИЯ-P30 (последствие)	-0.045
17	СИСТЕМА ОБРАБОТКИ ПОЧВЫ-Мульчирующая разноглубинная	-0.089
13	ЗОНА-Центральная	-0.113
25	НАИМЕНОВАНИЕ ПАРА-Сидеральный пар	-0.134
8	СЕВООБОРОТ-Пар-Пшеница-Соя-Пшеница	-0.179
10	СЕВООБОРОТ-Пар-Рпс-Пшеница-Пшеница	-0.179

Рис. 2. Информационный портрет класса “урожайность 24.9–32.2 ц/га”.

Код	Наименование признака	Значимость
1	УРОЖАЙНОСТЬ, Ц/ГА-1/3-{10.4030008, 17.668...}	
2	УРОЖАЙНОСТЬ, Ц/ГА-2/3-{17.6687781, 24.934...}	
3	УРОЖАЙНОСТЬ, Ц/ГА-3/3-{24.9345553, 32.200...}	
4	РЕНТАБЕЛЬНОСТЬ, %-1/3-{0.2285537, 0.2350...}	
5	РЕНТАБЕЛЬНОСТЬ, %-2/3-{0.2350613, 40.6987...}	
6	РЕНТАБЕЛЬНОСТЬ, %-3/3-{40.6987762, 81.162...}	
4	СЕВООБОРОТ-Пар-Пшеница-Пшеница-Овес-Пшеница	14.525
11	ЗОНА-Восточная	12.459
43	ОБРАБОТКА ГЕРБИЦИДАМИ-Без гербицидов	7.475
15	СИСТЕМА ОБРАБОТКИ ПОЧВЫ-Комбинированная миевальная	6.836
39	УДОБРЕНИЯ-Без удобрений	5.902
16	СИСТЕМА ОБРАБОТКИ ПОЧВЫ-Мульчирующая миевальная	5.836
41	УДОБРЕНИЯ-P20 (последствие)	5.623
20	НАИМЕНОВАНИЕ ПАРА-Комбинированный пар	3.033
23	НАИМЕНОВАНИЕ ПАРА-Механический пар с плоскорезной	3.033
21	НАИМЕНОВАНИЕ ПАРА-Механический пар	3.016
27	НАИМЕНОВАНИЕ ПАРА-Миевальный пар	1.820
36	УДОБРЕНИЯ-N40P20	1.033
14	СИСТЕМА ОБРАБОТКИ ПОЧВЫ-Комбинированная глубокая	0.213
2	СЕВООБОРОТ-Бессменный овес	-0.197
9	СЕВООБОРОТ-Пар-Пшеница	-0.197
29	УДОБРЕНИЯ-N120(P30 последствие)	-0.197
31	УДОБРЕНИЯ-N20P20	-0.197
33	УДОБРЕНИЯ-N40(P20 последствие)	-0.197
34	УДОБРЕНИЯ-N40(P20 последствие)P20	-0.197
40	УДОБРЕНИЯ-P20	-0.197
42	УДОБРЕНИЯ-P30 (последствие)	-0.197
5	СЕВООБОРОТ-Пар-Пшеница-Пшеница-Овес	-0.393
12	ЗОНА-Северо-Западная	-0.393

Рис. 3. Информационный портрет класса “рентабельность 40.7–81.2%”.

Система “Эйдос” в загруженных данных выделила 3 класса по урожайности и 3 — по рентабельности, формируя информационный портрет каждого класса (рис. 2, 3). Класс представляет собой группу данных, систематизированных по конкретному признаку в определенных пределах величин. В каждом классе система определяет значимость (силу) влияния различных факторов (признаков). Оказалось, чтобы достичь высокой урожайности, необходимо использовать 5 первых технологических факторов с наибольшими пока-

зателями значимости. Другим выводом стало то, что высокий уровень урожайности культур не всегда совпадает с высокой экономической эффективностью их выращивания: для получения наибольшей рентабельности (в пределах 40.7–81.2%) влияние оказывали другие технологические факторы.

Констатируя возможность использования методики Луценко Е.В. для установления значимости факторов производства на результативные показатели, необходимо отметить ее ограничен-

Таблица 3. Экономическая эффективность производства зерна в зависимости от севооборота, технологии возделывания и фона удобренности (Центральное опытное поле Курганского НИИСХ)

Севооборот, бесменный посев	Фон удобренности	Урожайность, ц/га	Затраты	Прибыль	Рентабель- ность, %	Себестои- мость, руб./ц
			руб./га			
Отвальная обработка (1999–2005 гг.)						
Зернопаровой	Контроль	17.2	6909	10291	71	533
	N60	22.0	10016	11984	46	607
Зерновой	Контроль	12.0	8247	3753	10	686
	N60	18.2	11519	6681	18	631
Бесменная пшеница	Контроль	10.2	68817	3383	15	864
	N60	15.6	12052	3548	28	773
Нулевая (no-till) обработка (2008–2015 гг.)						
Зернопаровой	Контроль	13.5	6333	7167	58	627
	N45	16.6	8817	7783	40	707
Зерновой	Контроль	13.0	8408	4592	56	645
	N60	15.0	10700	4300	41	710
Бесменная пшеница	Контроль	11.4	7962	3438	42	698
	N60	15.8	11021	4779	42	698
Минимальная обработка (2008–2015 гг.)						
Зернопаровой	Контроль	13.8	6107	7693	67	591
	N45	17.1	8675	8425	52	653
Зерновой	Контроль	13.4	8187	5213	65	610
	N60	15.2	10322	4878	48	680
Бесменная пшеница	Контроль	11.9	7586	4314	55	637
	N60	15.6	10625	4975	45	681

ность в принятии решений. Она не дает количественной оценки влияния факторов в натуральных показателях, т.е. не показывает прибавку урожайности при увеличении действия фактора.

Эффективность удобрения определяется целым набором условий всей системы земледелия, из которых определяющим является севооборот, а решающим – материальные ресурсы. Поэтому для проектирования системы удобрения важно знать данные об эффективности севооборотов в сочетании с технологиями выращивания сельскохозяйственных культур и применением удобрений, а также с учетом рыночного спроса и стоимости продукции. Для выбора оптимального варианта целесообразно использовать надстройку “Поиск решения” – составной части программы EXCEL. Решение может осуществляться 3-мя методами: симплекс-методом, который используют для решения линейных задач, методом обобщенного приведенного градиента (ОПГ) для нелинейных задач и эволюционным, используемым для решения функциональных задач. В нашем случае используют симплекс-метод и метод ОПГ. В параметрах устанавливают целевую ячейку – максимум прибыли и ограничения по площади и финансовым ресурсам. Для условного примера были взяты данные об эффективности севообо-

ротов в исследованиях Курганского НИИСХ на условной площади 1000 га (табл. 3).

При ограничении финансовых ресурсов “поиск” рекомендует занять поле почти целиком (947 га) зернопаровым севооборотом, в том числе с применением азотных удобрений в дозе N45–60 на площади 266 га. На 53 га площади для посева культуры не хватает ресурсов. При достаточном наличии средств преимущество зернопарового севооборота сохраняется, из 1000 га предлагается занять 740 га, но в отличие от первого варианта со значительным увеличением применения удобрений (575 га). Становятся выгодными зерновые севообороты (160 га) и бесменная пшеница (100 га), но с обязательным использованием удобрений (рис. 4).

Этот пример отражает динамический характер системы земледелия, параметры которой не могут быть постоянными, а зависят от изменения природно-климатических факторов, обеспеченности предприятий ресурсами, экономических условий производства и реализации продукции. Успешно реагировать и принимать эффективные решения в динамичном производстве позволяют цифровые технологии. Средства программирования современных приложений (готовых программ, баз данных и электронных таблиц) позволяют создавать экспертно-советующие системы, встраивая в них логику решения задачи, нормативную базу,

Показатель	Отвальная обработка						Нупедал обработка						Минимальная обработка						Сумма	Ограничение
	зернозавровой контроль	N60	зернозавровой контроль	N60	бессменная пшеница контроль	N60	зернозавровой контроль	N45	зернозавровой контроль	N60	бессменная пшеница контроль	N60	зернозавровой контроль	N45	зернозавровой контроль	N60	бессменная пшеница контроль	N60		
Площадь, га	324,9505	178,4212	0	0	0	0	146,0406	21,53035	0	0	0	0	210,0342	65,75938	0	0	0	0	946,7363	106
Урожайность, ц/га	17,2	22	12	16,2	10,2	15,6	13,5	16,6	13	15	11,4	15,8	13,8	17,1	13,4	15,2	11,9	15,6		
Заплата, руб./га	6909	10016	8247	11519	6817	12052	6333	8817	8408	10700	7962	11021	6107	8675	8187	10322	7586	10625		
Всего затрат, тыс. руб.	2245,083	1787,067	0	0	0	0	924,875	189,8331	0	0	0	0	1282,679	570,4626	0	0	0	0	7000	700
Цена, руб./т	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000		
Стоимость зерна, руб./га	17200	22000	12000	16200	10200	15600	13500	16600	13000	15000	11400	15800	13800	17100	13400	15200	11900	15600		
Прибыль, руб./га	14954,92	20212,93	12000	18200	10200	15600	12575,13	16410,17	13000	15000	11400	15800	12517,32	16529,54	13400	15200	11900	15600		
Всего прибыли, тыс. руб.	4859,608	3606,416	0	0	0	0	1836,479	353,3186	0	0	0	0	2629,066	1086,972	0	0	0	0	14371,86	

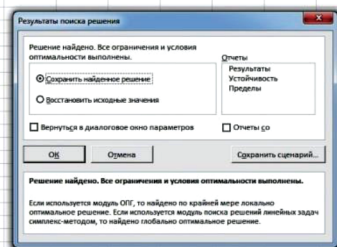


Рис. 4. Задача в “Поиске решения” по выбору севооборота.

разнообразные условия, от которых зависит эффективность тех или иных приемов и т.п. [14].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, анализ методов определения доз удобрений показал, что в сельхозпредприятии могут применять различные по точности и сложности методы. Критериями выбора для использования в алгоритмах при автоматизированном проектировании системы удобрения является возможность формализации расчета и уровень информационной обеспеченности предприятия. При низком уровне информационной обеспеченности самым простым способом установления доз является применение рекомендаций научных организаций, более точным – нормативный метод. При более высоком уровне цифровизации в предприятии и наличии базы данных агрохимических, почвенных, гидротехнических и других параметров полей, а также поправочных коэффициентов к нормативам можно применять метод элементарного баланса.

Наибольшую точность при установлении эффективности удобрений и определении их оптимальных доз в конкретных условиях, а также для формализации знаний и уточнения поправочных коэффициентов для расчетов дают полевые эксперименты, которые можно проводить как традиционными методами, что более затратно, так и с применением геоинформационных технологий (оборудования по дифференцированному внесению удобрений и картированию урожайности), которые позволяют повысить количество опытных вариантов и производительность труда.

Среди методов анализа данных апробирован и рекомендован для установления наиболее значи-

мых факторов в эффективности технологий системно-когнитивный анализ по Е.В. Луценко.

Эффективным методом, используемым для принятия решений, является надстройка EXCEL “Поиск решения”, которая позволяет распределять ресурсы, в том числе денежные, по полям.

Для установления оптимальных доз удобрений в условиях Зауралья с учетом основных влияющих факторов предложен свой алгоритм принятия решений, основанный на результатах многолетних исследований лаборатории агрохимии Курганского НИИСХ – филиала УрФАНИЦ УрО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кирюшин В.И., Кирюшин С.В.* Агротехнологии: Учеб.-к. СПб.: Изд-тво Лань, 2015. 464 с.
2. *Ягодин Б.А., Жуков Ю.П., Кобзаренко В.И.* Агрохимия / Под ред. Ягодина Б.А. М.: Колос, 2002. 584 с.
3. *Минеев В.Г., Сычев В.Г., Гамзиков Г.П.* Агрохимия. Учеб.-к / Под ред. Минеева В.Г. М.: ВНИИА им. Д.Н. Прянишникова, 2017. 854 с.
4. Справочник экономиста сельскохозяйственной организации. М.: Росинформагротех, 2012. 464 с.
5. *Шатилов И.С.* Основы программирования урожаев сельскохозяйственных культур. М.: Агропромиздат, 1987. 358 с.
6. *Каюмов М.К.* Справочник по программированию урожаев. М.: Россельхозиздат, 1987. 368 с.
7. *Державин Л.М.* Оптимизация научного обеспечения интегрированного применения удобрений в интенсивном земледелии // Агрохимия. 2007. № 7. С. 5–14.
8. *Шарков И.Н.* Проблемы оптимизации минерального питания зерновых в интенсивном земледелии Сибири // Почвенные ресурсы Сибири: вызовы XXI века: Сб. мат.-лов Всерос. научн. конф. с международ. участием, посвящ. 110-летию выдающегося организатора науки и первого директора ИПА СО РАН Р.В. Ковалева. 2017. С. 266–271.

9. Михайлов Н.Н. Расчеты доз минеральных удобрений на основе агрохимических анализов почв. М.: Колос, 1966. 24 с.
10. Кулаковская Т.Н. Почвенно-агрохимические основы получения высоких урожаев. Минск, 1978. 272 с.
11. Ермохин Ю.И., Неклюдов А.Ф. Программирование урожая в Западной Сибири: Уч. пособ. Омск: ОмскГАУ, 2002. 88 с.
12. Болдырев Н.К. Использование нормативных показателей в методе листовой диагностики для расчета норм удобрений на запланированный урожай пшеницы // Агрохимия. 1983. № 2. С. 105–113.
13. Методическое руководство по проектированию применения удобрений в технологиях адаптивно-ландшафтного земледелия / Под ред. Иванова А.Л., Державина Л.М. М., 2008. 392 с.
14. Волынкина О.В., Волынкин В.И., Копылов А.Н., Кириллова Е.В., Лысухин Д.В. Системы удобрения в агротехнологиях Зауралья / Под ред. Волынкиной О.В. Куртамыш: ООО “Куртамышская типография”, 2017. 284 с.
15. Кочергин А.Е. Определение потребности зерновых культур в азотных удобрениях на черноземах Западной Сибири // Докл. ВАСХНИЛ. 1965. № 2. С. 5–8.
16. Жукова О.А., Заргарян А.М., Степных Н.В. Проектирование технологий выращивания сельхозкультур. Компьютерная программа для ЭВМ. Свид-во о госрегистрации № 2017617052 от 3.11.2017 г.
17. Методика проектирования системы удобрения в адаптивно-ландшафтном земледелии. Курск: ВНИИЗиЗПЭ РАСХН, 2008. 64 с.
18. Чуян О.Г. К вопросу определения оптимальных доз минеральных удобрений для усовершенствования базы данных при проектировании и реализации системы удобрений в адаптивно-ландшафтном земледелии // Достиж. науки и техн. АПК. 2015. Т. 29. № 12. С. 70–75.
19. Холмов В.Г., Юшкевич А.В. Интенсификация и ресурсосбережение в земледелии лесостепи Западной Сибири. Омск: ОмскГАУ, 2006. 395 с.
20. Копылов А.Н., Волынкина О.В., Кириллова Е.В. Ресурсосберегающая система применения удобрений в Зауралье // Аграрн. сектор. 2018. № 2(36). С. 84–88.
21. Рухович О.В. Методы прогнозирования урожайности озимой пшеницы в бассейне р. Оки с использованием рельефа, климата и почв // Новые методы и результаты исследований ландшафтов в Европе, Центральной Азии и Сибири. Монография. В 5-ти т. / Под ред. Сычева В.Г., Мюллера Л. М., 2018. Т. I. С. 51–56.
22. Заргарян А.М. Управление базой данных состояния и функционирования агроландшафтов. Компьютерная программа для ЭВМ // Свид-во о госрегистрации № 2018662258 от 03.10.2018 г. / Заргарян А.М.
23. Якушев В.П., Лecomцев П.В., Матвеев Д.А., Петрушин А.Ф., Якушев В.В. Применение дистанционного зондирования в системе точного земледелия // Вестн. сел.-хоз. науки. 2015. № 1. С. 23–25.
24. Матвеев Д.А., Канаеш Е.В., Якушев В.В., Митрофанов Е.П., Петрушин А.Ф. Использование тестовых площадок для определения доз азотных подкормок в системе точного земледелия // Агрофизика 2016. № 4. С. 43–51.
25. Луценко Е.В., Лантев В.Н., Сергеев А.Э. Системно-когнитивное моделирование в АПК: Учеб. пособ. Краснодар: Экоинвест, 2018. 518 с.

Methods of Analysis and Designing of System of Fertilizer of Spring Wheat to Formalize Decision-Making in the Conditions of Trans-Urals

N. V. Stepnykh^{a,*}, A. N. Kopylov^a, E. V. Nesterova^a, O. A. Zhukova^a, and A. M. Zargaryan^a

^a Ural Federal Agrarian Scientific Research Centre, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences
112a Belinskiy Str., 620142, Ekaterinburg, Russia

*E-mail: kniish@ketovo.zaural.ru

The methods of analysis and design of fertilizer systems for their application in geoinformation technologies of crop management in the Trans-Urals was shown. One of the criteria for choosing the method of determining the doses of fertilizers is the possibility of formalization of the calculation. The analysis of the literature data showed that agricultural enterprises can use different methods in accuracy and complexity: the simplest recommendations of scientific organizations, more adapted – the normative method. In the presence of a database of agrochemical, soil, hydraulic and other field parameters, as well as correction factors, balance calculations can be used. Authors on the basis of long-term agrochemical experiments the expert method of determination of a dose of fertilizer on the basis of 8 leading factors influencing efficiency of fertilizers is offered. The most informative about the effectiveness of fertilizers in specific conditions give field experiments, but to carry out their traditional methods time-consuming and costly. In modern agriculture it is solved with the help of geoinformation technologies. Differentiated fertilizer application and yield mapping can improve employee productivity, significantly increase the number of experimental plots. To determine the most significant factors affecting the efficiency of fertilizers in agricultural technologies, it is advisable to use a system-cognitive analysis. With limited material resources in the economy for the rational planning of fertilizers on the fields, it is recommended to use a functional add-in in EXCEL “solution Search”.

Key words: design methods, fertilizer doses, spring wheat, balance calculation, differentiated application, production experience, Trans-Urals.