

INFORMATIONAL TECHNOLOGIES IN AGRICULTURE

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ

MATHEMATICAL MODELS FOR THE RATIONAL DEVELOPMENT OF FERTILIZER SYSTEMS

**Mitrofanov S.V., Blagov D.A., Novikov N.N.,
Nikitin V.S., Panfyorov N.S., Belykh S.A.**
Institute of engineering support of agriculture –
branch of the Federal State Budgetary Scientific Institution
“Federal Scientific Agroengineering Center VIM”, Ryazan

Abstract. This article provides a brief analysis of methods for the calculation of nutrients dosages for crops. The conducted analysis has shown a number of disadvantages of these methods: forecrops and degree of soil development are not taken into account, calculation of nutrients dosages is carried out by averaged agrochemical properties of soils of agricultural enterprises, that has a considerable effect on the coefficient of uptake of nutrients contained in soil and fertilizers by plants and a number of other indicators. In this connection, this data should be considered as approximate, especially being taken from reference sources. For this reason, the research workers of the Institute of engineering support of agriculture – branch of FSAC VIM have developed region-based mathematical models of calculation of nutrients dosages for the major crops of Central Russia on the basis of multiannual experimental data of the Federal Research Center «Nemchinovka» and data obtained from field experiments conducted by the Geographic Network of the All-Russian Scientific Research Institute of Agrochemistry. The novelty of the developed mathematical models lies in considering all the known sources of macronutrients supply in soil solution, put in the basis of aggregate variables (algebraic sum of variables) for determining parameters of nitrogen, phosphorous and potassium nutrition for crops. The developed method for calculating nutrients dosages is based on crop yield forecasting. Time-base exponential trend, calculated from the statistical data of the actual crop yields for 15–20 years, is used for the analysis of crop productivity in agricultural enterprises. The developed mathematical models can be used for forming rational fertilizer systems in agricultural enterprises of Central, Northwestern, Volga-Vyatka economic regions, and also in northern areas of Central Black Earth Region and western areas of Priuralsky District.

Key words: plant mineral nutrition, mathematical models, calculation of fertilizer dosages.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПО РАЦИОНАЛЬНОМУ ФОРМИРОВАНИЮ СИСТЕМ УДОБРЕНИЯ

**Митрофанов С.В., Благов Д.А., Новиков Н.Н.,
Никитин В.С., Панферов Н.С., Белых С.А.**
Институт технического обеспечения сельского хозяйства –
филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения
«Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», г. Рязань

Аннотация. В статье приводится краткий анализ методов, используемых для расчета доз элементов питания сельскохозяйственных культур. В результате анализа выявлен ряд их недостатков: отсутствие учета предшественников в севообороте, степени окультуренности почвы, расчет доз элементов питания по усредненным агрохимическим показателям почв

сельскохозяйственных предприятий, что существенно влияет на коэффициент использования питательных элементов растениями из почвы и удобрений, а также ряда других показателей. В связи с чем, существующие методы нужно рассматривать как ориентировочные, особенно если они берутся из справочных источников. Ввиду этого учеными ИТОСХ – филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ на основе многолетних опытных данных ФГБНУ «Московский НИИСХ «Немчиновка» и полевых опытов Географической сети ФГБНУ «ВНИИ агрохимии» разработаны зональные математические модели расчета доз элементов питания основных сельскохозяйственных культур Центрального региона России. Отличие разработанных математических моделей от традиционных заключается в том, что в них учтены все известные источники поступления макроэлементов в почвенный раствор, а на их основе сформированы агрегированные переменные (алгебраические суммы переменных) для определения параметров азотного, фосфорного и калийного питания сельскохозяйственных растений. Разработанная методика расчета доз элементов питания базируется на определении прогнозируемой урожайности сельскохозяйственных культур. Для анализа урожайности в сельскохозяйственных предприятиях используется временной экспоненциальный тренд, рассчитываемый по статистическим данным фактических урожаев за 15–20 лет. Разработанные математические модели могут быть использованы для рационального формирования систем удобрений в сельскохозяйственных предприятиях Центрального, Северо-Западного, Волго-Вятского экономических районов, а также в северных районах ЦЧО и западных районов Приуралья.

Ключевые слова: минеральное питание растений, математические модели, расчеты доз удобрений.

В современной земледелии ведущая роль в повышении урожайности сельскохозяйственных культур отводится химикотехногенным факторам. Для формирования высоких и устойчивых урожаев, сохранения физико-химических свойств и биогенности почв необходимо поддерживать бездефицитный баланс гумуса.

Однако почти половина энергетических затрат на производство сельскохозяйственной продукции приходится на удобрения, в первую очередь минеральные. Проблема эффективного использования удобрений всегда была актуальной, а в условиях трансформации земельных отношений, одной из характеристик которой стал диспаритет цен, она приобрела особую значимость [1, 2].

На практике аграрии, занимающиеся возделыванием различных сельскохозяйственных культур, не всегда могут получить запланированную урожайность, так как очень сложно учесть ряд критических факторов. Поэтому при разработке систем удобрения в хозяйстве необходимо внедрять технологии, позволяющие обеспечивать планируемые урожаи хорошего качества, при одновременном повышении или сохранении достигнутого уровня плодородия почв [3].

Материалы и методы. Объектом исследований являются методы расчета доз элементов питания для сельскохозяйственных культур. Исследования проводились с использованием аналитического, математического и статистического методов.

Результаты исследований. Оптимизация применения удобрений в процессе вегетации растений является одним из ключевых факторов научного земледелия, позволяющим реализовать продуктивность, заложенную в данном виде или сорте растения. По данным исследований половина прироста сельскохозяйственной продукции на сегодняшний день зависит от применения удобрений. При этом одной из основных задач является использование всевозрастающих объемов удобрений с точки зрения агрономии, экологии и экономики с максимальной отдачей [6].

На сегодняшний день в арсенале агрохимической и агрономической науки существует множество применяемых методов по расчету элементов питания сельскохозяйственных культур. Однако при расчете доз удобрений на планируемый урожай культуры чаще всего используется **метод балансового расчета**. Данный метод имеет широкое распростра-

нение. При его использовании всегда можно уточнить коэффициенты использования питательных веществ из почвы, органических и минеральных удобрений, перевод содержания подвижных питательных элементов [1].

Рассматриваемый метод часто используется с различными модификациями и дополнениями, но суть его не меняется – определяется потребность растений в питательных элементах, содержание их в почве в доступной для растений форме, коэффициенты использования веществ из почвы и удобрений. Точность данного метода зависит от точности вышеперечисленных данных. Они существенно варьируются в зависимости от свойств почв, погодных условий, доз и форм удобрений, срока и способа внесения и прочих факторов.

Ряд исследователей считают более лучшим балансовый расчет потребности в удобрениях с учетом планируемой прибавки урожая. При данном расчете необходимо знать урожай культуры, получаемый на данном поле без внесения удобрений, т.е. исходя из естественного плодородия почвы. Данный расчет также является ориентировочным, так как для его применения не требуется знать коэффициент использования питательных элементов из почвы, однако данный коэффициент может также существенно варьироваться в зависимости от многих условий, описанных выше.

При расчёте доз удобрений на планируемый урожай или его прибавку необходимо учитывать степень удобренности предшествующей культуры, с целью учета пролонгированного действия удобрений. Если предшествующие культуры возделывали на удобренных почвах, то к питательным элементам данных почв необходимо прибавить последствие ранее внесенных удобрений из расчета 10 – 15% исходного количества в них действующего вещества.

В описанных выше методах расчет доз удобрений производится с опорой на естественное плодородие почв, удобрения при этом лишь восполняют то количество питательных элементов, которое невозможно получить из почвы. В данных методах не предусматривается не только возможность систематического повышения уровня плодородия почвы, но и восполнения питательных веществ, ранее израсходованных на формирование урожая элементов почвы.

Существуют также ряд других методов, например метод Михайлова Н.Н., *метод определения действительно возможного урожая* (ДВУ) по содержанию питательных веществ в почве, комплексный метод аналитической листовой диагностики (КМАЛД) Болдырева Н.К. и др. [1, 6].

На практике в работе станций агрохимических служб используются балансовые методы. Их недостатками являются: отсутствие учета предшественников в севообороте, степени окультуренности почвы, расчет доз удобрений по усредненным агрохимическим показателям почв сельскохозяйственных предприятий, что существенно влияет на коэффициент использования питательных элементов растениями из почвы и удобрений, а также ряда других показателей. В связи с чем, их необходимо оценивать как ориентировочные, если они берутся из справочных источников.

Использование же методов аналитической листовой диагностики Н.К. Болдырева сложно применить с практической точки зрения.

Ввиду этого учеными ИТОСХ – филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ на основе многолетних опытных данных ФГБНУ «Московский НИИСХ «Немчиновка» и полевых опытов Географической сети ФГБНУ «ВНИИ агрохимии» разработаны математических модели расчета доз элементов питания основных сельскохозяйственных культур Центрального региона России. В отличие от представленных выше методов, в данных моделях учитываются все известные источники поступления элементов питания в почвенный раствор, а на их основе сформированы агрегированные переменные для расчета доз удобрений под планируемую урожайность сельскохозяйственных культур.

Разработанная методика расчета доз элементов питания базируется на определении прогнозируемой урожайности сельскохозяйственных культур. Для анализа урожайности в

сельскохозяйственных предприятиях используется временной экспоненциальный тренд, рассчитываемый по статистическим данным фактических урожаев за 15–20 лет [4, 5].

Однако эти статистические данные не дают объективных данных по прогнозу урожайности, так как являются зависимыми от ряда факторов, в первую очередь климатических.

Сотрудниками ИТОСХ – филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ собран массив данных агрохимических полевых опытов на разных типах (подтипах) почв, на основе которого сформирована методика прогноза урожайности, основными элементами которой выступили элементы питания, оказывающие наибольшее влияние на урожайность: азот, фосфор, калий, кислотность.

Расчет прогноза по содержанию азота, фосфора, калия осуществляются по уравнению:

$$Y_{N,P,K} = \frac{A_1 X_1 (1 + X_2)}{1 + A_2 X_1 + A_3 X_1 X_2}, \quad (1)$$

где $Y_{N,P,K}$ – прогноз урожайности, ц/га;

X_1 – гумус почвы (из данных агрохимического обследования), т/га;

X_2 – агрегированная переменная, включающая все основные источники поступления азота, фосфора, калия в почву (из нормативно-справочной информации);

A_1, A_2, A_3 – коэффициенты уравнения.

Расчет прогноза урожайности по рН солевой вытяжки:

$$Y_{pH} = \frac{Y_{\max}}{1 + A e^{-B \cdot pH}}, \quad (2)$$

где Y_{pH} – прогноз урожайности, ц/га;

Y_{\max} – максимально возможная урожайность с.-х. культуры, ц/га;

e – основание натурального логарифма;

A, B – коэффициенты уравнения, полученные в процессе оценки параметров;

pH – кислотность почвы (из данных агрохимического обследования).

В итоге за прогноз урожайности в соответствии с законом минимума принимается наименьшая из рассчитанных урожайностей.

Используя данную методику можно рассчитать прогноз урожайности для основных сельскохозяйственных культур, учитывая производственные и экономические условия конкретного хозяйства, его специфику. Расчеты производятся по четырем вариантам: без внесения удобрений; с внесением только удобрений; с внесением минеральных удобрений; с внесением органических и минеральных удобрений. При этом учитываются коэффициенты влияния предшествующих культур в севообороте на урожайность сельскохозяйственной культуры.

Для расчета доз минеральных удобрений были выделены источники поступления макроэлементов, которые в последующем послужили основой агрегированных переменных.

Адаптивная производственная модель почвенного питания растений представляет аппроксимирующее уравнение:

$$Y = \frac{A_1 X_1 (1 + X_2)}{1 + A_2 X_2 + A_3 X_1 X_2}, \quad (3)$$

где Y – урожайность, ц/га;

X_1 – гумус почвы (из данных агрохимического обследования), т/га;

X_2 – агрегированная переменная, сумма элементов питания, поступающих в почву, учитывающая все известные источники (из нормативно-справочной информации);

A_1, A_2, A_3 – коэффициенты уравнения, полученные в процессе оценки параметров аппроксимирующей функции.

Расчет почвенного питания по азоту, фосфору и калию использовался для 3-х категорий почв: дерново-подзолистые супесчаные, светло-серые лесные супесчаные, серые лесные супесчаные; дерново-подзолистые суглинистые, светло-серые лесные суглинистые, серые лесные суглинистые; черноземы и темно-серые лесные суглинистые с гумусом более 3%.

В основе математической модели азотного питания лежит метод регрессионного анализа. Исследовалась зависимость изменения урожайности сельскохозяйственных культур от полового фактического запаса биологического азота почвы в виде экспоненциального уравнения:

$$\ln N = \ln N_{\max} [1 - e^{-(a_0 + a_1 \ln Y)}], \quad (4)$$

где Y – урожайность сельскохозяйственной культуры, ц/га;

N_{\max} – максимальное содержание азота, кг/га;

a_0, a_1 – коэффициенты уравнения;

\ln – натуральный логарифм;

e – основание натурального логарифма;

N – азот фактический, который включает в себя перечисленные источники поступления азота для питания сельскохозяйственных культур, кг/га: азот гумуса; азот почвенного раствора; азот свободноживущих бактерий; азот соломы (ботвы), сидерата предшественника; азот пожнивно-корневых остатков предшественника; азот клубеньковых бактерий; азот семян; азот осадков.

Азот гумуса вычисляется на основе уравнения баланса гумуса и коэффициентов K_5, K_{11}, K_{12} , определяющих минерализацию гумуса. Минерализация гумуса устанавливается не только в год выращивания сельскохозяйственной культуры: часть минерализованного гумуса учитывается от предшествующего года.

Количество минерализованного гумуса для культур сплошного сева определяется следующим образом:

$$N_q = 25K_5 + 25K_{5 \text{ предш.}}/2. \quad (5)$$

Для пропашных культур и чистого пара формула имеет вид:

$$N_q = 25K_{11} + 25K_{11,12 \text{ предш.}}/2, \quad (6)$$

где N_q – азот, минерализуемый из гумуса, кг/га;

$K_5, K_{5 \text{ предш.}}, K_{11}, K_{12 \text{ предш.}}$ – коэффициенты уравнения баланса гумуса.

Азот почвенного раствора определяется с помощью уравнения:

$$A_n = a_n + b_n(VSHR), \quad (7)$$

где A_n – азот почвенного раствора, кг/га;

V – объемная масса почвы, т/м³;

S – площадь га пашни, м²;

H – глубина пахотного горизонта, м;

R – содержание гумуса в пахотном горизонте, %;

a_n, b_n – коэффициенты уравнения, для каждой n -й группы почв.

Содержание азота в навозе определяется по формуле:

$$N_{\text{орг.}} = 10NP, \quad (8)$$

где $N_{\text{орг}}$ – азот органического вещества (навоза), кг/га;
 N – содержание азота в органическом удобрении, %;
 P – вес органического удобрения, т;
 10 – коэффициент пропорциональности.

Азот свободноживущих бактерий рассчитывается основе уравнения:

$$\text{Ln}N_{\text{св.жив.}} = 0,5\text{Ln}N_{\text{max}}[1 - e^{-(a+b\text{Ln}S_g)}], \quad (9)$$

где S_g – запас гумуса в пахотном горизонте, т/га;
 N_{max} – максимальное значение азота свободноживущих бактерий – 100 кг/га;
 a, b – коэффициенты уравнения для каждой группы почв;
 Ln – натуральный логарифм;
 e – основание натурального логарифма.

Азот соломы предшественника определяется по формуле:

$$N_c = 0,425UR_s K_{s1} K_{s2}/100, \quad (10)$$

где N_c – азот соломы предшественника, кг/га;
 UR_s – урожай основной продукции предшественника, ц/га;
 K_{s1} – масса соломы или ботвы на 1 ц основной продукции, кг;
 K_{s2} – содержание азота в соломе, ботве, %;
 $0,425$ – коэффициент использования азота, накопленного предшественником.

Азот сидерата предшественника рассчитывается по формуле:

$$N_{\text{сидерата}} = 0,5UR_s K_{s2}/100, \quad (11)$$

где $N_{\text{сидерата}}$ – азот сидерата предшественника, кг/га;
 UR_s – урожай зеленой массы сидерата, ц/га;
 K_{s2} – содержание азота в зеленой массе, %;
 $0,5$ – коэффициент использования азота сидерата для растений в течение сезона.

Азот пожнивно-корневых остатков предшественника определяется по формуле:

$$N_k = 0,5UR_p K_{p1} K_{p2}/100, \quad (12)$$

где N_k – азот пожнивно-корневых остатков предшественника;
 UR_p – урожай основной продукции предшественника, кг/га;
 K_{p1} – масса пожнивно-корневых остатков на 1 ц- основной продукции, кг;
 K_{p2} – содержание азота в сухом веществе, %;
 $0,5$ – коэффициент использования азота пожнивно-корневых остатков для возделываемой культуры.

Чтобы определить азот клубеньковых бактерий (предшественника), вначале вычисляется его содержание в соломе (ботве) и пожнивно-корневых остатках.

Для однолетних бобовых культур:

$$N_{\text{одн.}} = 0,45(N_{\text{сол.}} + N_{\text{корн.}}), \quad (13)$$

для многолетних бобовых культур:

$$N_{\text{мн.}} = 0,55(N_{\text{сол.}} + N_{\text{корн.}}), \quad (14)$$

где $N_{\text{одн.}}$ – азот однолетних бобовых клубеньковых бактерий (предшественника), кг/га;
 $N_{\text{мн.}}$ – азот многолетних бобовых клубеньковых бактерий (предшественника), кг/га;
 $N_{\text{сол.}}$ – азот соломы, кг;
 $N_{\text{корн.}}$ – азот пожнивно-корневых остатков,

Азот, синтезируемый клубеньковыми бактериями (основной культуры) вычисляется с использованием уравнений (23) и (24).

Азот семян (N_c) рассчитывается по формуле:

$$N_c = H N_{\text{сц}}, \quad (15)$$

H – норма высева, ц/га;

$N_{\text{сц}}$ – содержание азота в семенах.

Азот осадков N_o – 9 кг/га.

Расчет потребности в минеральных удобрениях по основным сельскохозяйственным культурам производится под планируемую урожайность культуры (Y) на основе уравнения (5) вычисляется расчетный запас азота (N_p).

На следующем этапе вычисляется доза минеральных удобрений как разность между запасом азота расчетным (N_p) и ом азота фактическим ($N_{\text{ф}}$) включающим в себя все перечисленные выше известные источники поступления азота:

$$N_{\text{мин.уд.}} = N_p - N_{\text{ф}}, \quad (16)$$

где $N_{\text{мин.уд.}}$ – доза удобрений действующего вещества, кг/га;

N_p – азот расчетный, кг/га;

$N_{\text{ф}}$ – азот фактический, кг/га.

Расчет доз элементов питания для других культур, которые относятся к тем же группам, что и основные сельскохозяйственной культуры, производится следующим образом: вычисляется доза азотных удобрений (D_1) для 1ц продукции основной сельскохозяйственной культуры по формуле:

$$D_1 = N_{\text{мин.уд.}} / Y, \quad (17)$$

где Y – урожайность, ц/га.

Доза азота (D) под конкретную культуру вычисляется по формуле:

$$D = D_1 K_0 Y, \quad (18)$$

где K_0 – соотношение выноса азота в расчете на 1ц рассчитываемой продукции и выноса азота в расчете на 1ц основной рассчитываемой культуры.

Расчет почвенного фосфорного и калийного питания производится аналогично, как и азотного, с учетом замены отдельных показателей содержания фосфора и калия в различных средах.

Заключение. Разработанные математические модели позволят специалистам сельскохозяйственных предприятий при планировании урожайности сельскохозяйственных культур рационально формировать систему удобрения, что обеспечит оптимальное питание выращиваемых культур в хозяйствах Центрального, Северо-Западного, Волго-Вятского экономических районов, а также в северных районах ЦЧО и западных районов Приуралья.

Библиографический список

1. Агрохимия: Классический университетский учебник для стран СНГ. Под ред. В.Г. Минеева. – М.: Изд-во ВНИИА имени Д.Н. Прянишникова, 2017. – 854 с.
2. Вильдфлуш И.Р. Рациональное применение удобрений: Пособие // Горки: Белорусская государственная сельскохозяйственная академия, 2002. – 324 с.
3. Минеев В.Г. Агрохимия: учеб. пособ. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: МГУ, 2004. – 720 с.
4. Митрофанов С.В. Программный комплекс по прогнозированию урожайности основных сельскохозяйственных культур центрального региона России / С.В. Митрофанов,

В.С. Никитин, С.А. Белых, Д.А. Благов, В.Б. Любченко // Техника и оборудование для села. – 2018. – № 8. – С. 41–43.

5. Никитин В.С. Математическая модель динамики гумуса почв Нечерноземной зоны Центрального региона РФ / В.С. Никитин, В.Б.Любченко // Проблемы механизации агрохимического обеспечения сельского хозяйства. – 2015. – № 7. – С. 134–138.

6. Романенко Г.А. Удобрения. Значение, эффективность применения: справоч. пособие. – М.: ЦИНАО, 1998. – 376 с.

INFORMATION MODEL OF THE FODDER BASE DEVELOPMENT

Novikov N.N., Nikitin V.S., Blagov D.A., Mitrofanov S.V., Panfyorov N.S.,
Institute of engineering support of agriculture – branch of the Federal State Budgetary Scientific
Institution “Federal Scientific Agroengineering Center VIM”

Abstract. Agricultural science and farming have accumulated considerable experience in improving livestock production. However, it is usually insufficient for providing an integrated approach and applied at the level of particular farming enterprises.

The developed computer system provides interrelation between different aspects of crop and livestock production with adaptation to the conditions of the farm and implementation of the latest achievements in agricultural science and farming technologies in planning the fodder base.

The system encompasses the necessary objectives sets, grouped into two interrelated blocks.

The developed software package enables a user to carry out multivariate calculations, which provide the most efficient use of lands and material resources on the basis of an integrated approach to the development of fodder base, considering environmental, economic, organizational and technological factors, and also achievement of the given numerical indicators not only for the particular farming enterprise, but also for the whole district, oblast, region.

Keywords: software package, mathematical model, database, fertilizers, crop rotation, ration, fodder.

ИНФОРМАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОРМОВОЙ БАЗЫ

Новиков Н.Н., Никитин В.С., Благов Д.А., Митрофанов С.В., Панферов Н.С.,
ИТОСХ – филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ «Институт технического обеспечения
сельского хозяйства – филиал»

Аннотация. В настоящее время сельскохозяйственной наукой и практикой накоплен значительный опыт по повышению продуктивности животноводства. Однако, как правило, носит фрагментарный характер без комплексного подхода, а внедряется лишь на отдельных сельскохозяйственных предприятиях.

Разработанная компьютерная система, обеспечивает взаимосвязь вопросов животноводства и растениеводства с адаптацией к конкретным условиям хозяйства и использованием новейших достижений аграрной науки и практики при планировании кормовой базы.

Система включает необходимые комплексы задач, которые объединяются в два взаимосвязанных блока.

Разработанный программный комплекс позволяет делать многовариантные расчеты, обеспечивающие наиболее рациональное использование земельных площадей и материальных ресурсов на основе комплексного подхода к проектированию кормовой базы с учетом природных, организационно-экономических и технологических факторов, а также выход на конкретные