

УДК 519.711.2:631.416.1

КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ СОДЕРЖАНИЯ АЗОТА В КОРНЕОБИТАЕМОМ СЛОЕ ПОЧВЫ*

© 2010 г. Р.А. Полуэктов, В.В. Терлеев

Агрофизический научно-исследовательский институт РАСХН
195220 Санкт-Петербург, Гражданский просп., 14, Россия
E-mail: Vitaly_Terleev@mail.ru

Поступила в редакцию 30.12.2009 г.

Компьютерная модель 2-го уровня продуктивности сельскохозяйственных растений, описывающая динамику формирования урожая при лимитировании почвенной влагой, дополнена программным модулем трансформации, переноса и поглощения азота в почве. Этот модуль включает описание сезонной динамики органического вещества почвы (гумуса) и растительных остатков), а также процессов трансформации органических и минеральных соединений азота, поглощения аммония и нитратов корневой системой растений и конвективно-диффузионный перенос нитратов по почвенному профилю. Интегрирование модуля динамики содержания азота с динамической моделью продукционного процесса растений переводит ее в класс моделей 3-го уровня продуктивности, т.к. позволяет учесть влияние на этот процесс дефицита азота в почве и обеспечивает возможность управления режимом минерального питания растений.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, динамика содержания, азот, почва, корнеобитаемый слой.

ВВЕДЕНИЕ

Исследование процессов трансформации, переноса и поглощения азота в корнеобитаемом слое почвы, а также изучение влияния этих процессов на агрохимическое состояние почвы и формирование урожая сельскохозяйственных растений представляют существенный интерес для теории и практики современного, в том числе точного, земледелия. Количественное описание динамики содержания азотсодержащих соединений в почвенно-растительном комплексе по терминологии, представленной в работе [1], относится к моделям 3-го уровня продуктивности агроэкосистем, следуя за описанием лимитирования урожая: а) фотосинтетически активной радиацией, приходящей к посеву (посадкам) полевых культур (модели 1-го уровня продуктивности), б) недостаточной или избыточной влагообеспеченностью растений (модели 2-го уровня продуктивности). Необходимо отметить, что в соответствии с данной терминологией количественное описание лимитирования урожая величиной содержания фосфора и калия относится к моделям 4-го уровня продуктивности агроэко-

систем. В данной статье приведены результаты построения модели динамики содержания азота в корнеобитаемом слое почвы, а ряд проблем обмена, переноса и поглощения фосфора и калия в почве авторы ранее рассмотрели в предыдущих работах [2, 3].

Исследования и моделирование динамики содержания почвенного азота вызывают значительный интерес. Например, в работе [4] детально рассмотрены почвенные физико-химические процессы с участием азотсодержащих соединений, однако в этом случае автор ограничился лишь формальным описанием задачи, не представив ее алгоритмического решения и компьютерной реализации модели. Особого внимания заслуживают результаты разработки компьютерных моделей динамики содержания азота, приведенные в работах [5–8]. Данные модели адаптированы к почвенно-климатическим условиям стран Западной Европы. Как показал опыт их практического использования, большинство таких моделей не обеспечивают требуемой точности агрохимических расчетов в условиях России вследствие значительного различия почвенно-климатических условий в нашей стране и за рубежом.

* Работа выполнена при поддержке DAAD, DFG, РФФИ (грант 09-05-00415-а).

Агрофизический институт Россельхозакадемии (АФИ) в течение нескольких лет проводит исследования принципов точного земледелия и выполняет работы по созданию, калибровке и подробной проверке (с использованием данных из различных почвенно-климатических зон РФ) семейства компьютерных динамических моделей 2-го уровня продуктивности, объединенных в систему имитационного моделирования **AGROTOOL**, v.3 [9]. К настоящему времени эта система пополнилась новой усовершенствованной моделью, интегрированной с программным модулем, в котором осуществляется расчет динамики содержания азотсодержащих соединений в почвенно-растительном комплексе, что позволяет отнести данную модель к моделям 3-го уровня продуктивности. Цель работы – создание программного продукта, который может быть эффективно использован для проведения в рамках компьютерного эксперимента исследований динамики содержания азотсодержащих соединений в почве и растениях, включая оценку влияния азотных удобрений на агрохимическое состояние почвы и процессы формирования урожая полевых культур, а также для обоснования агротехнологических решений с учетом их экологической допустимости и рационального использования земельных ресурсов.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Компьютерная модель 3-го уровня продуктивности агроэкосистемы в рамках системы имитационного моделирования **AGROTOOL**, v.3 [9] создана путем включения в нее дополнительного модуля **NITBAL**, осуществляющего расчет динамики содержания соединений азота в почвенно-растительном комплексе. Для программного кодирования использован алгоритмический язык Turbo Pascal. Перечень основных параметров приведен в табл. 1, блок-схема модуля **NITBAL** представлена на рис. 1.

Алгоритмическая реализация модели означает, что исходной непрерывной системе дифференциальных уравнений, описывающих исследуемые процессы, сопоставлен соответствующий дискретный аналог. Для этого введена дискретизация по времени и пространству. Временной шаг модели выбран продолжительностью в 1 сут. Пространственная дискретизация в вертикальном направлении организована следующим образом: верхняя и нижняя границы рассматриваемой части почвенного профиля находятся на поверхности почвы и на глубине 100 см соответственно; в свою очередь, вся исследуемая толща почвы разделена на

Таблица 1. Параметры модуля **NITBAL**

Параметр	Величина параметра [6]	Размерность
Содержание углерода в гумусе	0.58	б/р
Содержание углерода в растительных остатках	0.45	б/р
Отношение C:N в гумусе	18	б/р
Отношение C:N в растительных остатках	30	б/р
Отношение C:N в микробной биомассе	10	б/р
Скорость разложения органического углерода	$21.0 \cdot 10^{-5}$	1/сут
Скорость разложения органического азота	0.035	1/сут
Скорость нитрификации	8.0	1/сут
Коэффициент гумификации	0.02	б/р
Коэффициент денитрификации	0.2	кг/га/сут
Константа Михаэлиса–Ментен для денитрификации	10	мг/л
Коэффициент дыхания микробов	0.5	б/р
Скорость сухого выпадения азота	0.1	кг/га/сут
Скорость выпадения азота с атмосферными осадками	0.8	мг/л
Коэффициент извилистости почвенных пор	0.2	б/р
Коэффициент диффузии нитратов	2.0	см ² /сут
Коэффициент гидродинамической дисперсии	2.0	см

Примечание. б/р – безразмерная величина.

10 расчетных слоев одинаковой мощности. Такая пространственная дискретизация обусловлена тем, что измерения в условиях полевого опыта следуют схеме послонного отбора почвенных образцов с интервалом 10 см. Предполагается, что азот из атмосферы и минеральных удобрений поступает только в верхний слой 0–20 см почвы (пахотный горизонт).

Содержание гумуса в почве, измерения которого, как правило, проводят лишь в пахотном горизонте, в модели принято одинаковым в двух верхних слоях почвы, в следующих слоях предполагается его экспоненциальное уменьшение с глубиной (до 50 см). Кроме того, считается, что растительные остатки (перепаханная стерня, измельченная ботва и про-

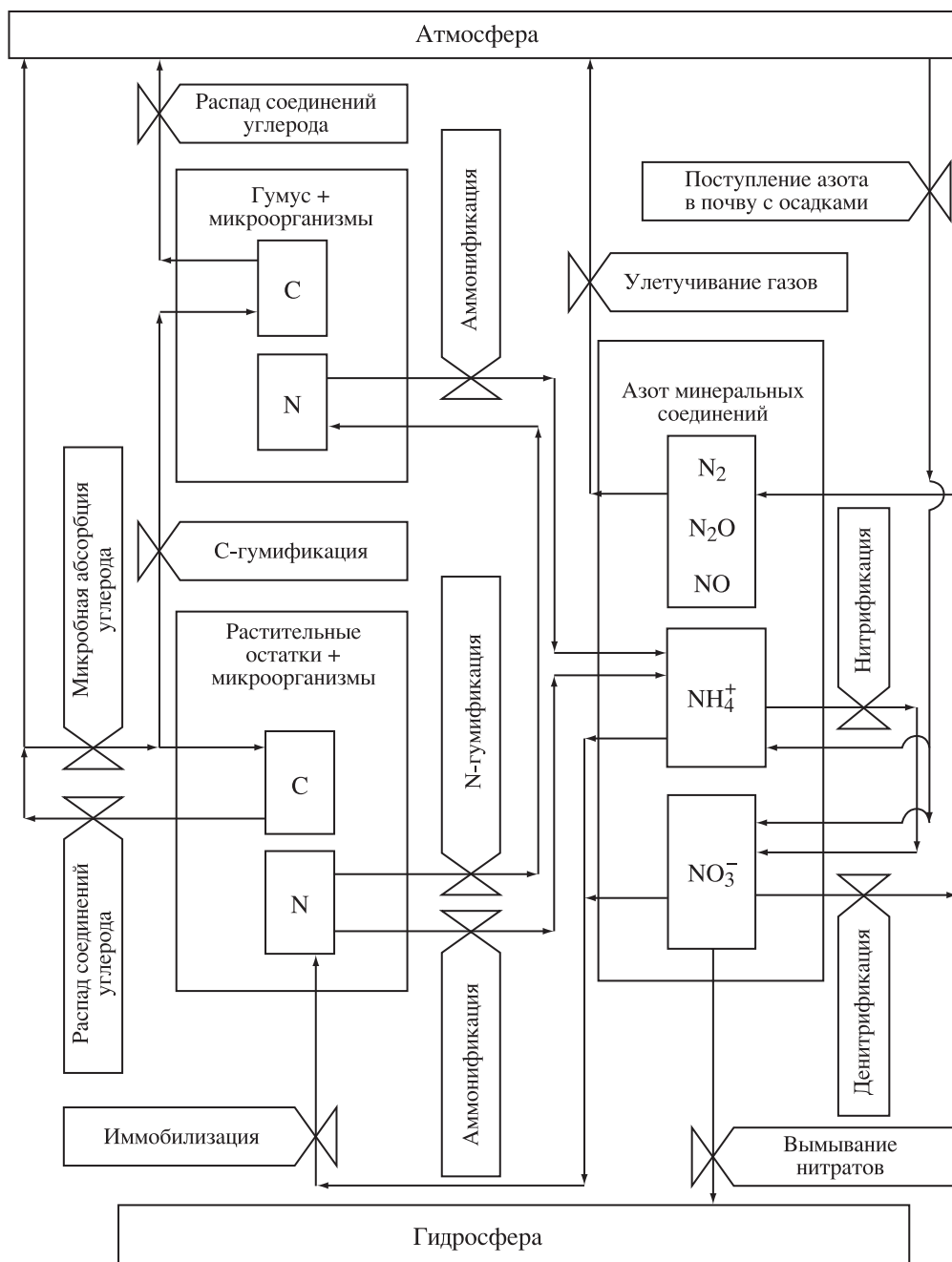


Рис. 1. Принципиальная блок-схема модуля NITBAL (перечень описываемых процессов).

чие послеуборочные остатки) также равномерно распределены по глубине пахотного горизонта (0–20 см). Что же касается корневых остатков предыдущего года, то их распределение по почвенному профилю задается, исходя из конечных результатов расчета за этот период. Все перечисленные составляющие образуют начальное условие модели, которое всегда необходимо задавать для инициализации вычислительного процесса.

Все биохимические реакции с участием органического вещества почвы описаны уравнениями кинетики 1-го порядка. По отношению к углероду, например, для описания минерализации гумуса в i -м слое почвы в модели использовано уравнение

$$\frac{dC(i)}{dt} = -c_h F_w F_T C(i), \quad (1)$$

где c_h – константа реакции, а F_w и F_T – функции, соответственно учитывающие относительное вли-

яние влажности и температуры почвы на скорость минерализации. Все остальные реакции описаны аналогичным образом. Функция F_w (кроме денитрификации) имеет вид:

$$F_w = \begin{cases} 0, & w \leq a, \\ 1 - (w - b)^2 / (a - b)^2, & a \leq w \leq b, \\ 1, & b \leq w \leq c, \\ 1 - (w - c)^2 / (d - c)^2, & c \leq w \leq d, \end{cases} \quad (2)$$

где w – объемная влажность почвы в расчетном слое, $\text{см}^3/\text{см}^3$; a – влажность завядания, $\text{см}^3/\text{см}^3$; $b = 0.7 \cdot c$, $\text{см}^3/\text{см}^3$; c – наименьшая влагоемкость почвы, $\text{см}^3/\text{см}^3$; d – полная влагоемкость почвы, $\text{см}^3/\text{см}^3$. Для процесса денитрификации эта функция представлена следующим образом:

$$F_w^d = \begin{cases} 0, & w \leq c, \\ (w - d)^2 / (c - d)^2, & w \geq c, \end{cases} \quad (3)$$

Зависимость скорости биохимической реакции от температуры описана обычной степенной функцией с коэффициентом Q_{10} , равным 2, и опорной температурой 25°C . Расчет величин аммонификации, нитрификации, денитрификации, иммобилизации аммония и нитратов, а также гумификации, протекающих в каждом из расчетных слоев почвы, в модели осуществляется независимо. Условие материального баланса, учитывающее взаимосвязь этих процессов во всей рассматриваемой толще почвы (0–100 см), сформулировано уравнением конвективно-диффузионного переноса нитратов по почвенному профилю. Решение данного уравнения достигнуто путем численного интегрирования соответствующего дифференциального уравнения в частных производных по стандартной схеме [10]. При этом поток нитратов из нижнего расчетного слоя – это их вымывание (перколяция) за пределы рассматриваемой части почвенного профиля.

Особое внимание было уделено процессу поглощения нитратов и аммония корневой системой растений. Действительно, только расчет этого процесса осуществляет связь азотного модуля с другими “биотическими” программными компонентами модели. Этот расчет выполняется в несколько этапов. Во-первых, в каждом слое почвы и на каждом временном шаге содержание азота минеральных соединений (в $\text{кг}/\text{га}$) пересчитывается в его концентрацию в почвенном растворе (в $\text{мг}/\text{л}$). Для этого используется величина объемной влажности каждого корнеобитаемого слоя почвы, которая рассчитывается в “абиотическом” программном компоненте модели. Предполагается, что скорость поглощения

аммония и нитратов единичной поглощающей поверхностью корней из слоя i подчиняется уравнению Михаэлиса–Ментен:

$$v_N(i) = V_{\max} \frac{C_N(i)}{K_N + C_N(i)}, \quad (4)$$

где $C_N(i)$ – содержание азота минеральных соединений в i -м слое почвы; K_N – константа Михаэлиса–Ментен; $v_N(i)$ и V_{\max} – соответственно скорость поглощения азота и ее максимальное значение, $\text{мг}/(\text{см}^2 \cdot \text{сут})$. При этом полагается, что аммоний и нитраты поглощаются в количестве, пропорциональном их содержанию в почвенном растворе. Далее следует пересчитать эту скорость на всю поглощающую поверхность корней в слое почвы и просуммировать по слоям:

$$v_{\text{sum}} = \sum_{i=1}^{N_R} K_R B_R(i) v_N(i), \quad (5)$$

где $B_R(i)$ – биомасса корней в i -м слое почвы; K_R – поглощающая поверхность единицы биомассы корней; v_{sum} – суммарное количество азота, поглощенного всей корневой системой растений за очередные сутки счета, $\text{кг}/(\text{га} \cdot \text{сут})$; N_R – общее число слоев почвы, занятых корнями. Этим завершается описание процессов, расчет которых осуществляется в модуле *NITBAL*.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Динамическая модель, реализованная в виде программного продукта, первоначально содержит ряд неизвестных параметров, которым должны быть приданы определенные величины, отражающие специфику места и культивируемых сортов. Этот процесс настройки модели называется ее параметрической идентификацией. В нашем случае модель содержит параметры двух видов:

- константы, взятые из литературы,
- т.н. “настроенные” константы.

К первой группе относятся все данные, помещенные в табл. 1. Для определения этих конкретных величин должна быть использована специальная экспериментальная информация. В частности, это касается отношения C:N в гумусе, растительных остатках и микробной биомассе. Этот показатель определяется агрохимическим состоянием почвы, а также особенностями возделываемой культуры и предшественника. Вторую группу составляют величины, управляющие поглощением корнями азота.

Для параметрической идентификации модели использованы экспериментальные данные многолетнего (с 1982 г.) полевого опыта Меньковской опытной станции (МОС). Станция расположена в Гатчинском р-не Ленинградской обл. (59°25'22" с.ш. 30°01'55" в.д.). Опыт проводят с культурами семипольного зернопропашного севооборота (многолетние травы 1-го года пользования–многолетние травы 2-го года пользования–картофель–яровой ячмень–занятый пар–озимая рожь–однолетние травы с подсевом многолетних трав), возделываемыми на дерново-подзолистой супесчаной почве с содержанием гумуса 3.3–5.2 %. В ходе полевого опыта в почву вносили удобрения: N_{aa} (34.6% N); P_{cr} (20% P_2O_5), ДАФ (18% N, 50% P_2O_5), K_c (44% K_2O). Варьируемым фактором в опыте является доза минеральных удобрений, соответствующая трем вариантам опыта: 0 – контроль без удобрений, N45P45K60 – одинарная доза и N90P90K120 – двойная доза. Органические удобрения в данном конкретном опыте не применяли.

Для параметрической идентификации модели выбраны культуры: яровой ячмень, озимая рожь и картофель. Первоначально на качественном уровне уточнены некоторые параметры, входящие в табл. 1. Основная процедура идентификации заключалась в определении величин, входящих в соотношение (4). Действительно, как уже указано, интенсивность поглощения азота корнями – это величина, которая связывает азотный модуль с другими “биотическими” программными компонентами модели, определяющими продуктивность посева (посадки). В 1998 г. в работе [11] сформулирован механизм, который способен описать влияние дефицита азота на продукционный процесс растений. Согласно этому механизму, при дефиците почвенного азота и избытке продуктов фотосинтеза (первичных ассимилятов) большая их часть транспортируется в корни. Благодаря этому корни развиваются более интенсивно в ущерб надземным органам, что приводит к снижению интенсивности фотосинтеза и уменьшению урожая. При избытке азота по сравнению с первичными ассимилятами, картина изменяется на противоположную. Корни развиваются слабо, надземная часть (в том числе и фотосинтезирующие органы) возрастает, что, в конечном счете, приводит к росту урожая. Эта идея реализована в системе AGROTOOL, v.3, в которую включена разработанная модель динамики содержания азота в почвенно-растительном комплексе [12]. Это обеспечило возможность учета в модели влияния минеральных (азотных) удобрений на величину отношения надземная часть растений : корни (shoot : root), а через это отношение – и на конечный урожай. В процессе идентификации параметров модели за-

пись скорости поглощения азота в виде уравнения Михаэлиса–Ментен оказалась недостаточной. Она не обеспечила соответствия экспериментальных и расчетных величин урожая во всех трех вариантах опыта. Поэтому зависимость (4) была модифицирована и приведена к виду:

$$v_N(i) = V_{\max} \frac{C_N(i) - a}{(1 + \beta(C_N(i) - a))}. \quad (6)$$

Поясним смысл этого соотношения. Коэффициент β – это величина, обратная константе Михаэлиса–Ментен. Она не меняет смысла формулы. Введение величины a модифицирует формулу, сдвигая первоначальную зависимость влево вдоль оси абсцисс. Это приводит к тому, что при нулевой концентрации азота поток $v_N(i)$ становится отрицательным. Он достигает нулевого значения при некоторой малой концентрации $C_N(i) = a$ (это не противоречит здравому смыслу), хотя прямого экспериментального подтверждения такого явления авторы пока не имеют.

Таким образом, для решения задачи идентификации в нашем распоряжении имелись три параметра: V_{\max} , a и β . Обозначим этот набор через вектор A . Для его определения необходимо использовать процедуру минимизации среднемультилетнего квадрата разности между величинами экспериментального и расчетного урожая. Иными словами, необходимо решить следующую задачу:

$$A_{opt} = \operatorname{argmin} J(A) = \operatorname{argmin} \sum_{k=1}^K (Y_k^{эксн} - Y_k^{расч}(A))^2, \quad (7)$$

где k – номер варианта по году и дозе удобрений; K – общее число вариантов включенных в идентификацию; $Y_k^{эксн}$ и $Y_k^{расч}$ – экспериментальная и расчетная величина урожая k -го варианта, причем последний зависит от вектора A ; A_{opt} – оптимальный набор параметров, соответствующий минимальной сумме квадратов разностей между экспериментальной и расчетной величиной урожая.

Для нахождения трех неизвестных с учетом возможных ошибок достаточно выбрать 9 вариантов (т.е. $K = 9$). В данном случае выбраны 3 года (год с минимальной, максимальной и некоторой средней величиной урожая), а также 3 уровня минерального питания растений для каждого года. Все остальные годы использовали для проверки модели с использованием независимых экспериментальных данных. Задачу минимизации решали путем полного перебора вариантов в некоторой заданной области. В результате были получены искомые величины (табл. 2). Оценка точности прогнозных расчетов

Таблица 2. Коэффициенты поглощения азота корнями

Культура	V_{max} , мг/см ²	α , мг/л	β , л/мг
Яровой ячмень	3.0	1.0	6.0
Озимая рожь	2.7	1.0	3.0
Картофель	1.2	3.0	2.5

Таблица 3. Оценка точности прогнозирования урожая

Культура	Количество вариантов прогнозирования, n	Средняя (опытная) величина урожая	Стандартное отклонение
Яровой ячмень	36	25.3	3.4
Озимая рожь	30	32.2	4.3
Картофель	36	291	46

урожая всех трех культур за 10–12 лет наблюдения для трех уровней минерального питания приведена в табл. 3.

В качестве примера представлены расчетные кривые динамики различных форм азота в почве под посевом ярового ячменя за вегетацию 2004 г. при N45 (ход кривых отражает качественные представления о совокупности моделируемых процессов) (рис. 2), а также приведены величины экспериментальных и расчетных урожаев этой же культуры за 12 лет наблюдения (табл. 4). Показано,

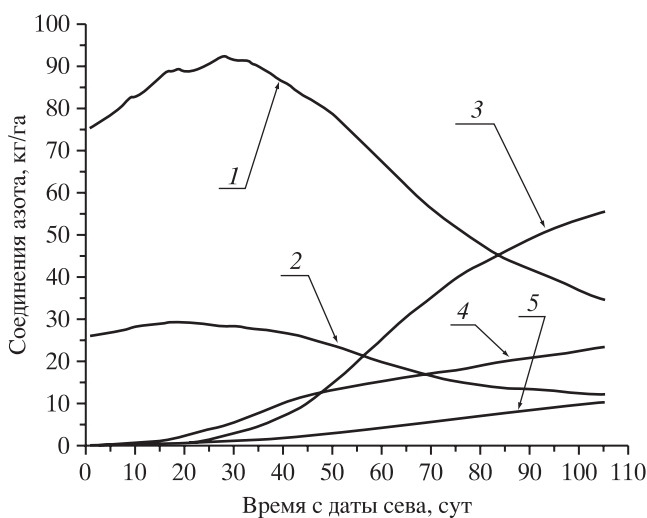


Рис. 2. Динамика содержания форм азота в почве: 1 – азот минеральных соединений, 2 – аммонийный азот, 3 – азот поглощенный корнями, 4 – денитрификация, 5 – вымывание нитратов (яровой ячмень, 2004 г., вариант N45P45K60).

Таблица 4. Расчетные и фактические величины урожая ярового ячменя при трех дозах NPK, ц/га

Год вегетации	Без удобрений		Средняя доза		Высокая доза	
	1	2	1	2	1	2
	1983	25.3	24.1	33.8	33.1	36.1
1984	19.0	16.6	26.8	27.5	29.3	30.4
1985	19.0	22.6	25.4	27.6	27.4	32.2
1986	16.9	17.4	25.0	24.8	28.2	27.7
1987	19.6	20.2	26.9	25.7	29.2	27.2
1988	16.0	15.8	24.3	21.8	27.3	22.8
1989	18.2	16.0	26.7	25.2	29.7	26.6
2000	22.3	22.4	28.5	32.4	30.2	36.0
2001	16.8	21.0	24.4	27.0	27.1	31.2
2002	15.7	15.9	23.4	21.6	26.4	22.6
2004	22.0	15.1	28.8	21.4	30.6	22.1
2008	22.5	21.5	29.6	32.3	31.5	35.8

Примечание. В графе 1 – расчетная величина, 2 – экспериментальная.

что соответствие экспериментальных и расчетных значений урожая можно считать вполне удовлетворительным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, существующая система имитационного моделирования AGROTOOL, v.3 дополнена разработанной динамической моделью 3-го уровня продуктивности агроэкосистем, интегрированной с программным модулем, который осуществляет расчет динамики содержания азотсодержащих соединений в почвенно-растительном комплексе. Отличительной особенностью этого модуля является наличие трех настроечных параметров (V_{max} , α и β), требующих для идентификации девяти вариантов опыта.

Настройка модели по величине урожая ярового ячменя, озимой ржи и картофеля в длительном полевом опыте на Меньковской опытной станции (Ленинградская обл.) позволила воспроизвести варьирование величины урожайности этих трех культур (1983–2008 гг.) в контрольном варианте, а также в двух вариантах с возрастающими дозами NPK. При этом прогнозные оценки величины урожая соответствовали доверительным интервалам, определяемым стандартными отклонениями (ц/га): 3.4 (яровой ячмень), 4.3 (озимая рожь) и 46 (картофель).

Разработанная динамическая модель имеет ряд ограничений: в данной версии модели не рассматривается применение органических удобрений,

гумус описывается одним пулом, взаимовлияние трансформации С и N растительных остатков и гумуса не учитывается. Тем не менее, модель позволяет исследовать влияние доз азотных удобрений на величину урожая ярового ячменя, озимой ржи и картофеля на фоне изменчивости погодных условий в регионе возделывания. Разумеется, согласие результатов расчета урожая при различных дозах азотного удобрения с многолетними экспериментальными данными является лишь косвенным подтверждением адекватности разработанной модели. Для более уверенной оценки точности модели необходимо ее верифицировать по показателям динамики содержания С и N в почвенно-растительном комплексе и провести непосредственное сравнение данных по распределению минеральных форм почвенного азота, а также по содержанию гумуса в почве с результатами расчетов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Penning de Vries F.W.T., Jensen D.M., ten Berge H.F.M., Baketa A.H. Simulation of ecophysiological processes of growth of several annual crops. Wageningen Pudoc, 1989. 271 p.
2. Терлеев В.В., Кокотов Ю.А., Крейер К.Г., Федотов М.В. Исследование обменного калия в дерново-подзолистой супесчаной почве методом Бекетта // Агрохимия. 2000. № 9. С. 29–35.
3. Полуэктов Р.А., Смоляр Э.И., Терлеев В.В., Тонаж А.Г. Модели продукционного процесса сельскохозяйственных культур. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2006. 396 с.
4. Николаенко А.Н. Математическое описание физико-химических процессов азотного комплекса почв // Докл. РАСХН. 2002. № 2. С. 38–41.
5. Franko U., Oelschlägel B., Schenk S. Simulation of temperature-, water- and nitrogen dynamics using the model CANDY // Ecol. Modelling. 1995. V. 81. P. 213–222.
6. Johnsson H., Bergström L., Jansson P.-E. Simulated nitrogen dynamics and losses in layered agricultural soil. Agriculture // Ecosyst. Environ. V. 18. P. 333–356.
7. Kersebaum K.C., Beblík A.J. Performance of a nitrogen dynamics model applied to evaluate agricultural management practices // Modeling carbon and nitrogen dynamics for soil management / Eds. Shaffer. M., Ma L., Hansen S. Boca Ration, USA: CRC Press, 2001. P. 551–571.
8. McGill W.B., Hunt H.W., Woodmansee R.G., Reuss J.O. Phoenix, a model of the dynamics of carbon and nitrogen in grasslands soil // Ecol. Bull. 1981. V. 33. P. 49–115.
9. Poluektov R.A., Fintushal S.M., Oparina I.V. et al. AGROTOOL – a system for crop simulation // Arch. Acker. Pfl. Boden. 2002. V. 48. P. 609–635.
10. Richter J. The soil as a reactor. Cremligen, Germany: Catena Verlag, 1987. 192 p.
11. Thornley J.H.M. Modelling Shoot: Root Relations: the Only Way Forward? // Ann. Bot. 1998. V. 81. P. 165–171.
12. Полуэктов Р.А., Тонаж А.Г. Расчет отношения root:shoot в моделях органогенеза высших растений // Физиология растений. 2005. Т. 52. № 5. С. 769–775.

Computer Model of Nitrogen Dynamics in the Rooting Zone

R. A. Poluektov, V. V. Terleev

Research Institute of Agrophysics, Russian Academy of Agricultural Sciences, Grazhdanskii pr. 14, St. Petersburg, 195220 Russia, E-mail: Vitaly_Terleev@mail.ru

The model of the second productivity level of agricultural plants describing the dynamics of yield formation under limited water supply was supplemented with the unit of nitrogen transformation, transfer, root uptake, and nitrogen effect on plant production. The unit includes the description of the seasonal dynamics of soil organic matter (humus and litter), the transformation of organic and mineral nitrogen compounds, the uptake of ammonium and nitrates by plant roots, and the convective-diffusion transfer of nitrates along the soil profile. The inclusion of the nitrogen dynamics unit in the model transfers the latter to the third productivity level, because it takes into account the effect of nitrogen deficit in the soil and provides the opportunity for nitrogen regime management by means of fertilization.

Keywords: computer simulation, nitrogen dynamics, soil, rooting zone.