

УДК 631.416.1

*Ю.Б. Лямкина, Л.А. Хворова***Моделирование динамики азота в почве  
(теоретические аспекты)***Ju.B. Lyamkina, L.A. Khvorova***Modeling Dynamics of Nitrogen in Soil  
(Theoretical Aspects)**

Рассмотрена модель динамики азота в почве. Азот входит в состав всех простых и сложных белков, а также нуклеиновых кислот, играющих исключительно важную роль в обмене веществ в растительных организмах. Моделирование динамики азота в почве имеет большое практическое значение, так как позволит направленно влиять на развитие сельскохозяйственных культур с целью получения максимально возможных урожаев, рационально использовать азотные удобрения.

**Ключевые слова:** органическое вещество, симбиотическая фиксация азота, почвенный компартмент, модель.

Почва – сложная система, состоящая из минерального и органического компонентов. Азот является одним из основных элементов, необходимых для питания растений. Он входит в состав всех простых и сложных белков, а также нуклеиновых кислот, играющих исключительно важную роль в обмене веществ в растительных организмах.

Азот в почве представлен множеством форм: неорганический (минеральный), в новообразованном «свежем» веществе (растительных остатках), в «стабильном» органическом веществе [1].

Неорганический азот в почве присутствует обычно в форме  $NH_4^+$  и  $NO_3^-$ , лишь в некоторых почвах с высокими содержаниями  $pH$  могут встречаться небольшие количества  $NO_2^-$ . В почвах со значительным содержанием органического вещества минеральный азот составляет менее 5% всего азота почвы, большая его часть находится в органической форме.

Почва содержит органическое вещество в количествах, варьирующих от 0,1 до 50% и выше. Состав его изменяется в широких пределах, при этом часть органического вещества находится в постоянном круговороте, так как микроорганизмы разрушают его, используя в качестве источника энергии. В каждом слое почвы можно различать два компонента органики: «свежее», новообразованное вещество негумусной природы, которое состоит из отмерших листьев, клубеньков и других прошлогодних

The article considers the model of dynamics of nitrogen in soil. Nitrogen is a part of all simple and complex proteins and nuclear acids playing an important role in a metabolism in vegetative organisms. Modeling dynamics of nitrogen in soil is of a great practical importance, as it will allow us to influence on development of agricultural crops in order to achieve high harvests and to use nitric fertilizers rationally.

**Key words:** organic substance, symbiotic fixing of nitrogen, soil compartment, model.

и свежих растительных остатков, и «старое», стабильное органическое вещество или гумус.

В почвах постоянно идет процесс высвобождения азота из органической фракции благодаря микробиологическому распаду органического вещества. Этот процесс называется аммонификацией. В то же время неорганический азот превращается в органический в ходе микробиологического распада углеродосодержащих растительных остатков [2, 3].

Превращения азота в почве представлены процессами иммобилизации и минерализации, скорости которых зависят от условий среды и отношений углерод/азот в органическом веществе. Иммобилизация – процесс превращения под действием микроорганизмов неорганического азота в органические соединения. В процессе минерализации органических соединений образуется ферментно-сбраживаемый субстрат, потребляемый микроорганизмами и идущий на построение их биомассы. В качестве источника энергии при этом используется органический углерод, высвобождающийся в процессе разложения органики [4].

Основные источники пополнения запасов азота в почве – азотфиксирующие свободноживущие и клубеньковые микроорганизмы, а также поступление его с осадками.

Фиксировать атмосферный азот способны лишь немногие виды бактерий. Они находятся в почве свободно или живут в симбиозе с растениями. Особо важное хозяйственное значение имеет симбиоз

между бактериями рода *Rhizobium* и бобовыми растениями [1, 5, 6], такими, как клевер, соя, бобы или горох. Фиксация бобовыми растениями атмосферного азота обеспечивает высокие урожаи дешевого растительного белка без применения дорогостоящих и экологически небезопасных минеральных азотных удобрений.

Модель динамики азота в почве должна учитывать разложение свежего органического вещества (растительных остатков, корневых волосков и отмерших клубеньков) и гумуса, за счет которых происходит пополнение почвенного азота.

Основные процессы, включенные в блок динамики азота в почве, следующие [1, 7]:

### 1. Разложение старого органического вещества.

Поток азота из старого органического вещества в пул неорганического азота – это единственный поток вещества, который не регулируется микробной биомассой из-за его устойчивости [1, 3]. Разложение старого органического вещества происходит только при температуре почвы выше  $0^\circ\text{C}$ . Ежегодно разлагается и минерализуется небольшая часть азота из стабильного органического вещества. Скорость минерализации с учетом влияния температуры и влажности почвы определяется по следующей формуле:

$$V_{\min}^{OM}(i) = OM(i) V_{dec}^{OM} CN_{OM} f_1(T_s(i)) f_2(W(i)), \quad (1)$$

где  $OM(i)$  – содержание старого органического вещества в  $i$ -м почвенном компартменте;  $V_{dec}^{om}$  – относительная скорость разложения старого органического вещества;  $CN_{om}$  – отношение  $C/N$  в старом органическом веществе;  $f_1(T_s(i))$  – фактор влияния температуры на скорость разложения и минерализацию органического вещества;  $f_2(W(i))$  – фактор влияния влажности на скорость разложения и минерализацию органического вещества.

### 2. Разложение свежего органического вещества

происходит также при температуре почвы выше  $0^\circ\text{C}$  и приводит либо к минерализации, либо к иммобилизации, либо в зависимости от отношения  $C/N$  в субстрате.

Потенциальная скорость разложения свежего органического вещества рассчитывается в модели по формуле:

$$PV_{dec}^{FM} = V_{dec}^{FM} FM(i) f_1(T_s(i)) f_2(W(i)), \quad (2)$$

где  $V_{dec}^{FM}$  – относительная скорость разложения свежего органического вещества;  $FM(i)$  – содержание свежего органического вещества в  $i$ -м почвенном компартменте.

По скорости разложения  $PV_{dec}^{FM}$  рассчитывается скорость минерализации, которая пропорциональна количеству азота в минерализуемом субстрате:

$$PV_{\min}^{FM} = PV_{dec}^{FM} N_{FM}. \quad (3)$$

Азот, высвободившийся в результате минерализации, пополняет фонд неорганического азота почвы [3].

Параллельно процессу минерализации идет процесс формирования тканей микроорганизмов, приводящий к росту бактериальной биомассы за счет иммобилизации азота  $N_{imm}(i)$ . Интенсивность иммобилизации пропорциональна скорости разложения органического вещества и определяется через потребность биомассы в азоте:

$$N_{dem}^B = \frac{PV_{dec}^{FM} C_{FM} N_{CB}}{DisAs + 1}, \quad (4)$$

где  $DisAs$  – отношение диссимилиация/ассимиляция углерода в микробиологических процессах роста.

Если потребность биомассы в азоте меньше, чем потенциальная скорость минерализации азота, то свежее органическое вещество обеспечивает биомассу как энергией (углеродом), так и необходимым азотом. В этом случае количество азота, иммобилизованного в биомассе, будет эквивалентно потребности биомассы. А минерализованный азот, оставшийся после покрытия потребности микробной биомассы, поступает в пул минерального азота. Если содержание азота в свежем органическом веществе низкое, потребность микробной биомассы не может быть покрыта за счет минерализации. В этом случае часть минерального азота почвы будет иммобилизована в биомассе для покрытия потребности в азоте. Таким образом, интенсивность процессов минерализации и иммобилизации и определяет их конечный результат.

Согласно изложенным выше теоретическим положениям рассчитываются количество оставшегося свежего органического вещества в каждом почвенном компартменте –  $FM(i)$ ; количество минерализованного азота, которое добавляется в пул минерального азота каждого почвенного компартмента –  $N_{\min}^{FM}(i)$ ; количество азота, иммобилизованного в микробной биомассе в результате разложения свежего органического вещества в каждом почвенном компартменте –  $N_{imm}(i)$ ; количество минерального азота почвы, иммобилизованного в биомассе из  $i$ -го почвенного компартмента –  $N_{loss}(i)$ .

Влияние внешних факторов – температуры, влажности и кислотности почвы – на процессы разложения и минерализации органического вещества в почве учитывается с помощью мультипликативных коэффициентов редукции  $f_1(T_s(i))$ ,  $f_2(W(i))$ ,  $f_3(pH)$ . Совместное влияние внешних факторов описывается произведением сомножителей, представляющих собой функции, которые строятся на основе графических зависимостей [1] и имеют вид:

$$f_1(T_s(i)) = \frac{0.1e^{0.229(T_s(i)-10)}}{1 + 0.1(e^{0.229(T_s(i)-10)} - 1)} \quad (5)$$

$$f_2(W(i)) = \begin{cases} e^{-2.3 \frac{(W(i)-WHB)^2}{(WnB-WHB)^2}} & \text{— для правой части графика} \\ e^{-2.3 \frac{(W(i)-WHB)^2}{(WHB-Wz)^2}} & \text{— для левой части графика,} \end{cases} \quad (6)$$

где  $W_z$  – влажность завядания;  $WHB$  – наименьшая влагоемкость почвы;  $WnB$  – влажность насыщения.

$$f_3(pH) = \begin{cases} 1 - \frac{(x-b)^2}{(a-b)^2}, & a < x < b \\ 1 - \frac{(x-c)^2}{(d-c)^2}, & c < x < d \end{cases} \quad (7)$$

**3. Поглощение азота из почвы корнями растений.** В процессе поглощения различных элементов из почвы корнями могут использоваться два механизма: пассивный транспорт (диффузия) и активный перенос. Диффузия направлена от мест с большей концентрацией вещества к местам, в которых концентрация данного вещества меньше. Описание этого процесса в моделях основывается, как правило, на законе Фика (аналог закона Ома). Активный транспорт происходит с затратой энергии. Данные, приведенные в [4], свидетельствуют о том, что активное поглощение составляет основную часть поглощения, а скорость активного поглощения на единицу поверхности корней определяется кинетикой Михаэлиса-Ментен [4]:

$$\frac{1}{NUpt(i)} = \frac{1}{V_{max}^N} + \frac{k_1}{N_{min}(i)} + \frac{k_2}{C_{mob}^r}$$

или

$$NUpt(i) = \frac{V_{max}^N N_{min}(i) C_{mob}^r}{V_{max}^N (k_1 C_{mob}^r + k_2 N_{min}(i)) + N_{min}(i) C_{mob}^r}, \quad (8)$$

где  $V_{max}^N$  – максимальная скорость поглощения нитратов;  $C_{mob}^r$  – количество мобильного углерода, направляемого в корни;  $k_1, k_2$  – числовые коэффициенты, соответствующие концентрации азота и интенсивности поступления углеводов в корни, при которых скорость поглощения равна  $\frac{1}{2} V_{max}^N$ .

Как нетрудно заметить, уравнение (8) связывает поглощение азота с интенсивностью фотосинтеза и содержанием минерального азота в почвенных компартментах. В соотношении (8) заложен регулирующий механизм поглощения азота корнями растений, отражающий адаптацию растений к условиям выращивания.

**4. Баланс азота в почве.** Соотношения, приведенные выше, описывают кинетику реакций, происходящих внутри каждого слоя почвы, а также отражают зависимость скоростей реакций от состояния системы и внешних условий. Помимо этого, подвижные азотсодержащие субстанции перемещаются из одного слоя почвы в другой. Перенос неоргани-

ческого азота через границы слоев почвы происходит при перемещении почвенной влаги, т.е. при инфильтрации, и посредством диффузии. Концентрация азота в потоке воды рассчитывается путем смешения азота, находящегося в данном слое почвы, с азотом, поступающим через его верхнюю границу, с водой и тем его количеством, которое транспонируется через рассматриваемый слой.

Следовательно, переходя к описанию баланса, необходимо учесть как перетоки подвижного азота между слоями, так и трансформации внутри слоя. Нижеприведенные уравнения одинаково применимы ко всем почвенным слоям за исключением первого (верхнего) и последнего (нижнего). Общее количество азота, поступившего в первый почвенный компартмент в момент времени  $(t + 1)$  без учета миграции, вычисляется следующим образом:

$$N_{min}(1, t+1) = N_{min}(1, t) + V_{min}^{OM}(1, t+1) + N_{min}^{FM}(1, t+1) - N_{loss}(1, t+1) + N_{first}(t+1) + N_{rain}(t+1) - NUpt(1, t+1), \quad (9)$$

а для нижележащих почвенных слоев:

$$N_{min}(i, t+1) = N_{min}(i, t) + V_{min}^{OM}(i, t+1) + N_{min}^{FM}(i, t+1) - N_{loss}(i, t+1) - N_{loss}(i, t+1) - NUpt(i, t+1). \quad (10)$$

Удобрения с момента их внесения (после выпадения осадков или полива) распределяются в слое, в который их вносят, равномерно и смешиваются с общим количеством минерального азота в данном почвенном компартменте.

Опишем перетоки азота между слоями. Результативный поток азота из  $i$ -го почвенного компартмента в  $i + 1$  определяется действием двух составляющих [1, 3]. Первая составляющая – это конвективный перенос. Он равен потоку влаги, умноженному на концентрацию азота:

$$NFlow(i, i+1) = N_{con}(i) Flow(i+1), \quad (11)$$

$$N_{con}(i) = N_{min}(i) / (W(i)H(i)).$$

Вторая составляющая – диффузия, которая осуществляется из компартмента с большей концентрацией вещества в компартмент с меньшей концентрацией:

$$DFlow(i, i+1) = -D_c \frac{N_{con}(i) - N_{con}(i+1)}{HL}, \quad (12)$$

где  $HL$  – расстояние между серединами двух соседних почвенных слоев;  $D_c$  – эффективный коэффициент диффузии.

Механизм диффузии ионов в почве связан с извилистостью порового пространства. Чтобы переместиться по вертикали, ион мигрирует по извилистым порам. Этот эффект учитывается коэффициентом извилистости  $\tau$  ( $\tau > 0$ ). Величина  $D_c$  может быть описана с помощью следующего соотношения:

$$D_c = W(i)(\tau^{-1}D_c^w + WFlow(i)D_v), \quad (13)$$

где  $D_c^w$  – коэффициент диффузии в свободном пространстве;  $D_v$  – коэффициент гидродинамической дисперсии.

Таким образом, суммарный поток вещества  $\prod_{\Sigma}^N(i)$ , мигрирующего из  $i$ -го почвенного компартмента, с учетом описанных выше составляющих определяется равенством:

$$\prod_{\Sigma}^N(i) = (NFlow(i) - NFlow(i+1) + (DFlow(i) - DFlow(i+1))). \quad (14)$$

Знак  $\prod_{\Sigma}^N(i)$  определяет направление потока вещества.

При описании баланса азота в каждом почвенном компартменте необходимо учесть как перетоки подвижных нитратов между слоями (11)–(14), так и трансформации внутри слоя (2)–(8). Уравнения, определяющие баланс азота в почве за шаг модели, можно записать в виде:

$$N_{\min}^{k+1}(i) = N_{\min}^k(i) + \prod_{\Sigma}^N(i) - Nlow(i), \quad (15)$$

где  $Nlow(i)$  – количество азота, потерянного за счет вымывания потоком воды и диффузии из корнеобитаемого слоя.

Объединяя в единую систему все представленные выше соотношения, получим полную систему уравнений для расчета динамики азота в каждом почвенном компартменте.

Информационное обеспечение модели составят экспериментальные данные [8] специально спланированных полевых опытов, проведенных в ГНУ АНИИСХ (АНИИЗиС). Результаты полевых опытов будут использованы для идентификации модели.

Модель динамики азота ориентирована на совместное использование с базовой моделью AGROTOOL, разработанной в лаборатории математического моделирования агроэкосистем Агрофизического института РАСХН (Санкт-Петербург), что позволит рассчитывать обеспеченность растений сои как симбиотическим [6], так и почвенным минеральным азотом.

## Библиографический список

1. Хворова Л.А. Моделирование влияния азотного питания на продукционный процесс посева люцерны: дис. ... канд. техн. наук. – СПб., 1992.
2. Биологический азот и его роль в земледелии. – М., 1967.
3. Полуэктов Р.А. Динамические модели агроэкосистемы. – Л., 1991.
4. Алиев П.Г. Агроэкологическая модель влагообмена и азотного питания полевых культур: дис. ... канд. техн. наук. – Л., 1989.
5. Литвинцев П.А. Уровень азотфиксации и продуктивность сортов сои в зависимости от азотного питания // Д.Н. Прянишников и развитие агрохимии в Сибири: материалы науч. конф. по агрохимии (Улан-Удэ, 2002). – Новосибирск, 2003.
6. Лямкина Ю.Б. Моделирование продукционного процесса бобовых растений на примере сои // Известия АлтГУ. – 2010. – №1.
7. Полуэктов Р.А., Смоляр Э.И., Терлеев В.В., Топаж А.Г. Модели продукционного процесса сельскохозяйственных культур. – СПб., 2006.
8. Соя в Алтайском крае: рекомендации РАСХН / Сиб. отделение. АНИИСХ. – Барнаул, 2006.