

## УВЕЛИЧЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АЗОТА: ОЦЕНКА АЗОТМИНЕРАЛИЗУЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ПОЧВ

**В.Н. Башкин**, доктор биологических наук

*Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН,  
142290, Московская обл., Пушкино, ул. Институтская, 2-2  
E-mail: vladimirbashkin@yandex.ru*

*На сегодняшний день вопросам повышения эффективности использования азота уделяется большое внимание, поскольку очевидно, что в ближайшем будущем невозможно ожидать существенного роста производства и применения азотных удобрений. Необходима разработка приёмов установления доз азотных удобрений, максимально приближенных к потребностям растений, прежде всего с учетом актуальной минерализации этого элемента из почвенного органического вещества. Цель исследований – разработка метода определения азотминерализующей способности почвы (АМС) для диагностики азотного режима почв. В ходе реализации разработанного метода количественной оценки азотминерализующей способности почв определение АМС проводится при компостировании образцов почвы в оптимальных условиях температуры (18...28 °С) и влажности (60 % ППВ) в течение 4 недель с набором (4...6) возрастающих доз азотных удобрений, эквивалентных планируемому под различные сельскохозяйственные культуры. Величина азотминерализующей способности почвы определяется путем нахождения первой производной квадратного уравнения регрессии, описывающего накопление доступного азота (нитраты и обменный аммоний) в почве в зависимости от доз вносимых удобрений. Испытания этого метода в различных опытах, проведенных как в экспериментальных, так и в производственных условиях в различных почвенно-климатических зонах и с разными культурами показали, что расхождение в величинах использования почвенного азота, определённых с использованием метки <sup>15</sup>N и предлагаемого метода не превышают 10...12 %, что допустимо для диагностических целей. Определение этой величины позволяет прогнозировать и моделировать различные аспекты трансформации азота в почве, оценивать аккумуляцию и динамику подвижных минеральных азотных соединений в почве, а также превращение азота в таких системах, как почва – удобрение – растение.*

## INCREASING THE EFFICIENCY OF NITROGEN USE: ASSESSMENT OF THE NITROGEN MINERALIZING CAPACITY OF SOILS

**Bashkin V.N.**

*Institute of Physico-Chemical and Biological Problems of Soil Science of the Russian Academy of Sciences,  
142290, Moskovskaya obl., Pushchino, ul. Institutskaya, 2-2  
E-mail: vladimirbashkin@yandex.ru*

*Currently, much attention is being paid to increasing the efficiency of nitrogen use, since it is obvious that in the near future it is impossible to expect a significant increase in the production and use of nitrogen fertilizers. It is necessary to develop methods for setting doses of nitrogen fertilizers that are as close as possible to the needs of plants, primarily taking into account the actual mineralization of nitrogen from soil organic matter. The purpose of this article is to develop a method for determining the nitrogen mineralizing ability of the soil (NMA) to diagnose the nitrogen regime of soils. Accordingly, a fairly simple in execution, but quite workable method for quantifying the nitrogen mineralizing ability of soils (NMA) has been developed. Determination of NMA is carried out when composting soil samples under optimal conditions of temperature (18... 28 °C) and moisture (60% WHC) for 4 weeks with a set of (4 ... 6) increasing doses of nitrogen fertilizers equivalent to those planned for various crops. The value of the nitrogen mineralizing capacity of the soil is determined by finding the first derivative of the quadratic regression equation describing the accumulation of available nitrogen (nitrates and exchangeable ammonium) in the soil depending on the doses of nitrogen fertilizers applied. Tests of this method in various experiments conducted both in experimental and production conditions in different soil-climatic zones and with different crops showed that the discrepancies in the values of soil nitrogen use determined using the <sup>15</sup>N label and the proposed method did not exceed 10-12%, which is acceptable for diagnostic purposes. The determination of this value makes it possible to predict and model various aspects of nitrogen transformation in the soil, to assess the accumulation and dynamics of mobile mineral nitrogen compounds in the soil, as well as the conversion of nitrogen in such systems as soil – fertilizer – plant.*

**Ключевые слова:** азотные удобрения, азотминерализующая способность почв, изотоп азота <sup>15</sup>N, диагностика азотного режима почв

**Key words:** nitrogen fertilizers, nitrogen mineralizing ability of soils, nitrogen isotope <sup>15</sup>N, diagnostics of nitrogen regime of soils

В последние годы отмечается возрастающий интерес к оценке различных факторов, связанных с увеличением эффективности использования азота. В первую очередь, это обусловлено ростом применения минеральных азотных удобрений, которое в начале 20-х гг. XX в. превысило 120 млн т. Кроме того, растет количество используемых органических удобрений и компостов, которые также служат источником привносимого в агроэкосистемы азота. В агрохимической литературе вопросам оценки коэффициента использования азота из минеральных и органических удобрений было уделено большое внимание и существующие оценки для мине-

ральных удобрений в среднем не превышают 40...50%. Однако даже сейчас невозможно с необходимой точностью оценить величины использования азота, минерализуемого из почвенного органического вещества в виду сложности учета разнообразных метеорологических, почвенных, биологических, экологических и других факторов [1, 2, 3 и др.].

Известно, что суммарная оценка трансформации азота в почве под воздействием различных факторов (дозы удобрений, гидротермические параметры, агрохимические показатели почвы, микробиологическая активность) возможна на основании определения азот-

минерализующей способности почвы. Она может быть охарактеризована как количество органического азота в почве, способного к минерализации в течение прогнозируемого вегетационного сезона и будет включать в себя азот, поглощенный растениями, реиммобилизуемый микроорганизмами, теряемый при вымывании и денитрификации, а также остающийся в доступной форме после окончания периода вегетации.

Следует отметить, что еще в 70-х гг. XX в. было предложено определение азотминерализующего потенциала  $N_0$ , определяемого как количество органического азота почвы в нулевой момент времени, которое может быть минерализовано при благоприятных условиях за неопределенно долгий период времени [4]. При допущении, что процесс минерализации подчиняется кинетике первого порядка, величина потенциала минерализации азота может быть определена по следующему уравнению:

$$dN/dt = kN,$$

где  $N = N_0 - N_t$  – содержание потенциально минерализуемого азота в конце интервала  $t$ ;  $k$  – константа скорости минерализации, то есть доля  $N_0$ , минерализуемая в единицу времени.

Анализ современного состояния оценки этого потенциала приведен в обзоре [5].

Несмотря на десятилетия исследований, точная оценка минерализации азота, которая относится к микробиологическим процессом, остается сложной задачей [6, 7, 8, 9].

Например, исследования с применением  $^{15}N$ -индикаторов показали, что  $N$ , минерализованный из почвенного органического вещества (ПОВ), обычно обеспечивает >50 %  $N$ , усваиваемого кукурузой в течение вегетационного периода, несмотря на высокие дозы применения  $N$ -удобрений [10].

Оценивая результаты определения азотминерализующей способности почв, полученные различными способами, следует подчеркнуть, что, наряду с учетом ряда факторов, не принимается во внимание один из важнейших, а именно воздействие вносимых минеральных азотных удобрений. Хотя разработаны различные приемы и методы [1, 2, 3], позволяющие либо рассчитывать, либо определять аналитически, например, с использованием меченных азотных удобрений, это воздействие [10, 11], однако, в практике оценки эффективности использования азота, а также диагностике азотного питания, они не получили широкого распространения. Следовательно, необходимо разработать достаточно простой, но в то же время информативный метод определения азотминерализующей способности почв.

В связи с изложенным, цель наших исследований – разработка метода определения азотминерализующей способности почвы (АМС) для диагностики азотного режима почв.

**Методика.** Оценка азотминерализующей способности почвы, которая служит важнейшим критерием степени выраженности агрохимического цикла азота, может быть выполнена на основании определения количества минерализуемого азота почвы, эквивалентного по доступности азоту вносимых минеральных удобрений. Определение последнего проводится при компостировании образцов почвы при оптимальных условиях температуры (18...28 °С) и влажности (60 % ППВ) в течение 4 недель с набором (4...6) возрастающих доз азотных удобрений, эквивалентных планируемому под различные сельскохозяйственные культуры. Величина азотминерализующей способности почвы определяется путем нахождения первой производной квадратного уравнения регрессии, описывающего накопление до-

ступного азота (нитраты и обменный аммоний) в почве в зависимости от доз вносимых азотных удобрений. Можно также использовать более сложный метод решения этого уравнения с вычислением квадратного корня.

Влияние гидротермических условий вегетационного периода учитывают на основе долгосрочных метеорологических прогнозов или среднемноголетних данных для конкретного региона. Для этого вводят поправочные коэффициенты к скорости накопления доступного для питания растений сельскохозяйственных культур азота в почве в зависимости от температурных условий и влажности почвы.

Используя математическое выражение зависимости накопления доступного азота в почве при компостировании от доз азотных удобрений, можно оценить азотминерализующую способность почвы, которая будет включать в себя весь потенциально доступный азот почвенного фонда, способного к минерализации в течение прогнозируемого вегетационного периода.

Обоснование предлагаемого метода определения азотминерализующей способности связано с оценкой так называемого “priming effect” или величин «экстра»- $N$ , что характеризует степень усиления минерализации азотных соединений почвы при внесении азотных удобрений. Подробно этот вопрос исследован в работах ряда авторов [4 и др.], наиболее детальная сводка дана в монографии В.Н. Кудярова [12]. Согласно такому подходу, в каждый отдельно взятый момент времени величина азотминерализующей способности почвы будет пропорциональна количеству «экстра»- $N$ . Величины «экстра»- $N$ , обнаруживаемые в почве в виде доступных соединений азота после её компостирования, будут отражать актуальную способность почвы к минерализации азотсодержащих органических компонентов, включая процессы иммобилизации и ремобилизации азота вносимых минеральных удобрений.

Определение количества «экстра»- $N$  по предлагаемому методу позволяет дать оценку актуальной азотминерализующей способности почв, то есть той, которая может иметь место в течение прогнозируемого периода или вегетационного сезона. В том её отличие от азотминерализующего потенциала, когда определяется количество потенциально минерализуемого азота. Поэтому величины азотминерализующей способности почв, оцениваемые по предлагаемому методу, будут в основном меньше.

Для реализации предлагаемого метода из каждого образца почвы (воздушно-сухой, просеянной через сито с диаметром отверстий 2 мм, или нативно-влажной) берется 5 навесок по 50 г и помещается в полиэтиленовые пакеты. К навескам почвы прибавляется азотное удобрение (аммиачная селитра или другое, преимущественно используемое под выращиваемые культуры) в виде водного раствора из расчёта доз, планируемых под различные сельскохозяйственные культуры: для зерновых культур – 0; 0,5; 1,0; 2,0 и 2,5 мл раствора с концентрацией 1 мг  $N$ /мл; для картофеля, кукурузы и технических культур – 0; 0,5; 1,0; 3,0 и 4,0 мл; для интенсивных овощных культур – 0; 1,0; 3,0, 4,0 и 5,0 мл. Общая влажность почвы устанавливается в пределах 60...80 % ППВ путём добавления необходимого количества дистиллированной воды. После тщательного перемешивания почвы пакеты плотно закрываются и компостируются в термостате при 18...28 °С в течение 4 недель. Точное значение влажности и температуры компостирования выбирается в зависимости от преимущественных гидротермических условий конкретного региона. После окончания компостирования (во влажных

образцах с отбором проб на влажность) осуществляется определение суммы обменного аммония и нитратов любым стандартным методом.

Определение величины азотминерализующей способности почвы осуществляется путём решения уравнения кривой, описывающей накопление доступного N - ( $\text{NO}_3^- + \text{NH}_4^+_{\text{обм}}$ ) в почве (y) в зависимости от доз азотного удобрения (x):

$$y = ax^2 + bx + c \quad (1)$$

Все величины используются в одной размерности. Степень аппроксимации различных видов уравнений оценивается по остаточной дисперсии. Сама величина АМС находится по следующей формуле:

$$\text{АМС} = [f(0) \times x^*] / [f(0) - f(x^*)], \quad (2)$$

где  $f(0)$  – решение получаемого квадратичного уравнения при  $x = 0$  (или величина «с» в уравнении (1)),  $f(x^*)$  решение этого уравнения при  $x = 0,1$ , первой используемой в опыте дозы N-удобрения (например, 0,1 мг N/100 г почвы, или 3 кг/га).

Учёт гидротермических условий предстоящего вегетационного периода осуществляется следующим образом: отклонение средних температур почвы от интервала 18...28 °C учитывается посредством введения коэффициента 0,2 на каждый градус; отклонение средних значений влажности почвы от интервала 40...80 % ППВ – коэффициента 0,023 на каждый % ППВ. Также учитывается и относительная доля периода отклонений этих значений от продолжительности периода вегетации выращиваемой культуры. В годы с ожидаемым оптимальным режимом поправочные коэффициенты не учитываются [13]. Ниже будет дан пример таких расчетов для конкретных вегетационных периодов и культур.

**Результаты и обсуждение.** Способ определения азотминерализующей способности почвы был также испытан в условиях ряда полевых опытов на различных почвах с использованием меченных  $^{15}\text{N}$  азотных удобрений, что позволило рассчитать вклад азота почвы и удобрений в обеспечение растений азотом. Азотминерализующую способность во всех случаях определяли согласно приведенной прописи метода. В почве определяли содержание доступного азота ( $\text{NO}_3^- + \text{NH}_4^+_{\text{обм}}$ ). При оценке азотминерализующей способности образцы почвы для компостирования отбирали с соответствующих вариантов полевых опытов до внесения удобрений. После уборки урожая в растениях определяли содержание общего

азота, соотношение изотопов  $^{15}\text{N} : ^{14}\text{N}$  и рассчитывали вынос азота из почвы и удобрения.

Учитывая равную доступность азота удобрения и почвы, коэффициенты использования азота, полученные с помощью  $^{15}\text{N}$  для азота удобрения, могут быть отнесены и к использованию азота почвы. Таким образом, после уборки урожая были рассчитаны запасы доступного азота почвы, эквивалентного по усвояемости азоту удобрений. Полученные величины послужили основой для сравнительной оценки показателей обеспеченности растений доступным азотом в течение периода вегетации (суммарные величины запасов аммонийного и нитратного азота в слое 0...20 см и АМС).

На серой лесной почве южного Подмосковья были проведены опыты с ячменем и кукурузой. Схема опыта с ячменем включала в себя внесение возрастающих доз аммиачной селитры (0, 30, 60, 80 и 120 кг/га) на фоне  $\text{P}_{90}\text{K}_{90}$  (двойной суперфосфат и хлористый калий). Повторность опыта 4-кратная, площадь делянок – 120 м<sup>2</sup>. На каждой делянке в 5-кратной повторности дополнительно размещали микроделянки площадью 1 м<sup>2</sup> с внесением меченного  $^{15}\text{N}$  удобрения. Перед началом опыта содержание доступного азота ( $\text{NO}_3^- + \text{NH}_4^+_{\text{обм}}$ ) в слое почвы 0...20 см в среднем составляло 23 кг/га.

Количество азота почвы, способного к минерализации и рассчитанное по выносу азота удобрения с использованием метки  $^{15}\text{N}$ , в среднем составило 123 кг/га. Определение азотминерализующей способности по предлагаемому методу с использованием уравнения регрессии ( $y = 1,556 + 0,472x + 0,149x^2$ ) дало величину, равную 95 кг/га. Необходимо также учесть, что запасы доступного азота в почве были равны 23 кг/га, то есть сумма азота, доступного растениям ячменя в течение вегетационного периода составляла 118 кг/га. Следовательно, величины доступного растениям азота, определенные двумя различными методами, были близки – 123 и 118 кг/га.

На основании метеорологических данных установлено, что средняя температура почвы в слое 0...20 см в течение периода вегетации ячменя составляла 16,5 °C, то есть отличалась от оптимального режима на 1,5 °C. Поправочный коэффициент при этом был равен 0,3 (1,5×0,2). Влажность почвы отличалась от оптимального интервала 40...80 % ППВ в течение 10 дней из 108, отклонения составили 10 % ППВ. Поправочный коэффи-

Табл. 1. Оценка величин азотминерализующей способности серой лесной почвы при выращивании кукурузы, кг N/га

Вариант действия и последствие N <sub>120</sub> на фоне P <sub>90</sub> K <sub>90</sub>					Урожайность сухой массы, т/га	Расчет по выносу азота с использованием $^{15}\text{N}$ (А)	Оценка величины доступного азота перед началом вегетаци- онного сезона			Разность А – Б
							Год опыта			
1-й	2-й	3-й	4-й	5-й						
0	0	0	0	0	4,6	82	28	66	94	-12
0	0	0	0	$^{15}\text{N}$	13,5	120	36	76	112	+8
0	0	0	$^{15}\text{N}$	$^{14}\text{N}$	14,6	135	36	96	132	+3
0	0	$^{15}\text{N}$	$^{14}\text{N}$	$^{14}\text{N}$	15,0	124	33	80	113	+11
0	$^{15}\text{N}$	$^{14}\text{N}$	$^{14}\text{N}$	$^{14}\text{N}$	15,1	135	36	106	142	-7
$^{15}\text{N}$	$^{15}\text{N}$	$^{15}\text{N}$	$^{15}\text{N}$	$^{15}\text{N}$	13,5	163	58	104	162	+1
$^{15}\text{N}$	0	0	0	0	7,2	85	36	48	84	+1
$^{14}\text{N}$	$^{15}\text{N}$	0	0	0	9,2	152	33	115	148	+4
$^{14}\text{N}$	$^{14}\text{N}$	$^{15}\text{N}$	0	0	9,8	135	35	102	137	-2
$^{14}\text{N}$	$^{14}\text{N}$	$^{14}\text{N}$	$^{15}\text{N}$	0	11,2	148	51	96	147	+1

циент на условия увлажнения был равен 0,021 ( $10 : 108 \times 10 \times 0,023$ ). Суммарный поправочный коэффициент:  $[1 - (0,3 \times 0,021)] = 0,99$ , то есть при условиях вегетации ячменя им можно было пренебречь.

Оценку применимости способа определения азотминерализующей способности в условиях многолетнего полевого опыта с кукурузой на серой лесной почве проводили на фоне внесения двойного суперфосфата и хлористого калия по 90 кг/га действующего вещества. В качестве азотного удобрения использовали меченную  $^{15}\text{N}$  и немеченную аммиачную селитру. Схема опыта (табл. 1) позволяла вычлнить действие и последствие азотных удобрений. Рассматривали данные 5-го года эксперимента.

Согласно результатам исследований вынос азота удобрения изменялся от 27 до 49 кг/га, или 23...40 % от дозы внесенного N. Вынос почвенного азота в контроле составил 24 кг/га, в вариантах с изучением действия азотного удобрения – 43...58 кг/га, последствие – 35...63 кг/га.

Перед началом вегетационного сезона было оценено содержание доступного почвенного азота в слое почвы 0...20 см и определены величины АМС согласно прописи метода. Содержание доступного азота в верхнем слое почвы изменялось от 28 до 58 кг/га, отражая предшествующую историю удобрения. Внесение азота в течение первых 4-х лет эксперимента сказалось на величинах АМС почвы, которые составили 48...115 кг/га (см. табл. 1). Минимальные величины этого показателя были зафиксированы в вариантах без внесения азота или с изучением его длительного последствие: 48...66 кг/га. Периодическое внесение азотных удобрений увеличивало лабильный фонд почвы и приводило к повышению азотминерализующей способности в 1,5...2,0 раза (до 115 кг/га). Гидротермические условия в течение периода вегетации кукурузы практически не отличались от оптимальных, поэтому поправочный коэффициент не применяли.

Разность между величинами доступного растениям азота, определенными по выносу кукурузы с использованием метки и предлагаемого способа, в вариантах с изучением действия и последствие азотных удобрений составила 1...11 кг/га, или 1...10 %.

Изучение азотминерализующей способности *пойменной почвы* среднего течения р. Ока проводили в условиях производственного опыта с капустой при орошении. На производственных картах в 6-кратной повторности размещали экспериментальные делянки площадью 3 м<sup>2</sup> с внесением меченных  $^{15}\text{N}$  удобрений. Схема опыта включала в себя наложение возрастающих доз азота в виде аммиачной селитры (0, 100, 150, 200 кг N/га на фоне 150 кг/га  $\text{P}_2\text{O}_5$  (двойной суперфосфат) и 280 кг/га  $\text{K}_2\text{O}$  (хлористый калий), производственные дозы  $\text{N}_{206}\text{P}_{215}\text{K}_{315}$ . Влажность почвы поддерживали в течение вегетационного сезона на оптимальном для этой культуры уровне путем проведения соответствующего количества поливов. Поправки на гидротермические условия не вводили.

Систематическое внесение высоких доз азотных удобрений привело к увеличению количества азота, способного к минерализации. Например, после уборки урожая в почве оставалось 60...75 % азота внесенного удобрения, в основном, в органической форме. Азотминерализующая способность пойменной почвы в этих условиях составила 336 кг/га (среднее для различных вариантов). В корнеобитаемом слое, который при выращивании капусты составляет 40...50 см, перед началом периода вегетации содержалось в среднем 167 кг N/га

(нитраты и обменный аммоний), то есть суммарные запасы доступного азота в пойменной почве перед началом вегетации составляли 503 кг/га. По оценке доступного растениям азота, выполненной по выносу почвенного азота с использованием метки  $^{15}\text{N}$ , величина этого показателя составила 550 кг/га. Следовательно, разница была равна 47 кг N/га, или 8 %.

Способ определения азотминерализующей способности был также испытан в полевым опыте с панголой (тропическая многолетняя злаковая трава) на *бурой ферралитовой почве* опытной станции «Эскамбрай» (Республика Куба). Эта почва, как и пойменная, отличалась от серой лесной относительно более высоким содержанием гумуса (3,35 %). Используемые дозы минеральных удобрений составляли 400...480 кг N/га, что сопровождалось аккумуляцией азота в почве. Удобрения вносили в виде меченных  $^{15}\text{N}$  сульфата аммония и аммиачной селитры в дозах 30 и 60 кг N/га под укос, что эквивалентно 180 и 360 кг N/га за вегетационный сезон при наличии 6 укосов на фоне  $\text{P}_{30}\text{K}_{30}$  под каждый укос. Результаты определения азотминерализующей способности показывают, что определение доступного растениям азота с использованием метки  $^{15}\text{N}$  и по предлагаемому методу давало близкие результаты: 690...711 кг/га и 642...779 кг/га соответственно (табл. 2).

**Табл. 2. Оценка азотминерализующей способности бурой ферралитовой почвы в опыте с панголой, кг N/га**

Форма удобрения	Расчет по выносу почвы панголой с использованием $^{15}\text{N}$	В слое почвы 0...20 см (А)	АМС по предлагаемому методу (Б)	Сумма А+Б
$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	690	140	502	642
$\text{NH}_4\text{NO}_3$	711	140	639	779

Резюмируя представленные результаты опытов с меченными  $^{15}\text{N}$  азотными удобрениями в различных почвенно-климатических и экологических условиях, можно отметить, что независимо от почвы и схемы опыта величины доступного растениям азота, определенные разными методами, были близкими. При этом установлено, что размеры АМС (х) имели достоверную обратную корреляционную связь с величинами коэффициентов использования азотных удобрений (у):

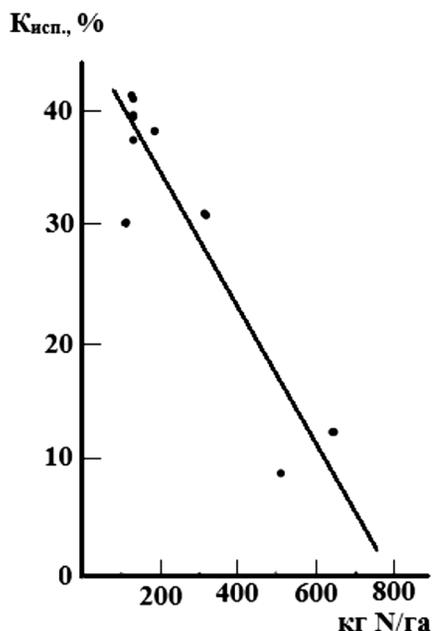
$$y = 43,4 - 0,0550 x, r = - 0,928, P_{0,01}$$

Аналогичная связь отмечена и для величин суммы доступного растениям азота (суммарное количество  $\text{N}-(\text{NO}_3^- + \text{NH}_4^+)$ ) и АМС):

$$y = 44,5 - 0,0449 x, r = - 0,942, P_{0,01}$$

В общей сумме азота, доступного в течение периода вегетации растениям, на АМС приходится в основном более 70...75 %. Ее оценка позволяет диагностировать азотный режим почв и возможность применения азотных удобрений, поскольку коэффициенты их использования тесно связаны с величинами АМС почв: возрастают при уменьшении количества почвенного минерализуемого азота и уменьшаются при его увеличении (см. рисунок).

Количество минерального азота, присутствующего в почве перед началом вегетационного сезона, как правило, не имеет статистической достоверной связи с величиной азотминерализующей способности, которая в значительно большей степени определяется дозами азотных удобрений и складывающейся в течение всего вегетационного сезона динамикой доступного N. Следовательно, оценка этой величины возможна без предварительного учёта исходного содержания доступ-



*Зависимость величин коэффициента использования азота удобрений (y) различными культурами от азотминерализующей способности почвы (x).*

ного  $N_{\min}$ , отражающего уже существующее равновесие сопряженных процессов трансформации органического вещества, тогда как внесение азотных удобрений обычно сдвигает эти процессы в конечном итоге в сторону минерализации.

В целях же диагностики азотного режима почв доступный  $N_{\min}$ , однако, должен быть определен, поскольку характеризует обеспеченность азотом растений в начальный период вегетации. Сумма исходного N и азотминерализующей способности почвы позволяет диагностировать потребность растений в этом элементе в течение всего вегетационного периода.

Следовательно, с агрохимической точки зрения, определение азотминерализующей способности почв позволяет с необходимой точностью устанавливать величины доступного растениям азота в течение предстоящего вегетационного периода и прогнозировать потребность в азотных удобрениях под планируемый урожай выращиваемых культур. В свою очередь, оптимальное внесение азотных удобрений позволяет увеличить эффективность их использования и уменьшить отрицательные последствия нерационального применения [14, 15, 16]. Это также даёт возможность оценить экологические риски, включая риски для здоровья населения, возникающие при избыточном накоплении соединений азота в грунтовых питьевых водах и растениеводческой продукции, и управлять ими [17, 18].

В целом следует отметить, что сегодня рассмотрению приёмов повышения эффективности использования азота уделяется большое внимание [19, 20], поскольку очевидно, что в ближайшем будущем невозможно ожидать существенного роста производства и применения азотных удобрений. Следовательно, количественная оценка азотминерализующей способности почв позволит оптимизировать дозы азота под планируемый урожай.

Таким образом, в результате исследований разработан достаточно простой в исполнении, но вполне работоспособный метод количественной оценки азотми-

нерализующей способности почв. Его испытания в различных опытах, проведенных как в экспериментальных, так и производственных условиях в разных почвенно-климатических зонах и с различными культурами показали, что расхождения в величинах использования почвенного азота, определённых с использованием метки  $^{15}\text{N}$  и предлагаемого метода не превышают 10...12 %, что допустимо для диагностических целей.

Следовательно, азотминерализующая способность почвы – комплексный количественный показатель для характеристики основных процессов агрохимического цикла азота (иммобилизация ↔ мобилизация) и оценки влияния на эти процессы азотных удобрений. Определение этой величины позволяет прогнозировать и моделировать различные аспекты трансформации азота в почве, оценивать аккумуляцию и динамику подвижных минеральных азотных соединений в почве, превращение азота в таких системах как почва – удобрение – растение и почвогрунты – вода.

При этом величины АМС могут быть использованы при диагностике азотного режима почв и расчете доз азотных удобрений под планируемый урожай. Чем они выше величины, тем меньшими должны быть соответствующие дозы удобрений и тем больше будет эффективность их использования.

#### Литература.

1. Завалин А.А., Соколов О.А., Шмырева Н.Я. Экология азотфиксации. М.: РАН, 2019. 252 с.
2. Завалин А.А., Шмырева Н.Я., Соколов О.А. Потери  $^{15}\text{N}$ , почвенного и симбиотического азота в дерново-подзолистой эродированной почве // *Агрохимия*. 2020. № 6. С. 22–32. doi: 10.31857/s0002188120060149.
3. Кудяров В.Н. Агрогеохимические циклы углерода и азота в современном земледелии России // *Агрохимия*. 2019. № 12. С. 3–15 doi: 10.1134/S000218811912007X.
4. Stanford G., Smith S. Nitrogen mineralization potentials of soils // *Soil Science Society of America Proceedings*. 1972. Vol. 36. No. 3. P. 465–472
5. Семенов В.М. Функции углерода в минерализационно-иммобилизационном обороте азота в почве // *Агрохимия*. 2020. № 6. С. 78–96. doi: 10.31857/S0002188120060101.
6. Estimation of Annual Soil Nitrogen Mineralization Rates using an Organic-Nitrogen Budget Approach / D. Geisseler, K.S. Miller, B.J. Aegerter, et al. // *Soil Science Society of America Journal*. 2019. Vol. 83. P. 1227–1235. doi:10.2136/sssaj2018.12.0473.
7. A global synthesis of the rate and temperature sensitivity of soil nitrogen mineralization: latitudinal patterns and mechanisms / Y. Liu, C. Wang, N. He, et al. // *Global Change Biology*. 2017. Vol. 23. P. 455–464.
8. Miller K.S., Geisseler D. Temperature sensitivity of nitrogen mineralization in agricultural soils // *Biology and Fertilization of Soils*. 2018. Vol. 54. P. 853–860. doi:10.1007/s00374-018-1309-2.
9. Relationship between soil properties and nitrogen mineralization in undisturbed soil cores from California agroecosystems / K.S. Miller, B.J. Aegerter, N.E. Clark, et al. // *Communications in Soil Science and Plant Analyses*. 2019. Vol. 50. P. 77–92. doi:10.1080/00103624.2018.1554668.
10. Gardner J.B., Drinkwater L.E. The fate of nitrogen in grain cropping systems: a meta-analysis of  $^{15}\text{N}$  field experiments // *Ecological Applications*. 2009. Vol. 19. P. 2167–2184.

11. Использование минеральных удобрений и биологического азота в севооборотах нечерноземной зоны России / А.А. Завалин, В.Г. Сычев, Н.С. Алметов и др. М.: ВНИИА, 2014. 84 с.
12. Кудеяров В. Н. Цикл азота в почве и эффективность удобрений. М.: Наука, 1989. 214 с.
13. Башкин В.Н., Кудеяров В.Н., Метод определения азотминерализующей способности почв. Авторское свидетельство СССР, 1983. № 1206703.
14. Гамзиков Г.П., Сулейменов С.З. Азотминерализующая способность серой лесной почвы Новосибирского Приобья при компостировании и паровании растительных остатков // Почвоведение, 2021. №5. С. 582-591.
15. Loecke T.D., Cambardella C.A., Liebman M. Synchrony of net nitrogen mineralization and maize nitrogen uptake following applications of composted and fresh swine manure in the Midwest US // Nutrient Cycling in Agroecosystems. 2012. V. 93. P. 65–74.
16. Новиков А. А. Азотминерализующая способность почв как компонент устойчивости агроценоза // Научный журнал КубГАУ. 2021. №. 173(09). С. 93-101. doi: 10.21515/1990-4665-173-008.
17. Bashkin V.N. *Modern Biogeochemistry: Environmental Risk Assessment*. 2d Edition. Dordrecht: Springer Publishers, 2006. 444 pp.
18. *A Research Road Map for Responsible Use of Agricultural Nitrogen* / M. Udvardi, F.E. Below, M.J. Castellano, et al. // *Frontiers in Sustainability of Food Systems*. 2021. Vol. 5. 660155. URL: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fsufs.2021.660155/full> (дата обращения: 01.03.2022). doi: 10.3389/fsufs.2021.660155
19. *Linking crop- and soil-based approaches to evaluate system nitrogen-use efficiency and tradeoffs* / R. A. Martinez-Feria, M. J. Castellano, R. N. Dietzel, et al. // *Agricultural Ecosystem Environment*. 2018. Vol. 256. P. 131–143. doi: 10.1016/j.agee.2018.01.002.
20. *50 year trends in nitrogen use efficiency of world cropping systems: the relationship between yield and nitrogen input to cropland*. L. Lassaletta, G. Billen, B. Grizzetti, et al. // *Environmental Research Letters*. 2014. Vol. 9. 105011. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/9/10/105011> (дата обращения: 03.03.2022). doi: 10.1088/1748-9326/9/10/105011.

Поступила в редакцию 21.03.2022

После доработки 27.04.2022

Принята к публикации 11.05.2022