

ПЛОДОРОДИЕ И АЗОТМИНЕРАЛИЗУЮЩИЙ ПОТЕНЦИАЛ ПОЧВ: СТАТИСТИКИ, МОДЕЛИ ДИАГНОСТИКИ И КИНЕТИКА ПРОЦЕССА

*Л.В. Будажапов, чл.-корр. РАН, А.К. Уланов, д.с.-х.н., А.С. Билтуев, к.б.н.,
ФГБНУ «Бурятский научно-исследовательский институт сельского хозяйства»
670045, г. Улан-Удэ, ул. Третьякова, д.25 «з». E-mail: nitrolu@mail.ru*

По данным многолетних исследований ($n = 24$) представлена развернутая статистическая и кинетическая оценка азотминерализующего потенциала (N_0) каштановой и лугово-черноземной мерзлотной почв с построением новой парадигмы в диагностике минерализуемого азота аридных и мерзлотных почв Забайкалья. Доказаны различия в кинетике (k) минерализации метаболического и устойчивого пула органического азота почв в вариантах без удобрений (контроль) и с внесением азотных удобрений. По результатам математического моделирования предложена диагностика текущего статуса минерализуемого органического азота почв (N_0) на конкретный момент времени (t_0) по величине константы (k) скорости процесса как устойчивый и независимый критерий при оценке азотминерализующего эффекта в почвах с критическими характеристиками плодородия, азотного статуса и гидротермического состояния. По всем почвам и вариантам оценки азотминерализующий потенциал (N_0) подчинялся функции экспоненты с разной направленностью и по величине оказался крайне незначительным – в диапазоне 0,1-2% от общего азота. Кинетика процесса, независимо от плодородия и азотного фонда почв, в вариантах без удобрений отличалась очень слабым проявлением ($k = 0,001-0,023 \text{ год}^{-1}$) и возростала значительно под воздействием азотных удобрений ($k = 0,053-0,355 \text{ год}^{-1}$).

Ключевые слова: статистики плодородия, аридные и мерзлотные почвы, азотминерализующий потенциал почв, модели диагностики, кинетика минерализации, метаболический и устойчивый пул, почвенный азот, функция экспоненты, константа скорости минерализации, азот криоаридных почв.

Для цитирования: Будажапов Л.В., Уланов А.К., Билтуев А.С. Плодородие и азотминерализующий потенциал почв: статистики, модели диагностики и кинетика процесса// Плодородие. – 2022. – №6. – С. 46-49. DOI: 10.25680/S19948603.2022.129.12.

Практика оценки минерализуемого органического азота в почвах с разным состоянием плодородия, азотного фонда и микробоценоза базировалась, как правило, на методах ускоренной биологической инкубации с имитированием естественной минерализации [2,11] и на химической экстракции с извлечением органических соединений почвенного азота, которые подвергаются минерализации в естественных условиях [3,10]. При всей позитивности методов, их результативность имела вполне корректные издержки, в т.ч. во времени, без перспектив прогнозных сценариев этой оценки. Соответственно, рядом отечественных и зарубежных авторов, особенно в последней четверти XX в. и начале XXI столетия, предложены подходы, позволяющие, исходя из некоторого постоянного параметра, рассчитать величину минерализации азота применительно к конкретным условиям на нулевой (t_0) момент времени [7]. По мнению авторов, таковым параметром выступает потенциал минерализации (N_0) почвенного азота. Он отражает характеристики процесса во времени при совокупном влиянии биотических и абиотических признаков. Мотивация такого подхода для почв с низким плодородием и бедным составом азотного фонда при наличии скудного микробоценоза на фоне жестких гидротермических режимов функционирования представляла несомненную актуальность. Исходя из этого, предпринята попытка реализовать такой подход применительно к оценке азотминерализующего потенциала (N_0) для криоаридных почв с разным уровнем плодородия и азотного фонда. В диагностике азотного статуса определение азотминерализующего потенциала (N_0) почв детально впервые представлено в работе G. Stanford, S.L. Smith (1972) [9]. Согласно их оценкам, величина N_0 характеризует количество органического азота почв, которое минерализуется на нулевой момент времени

(t_0) за неопределенно долгое время. В разной степени подобные оценки предприняты рядом отечественных авторов для почв европейской части [2,6] и зарубежных авторов [7,8,11].

Цель исследований – теоретически обосновать кинетические характеристики азотминерализующего потенциала аридных и мерзлотных почв на основе различий в скоростных константах с разной направленностью при общем характере процесса как новая парадигма в построении концепции диагностики азотного режима почв, независимо от плодородия и состояния азотного их фонда.

Методика. Результативность исследований достигнута путем постановки микрополевых опытов по общепринятым методикам [4] на типичных массивах каштановой и лугово-черноземной мерзлотной почв Республики Бурятия, заложенных в сосудах из полиэтиленовой пленки без дна размером 30 x 30 x 40 см, вмещающих 28 и 49 кг абс.-сух. почвы по общей схеме: 1) контроль, без удобрений; 2) $P_{40}K_{40}$ – фон; 3) фон + N_{60} в восьмикратной повторности с ежегодным внесением весной перед посевом с рендомизированным размещением в 1996-2020 г. В опытах высевали яровые зерновые культуры районированных сортов с чередованием пшеница – ячмень – овес. Почвенные образцы отбирали ежегодно с 0-20 см слоя каждого варианта в динамике (весна – лето – осень) с последующим определением общего и минерального азота по стандартным методикам [1, 4]. Статистическая оценка огромного массива данных по изменению показателей плодородия почв, общего и минерального азота в почвах по вариантам выполнена по общепринятым методикам.

Азотминерализующий потенциал почв (N_0) и константа скорости процессов (k) минерализации почвенного азота рассчитаны согласно уравнению кинетики

первого порядка: $dN / dt = k N$, где $N = N_0 - N_t$, т.е. количество потенциально минерализуемого азота; k – константа скорости процесса или доля N_0 , минерализуемая в единицу времени (t). На этом основании выведена кинетика процессов (k), величина которых отражала скорость характеристики минерализации органического азота почв, которые в совокупности отражали общую кинетическую панораму внутрпочвенного процесса и различия по вариантам опыта в почвах. Ранее аналогичные подходы к оценке величин N_0 для криоаридных почв с бедным составом их азотного фонда и жестким гидротермическим режимом отсутствовали. Подобное восприятие минерализации почвенного азота позволила выстроить скоростные критерии по диагностике такого уникального внутрпочвенного процесса азотной трансформации для специфических почв.

Результаты и их обсуждение. По уровню плодородия почвы различались и отражали типичное представительство аридных почв сухой степи и мерзлотных почв криолитозоны. При низком плодородии каштановой почвы, лугово-черноземная мерзлотная характеризовалась высоким плодородием, в которых содержание гумуса по выборочной средней составило 1,58 и 6,71% и общего азота 0,137 и 0,433% соответственно с незначительной величиной варьирования (табл. 1).

1. Статистические показатели агрохимических свойств каштановой и лугово-черноземной мерзлотной почвы (слой 0-20 см)

Параметры оценки	Каштановая почва, n = 16			Лугово-черноземная мерзлотная почва, n = 16				
	M ± m	σ	V, %	M ± m	σ	V, %		
pH _{сол.}	7,2 ± 0,1	0,24	3,40	7,0 ± 0,1	0,20	2,85		
Гумус, %	1,58 ± 0,05	0,12	7,70	6,71 ± 0,02	1,14	17,0		
N _{общ.}	мг/кг	1370,1 ± 40,0	97,9	7,20	4332,0 ± 64,3	159,9	3,69	
		N – NO ₃ ⁻	0,94 ± 0,1	1,01	88,6	9,53 ± 0,4	6,02	63,2
N – NH ₄ ⁺		3,54 ± 1,6	2,08	58,8	19,7 ± 2,1	5,11	25,9	
Σпогл. основ.	мг экв/100 г	14,8 ± 0,9	4,82	32,4	33,1 ± 2,0	8,03	24,2	
		P ₂ O ₅	1,82 ± 0,2	0,44	24,2	4,11 ± 0,2	0,54	13,0
Подвижные*, мг/100 г		K ₂ O	11,6 ± 1,1	2,52	21,7	15,9 ± 0,4	1,52	9,60

*Подвижные в каштановой почве – по Мачигину, в лугово-черноземной – по Чирикову.

При этом каштановая почва отличалась выраженным дефицитом увлажнения, непромывным типом водного режима и сезонно-промерзающим температурным режимом. В составе азотного фонда значительная часть приходилась на трудн гидролизуемые органические соединения азота, а доля минерального азота не превышала 1,5% от общего с доминированием аммонийно-обменного. Специфика лугово-черноземной мерзлотной почвы определялась высоким залеганием многолетней мерзлоты, мерзлотным периодически возвратно-промывным типом водного режима и постоянным дефицитом тепловых ресурсов, характер проявления которых существенно ограничивал высокое плодородие. В составе азотного фонда значительная часть приходится на органические соединения азота, а доля минерального не превышала 3-5% от общего.

Специфика режимных процессов и своеобразие плодородия почв наложили отпечаток на кинетические характеристики минерализации почвенного азота.

Величина азотминерализующего потенциала (N_0) в почвах складывалась различно (табл. 2).

2. Статистики изменения содержания общего азота в почвах и величина азотминерализующего потенциала (N_0), слой 0-20 см

Признак оценки	Вариант	Статистические показатели, n = 24				N_0	
		M ± m	lim	σ	V, %	мг/кг	%
Каштановая	Исходное	1370,1 ± 40,0	1257,5 – 1463,1	98,0	7,2	-	-
	Контроль	1171,7 ± 28,4	1011,1 – 1321,1	94,3	8,1	29,8	2,17
	Фон + N	1302,3 ± 10,7	1189,3 – 1423,1	35,4	2,7	11,4	0,8
Лугово-черноземная	Исходное	4332,0 ± 65,3	4112,5 – 4402,0	159,9	3,7	-	-
	Контроль	4013,0 ± 59,2	3700,2 – 4288,7	167,5	4,2	61,6	1,4
	Фон + N	4337,6 ± 59,2	4219,3 – 4435,1	9,40	0,22	3,40	0,08

НСР₀₅ каштановая почва: контроль – 12,77, фон + N – 10,47, лугово-черноземная мерзлотная почва: контроль – 32,17, фон + N – 3,71

Динамика ежегодного снижения содержания общего азота в почвах в результате минерализации органических соединений почвенного азота, независимо от различий плодородия и режимных процессов, была наиболее выраженной на контроле (без удобрений) с незначительной вариабельностью (см. табл. 2). Подобное снижение во времени повсеместно было статистически значимым.

Эмпирическая модель снижения общего азота (N почвы) каштановой почвы в варианте без удобрений (контроль) в динамике многолетних рядов ($n = 24$), а равно прогнозная модель оценки азотминерализующего потенциала (N_0) этой почвы имела вид экспоненциальной регрессионной функции:

$$N \text{ почвы} = 1339,1 e^{-0,023 t} \quad (1)$$

$$N_0 = 288,8 e^{-0,355 t} \quad (2)$$

где 1339,1 и 288,8 – константы; t – порядковый номер года; e – основание натурального логарифма; 0,023 и 0,355 – региональная константа (k) скорости минерализации органического азота почвы. При этом константа $k = 0,335 \text{ год}^{-1}$ отражала кинетику минерализации метаболического пула почвенного азота (лабильная фракция), а константа $k = 0,023 \text{ год}^{-1}$ – кинетику минерализации устойчивого пула азота (медленнорастворимая фракция).

Аналогичный характер моделей выявлен для лугово-черноземной мерзлотной почвы в этом варианте с различиями в кинетических константах (k) при оценке изменений минерализации лабильной и медленнорастворимой фракции:

$$N \text{ почвы} = 4310,1 e^{-0,016 t} \quad (3)$$

$$N_0 = 185,2 e^{-0,291 t} \quad (4)$$

где 0,016 и 0,291 – региональные константы скорости минерализации азота для устойчивого ($k = 0,016 \text{ год}^{-1}$) и метаболического пула ($k = 0,291 \text{ год}^{-1}$) почвенного азота, отражающие кинетику минерализации азота мерзлотной почвы.

Анализ выведенных скоростных характеристик минерализации почвенного азота в отсутствии возмещения на поддержание азотного фонда (контроль) свидетельствует о высокой кинетике (k) снижения азота на каштановой почве с низким почвенным плодородием и азотным фондом. Параметры (k) снижения в части минерализации лабильной фракции азота ($k = 0,355 \text{ год}^{-1}$) выше, чем в лугово-черноземной почве с высоким плодородием ($k = 0,291 \text{ год}^{-1}$). Аналогичные различия сохранились и в кинетике снижения медленнорастворимой фракции.

мой фракции устойчивого пула азота этих почв. При этом, величина азотминерализующего их потенциала (см. табл.2), которая соответственно составила $N_0 = 2,17\%$ и $N_0 = 1,42\%$, оказалась ниже полученных ранее отечественными и зарубежными авторами, отражая значительно меньший азотминерализующий эффект аридных и мерзлотных почв как отклик на критический уровень гидротермического и микробиологического статуса. В этом смысле подобное свидетельствует о проявлении фундаментального принципа Ле-Шателье в частном порядке в оценке устойчивости азотного их фонда при слабой кинетике минерализации азота почв в жестких условиях функционирования.

Под воздействием азотных удобрений панорама снижения общего азота и величина азотминерализующего потенциала (N_0) почв, независимо от плодородия, складывалась в ином проявлении при схожем характере с различиями в кинетике минерализации почвенного азота. Эмпирическая модель снижения общего азота (N почвы) каштановой почвы в этом случае и азотминерализующего потенциала (N_0) аппроксимировалась схожим характером с различиями в кинетических характеристиках процесса в динамике многолетних рядов:

$$N \text{ почвы} = 1365,2 e^{-0,008 t} \quad (5)$$

$$N_0 = 22,67 e^{-0,148 t} \quad (6)$$

где 0,008 и 0,148 – региональные константы скорости минерализации почвенного азота, соответственно, устойчивого ($k = 0,008 \text{ год}^{-1}$) и метаболического ($k = 0,148 \text{ год}^{-1}$) пула, которые отражали кинетику этого процесса в почвах. По аналогичному сценарию при значительно меньших кинетических усилиях развивался процесс минерализации органического азота лугово-черноземной мерзлотной почвы под воздействием азотных удобрений. Величина ежегодной минерализации почвенного азота составила в этом случае в среднем 3,4 мг/кг, или 0,008 % общего азота и отражала азотминерализующий потенциал N_0 . Модель диагностики изменения общего азота в почве и азотминерализующего потенциала (N_0) под влиянием азотных удобрений описывалась регрессией экспоненты:

$$N \text{ почвы} = 4354,9 e^{-0,0009 t} \quad (7)$$

$$N_0 = 4,78 e^{-0,053 t} \quad (8)$$

с очень незначительной кинетикой минерализации ($k = 0,0009 \text{ год}^{-1}$) медленно разлагаемой фракции почвенного азота или устойчивого пула при слабой кинетике минерализации ($k = 0,053 \text{ год}^{-1}$) лабильной фракции азота лугово-черноземной мерзлотной почвы или метаболического пула почвенного азота. По сути эти значения кинетических констант (k) представляли региональные константы процесса минерализации азотного фонда мерзлотных почв. Отсюда, чрезвычайно слабая кинетическая составляющая (k) азотминерализующего потенциала (N_0), даже лабильных фракций органического азота, обеспечивает высокую устойчивость азотного фонда этой почвы.

Заключение. Азотминерализующий потенциал (N_0) криоаридных почв в динамике многолетних рядов ($n = 24$) как резерв повышения плодородия в части пополнения доступным минеральным азотом незначительный. При этом характер процесса во всех случаях под-

чинялся регрессии экспоненты. В каштановой почве с низким азотным фондом ежегодная минерализация в среднем не превышала 2,2% от общего азота с лимитами 0,5-6,4%, а в лугово-черноземной мерзлотной почве с высоким азотным фондом оказалась ниже и составила 1,4% с пределами 0,6-3,8% при незначительном варьировании величин. В абсолютном выражении величина N_0 в лугово-черноземной мерзлотной почве составила в среднем 61,6 мг/кг с лимитами 26,4-166,4 мг и почти вдвое превышала аналогичный каштановой почвы – 29,8 мг (7,40-87,3 мг). В вариантах с внесением азотных удобрений величина N_0 в почвах оказалась очень незначительной. Размеры ежегодной минерализации азота каштановой почвы не превышали в среднем 0,8% от общего азота с лимитами 0,4-2,3%, а в лугово-черноземной мерзлотной почве оказались ничтожно малы – 0,08% с пределами 0,08-0,1% при абсолютных значениях величины N_0 в среднем, соответственно, 11,4 мг и 3,4 мг/кг. При низкой и незначительной величине азотминерализующего потенциала (N_0) криоаридных почв, особенно при внесении азотных удобрений, кинетические параметры выступают одним из ключевых критериев диагностики минерализуемого азота в почвах на текущий и неопределенный период времени. В этом и состоит новая парадигма в построении концепции диагностики азотминерализующего потенциала этих почв по кинетическим характеристикам, независимо от уровня плодородия и состояния их азотного фонда. Причем, благодаря выстроенным математическим моделям диагностики N_0 , через скоростные характеристики можно перейти к абсолютным величинам N_0 на любой момент времени (t_0). Именно в этом подходе удалось впервые вычлнить кинетику минерализации устойчивого и особенно метаболического пула почвенного азота в аридных и мерзлотных режимах, направленность и кинетическая константа (k) которых в цифровом восприятии различаются значительно и отражают специфику почвенного плодородия и азотного режима почв.

Литература.

1. Ариунушкина Е.В. Руководство по химическому анализу почв. – М.: МГУ, 1970. – 481 с.
2. Башкин В.Н. Агрогеохимия азота. – Пушкино: ОНТИ НЦБИ АН СССР, 1987. – 270 с.
3. Гамзиков Г.П., Кострик Г.И., Емельянова В.Н. Баланс и превращение азота удобрений. – Новосибирск: Наука, 1985. – 161 с.
4. Кореньков Д.А., Борисова Н.И., Руделев Е.В. и др. Особенности применения методов с использованием изотопа азота в агрохимических исследованиях. – М.: ВИУА, 1990. – 30 с.
5. Семенов В.М., Козут Б.М. Почвенное органическое вещество. – М.: ГЕОС, 2015. – 233 с.
6. Akasaka K., Konno T., Owa N. Assessment of nitrogen potential mineralization in soil Mekong river // Bull. Fac. Agr. Niigata Univ. 2033.55. № 2. P.151-160.
7. Delin S., Linden B. Relations between net nitrogen mineralization and soil characteristics within an arable field // Acta agr. Scand.B.2002.52. № 2-3. P.78-85.
8. Stanford G., Smith S.L. Nitrogen mineralization potentials of soils // Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 1972. V.36. № 3. P. 465-472.
9. Jansson S.L., Person J., Stevenson F.J. Mineralization and immobilization of soil nitrogen // Agronomy. 1982. 22. P. 229-252.
10. Zhang M.A., Karamanos R.E., Kryzanowski L.M. et al. Singl measurement to predict potential mineralizable nitrogen // Comm. Soil Sci. and Plant Anal. 2002. 33. № 15-18. P.3517-3530.

L.V. Budazhapov, A.K. Ulanov, A.S. Biltuev

Buryat Research Institute of Agriculture, Tretyakova st, 25z, 670045 Ulan-Ude, Russia, e-mail: nitrolu@mail.ru

Based on a long-term study ($n = 24$) it is presented an extended statistical and kinetic estimation of nitrogen mineralizing potential (N_0) in chestnut and meadow-chernozem frozen soils with a new paradigm in diagnosing mineralizable nitrogen in arid and frozen soils of Transbaikalia. Differences in the kinetics (k) of mineralization of metabolic and stable pool of organic nitrogen of soils in the variants without fertilizers (control) and with the application of nitrogen fertilizers have been proved. It has been proposed due to the results of mathematical modeling, the diagnosis of a current mineralizable status of soil organic nitrogen (N_0) at a particular time (t_0) by the value of the process rate constant (k) as a stable and independent criterion in assessing the nitrogen-mineralizing effect in soils with critical characteristics of fertility, the nitrogen status and the hydrothermal state. For all soils and evaluation variants the nitrogen-mineralising potential (N_0) was subjected to an exponential function with different directednesses and turned to be extremely insignificant in the range of 0.1-2% of total nitrogen. The kinetics of the process, regardless of the soil fertility and nitrogen stock, on the variants without fertilizers differed that it was very weak ($k = 0.001 - 0.023 \text{ year}^{-1}$) and increased significantly under the influence of nitrogen fertilizers ($k = 0.053 - 0.355 \text{ year}^{-1}$).

Key words: fertility statistics of arid and frozen soils, nitrogen-mineralizing potential of soils and diagnostic models, kinetics of mineralization of metabolic and stable pool of soil nitrogen, exponent function and constant of nitrogen mineralization rate of cryoarid soils

УДК 631.452:631.8:631.821.1

DOI: 10.25680/S19948603.2022.129.13

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ СОДЕРЖАНИЯ ГУМУСА В ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЕ

О.А. Савоськина, д.с.-х.н., А.В. Шитикова, д.с.-х.н., А.В. Константинович, к.с.-х.н.,
И.А. Заверткин, к.с.-х.н., Е.М. Куренкова, ФГБОУ ВО Российский государственный
аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева
Москва, Россия, ул. Тимирязевская, д. 49, osavoskina@rgau-msha.ru, e-mail: soa-18@mail.ru

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования
Российской Федерации в рамках программы развития Университета в соответствии
с программой академического стратегического лидерства "Приоритет-2030"
(Приказ № 1083 от 01.11.2022 г. "Научный фронт")

Для улучшения баланса органического вещества дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы рекомендуется совместное внесение органоминеральных удобрений с химическим мелиорантом (известью), что снижает темпы минерализации гумуса в почве и улучшает питание растений. Показано влияние минеральных удобрений, навоза и известки на баланс гумуса и его стабилизацию в агроэкосистеме длительного полевого опыта.

Ключевые слова: плодородие почвы, органическое вещество, растительные остатки, органические удобрения, минеральные удобрения, известкование, водопрочность и плотность почвы, полевые культуры.

Для цитирования: Савоськина О.А., Шитикова А.В., Константинович А.В., Заверткин И.А., Куренкова Е.М. Технологические приемы стабилизации содержания гумуса в дерново-подзолистой почве// Плодородие. – 2022. – №6. – С. 49-52. DOI: 10.25680/S19948603.2022.129.13.

Ведение устойчивого сельскохозяйственного производства решает ряд важных вопросов, касающихся использования разных источников энергии, эффективности применения различных видов удобрений и мелиорантов, воздействия на окружающую среду. Все это в совокупности способствует повышению урожайности сельскохозяйственных культур при сохранении и даже расширении почвенного плодородия [1].

В создании и сохранении почвенного плодородия органическое вещество почвы играет важную и многогранную роль. С его содержанием и качественным составом тесно связаны режим питания растений и различные свойства почвы (физико-химические, физико-механические, биологические и биохимические), что объясняется особенностями химического строения, биологической доступностью, высокой энергоемкостью и активностью органического вещества [2-5].

В современных условиях ведения сельскохозяйственного производства проблема накопления и сохране-

ния органического вещества дерново-подзолистых почв сохраняет свою актуальность, так как получение высокой урожайности полевых культур с высоким качеством продукции при наименьших затратах труда и невозполнимой энергии возможно только при оптимальных уровнях гумусированности почвы для конкретных условий агроландшафтов [6, 7].

Важное значение в воспроизводстве гумуса почвы, в частности плодородия, в целом имеют сельскохозяйственные культуры, которые оставляют различное количество растительных остатков для образования органического вещества почвы [8].

Решающую роль в расширенном воспроизводстве гумуса почвы играют органические удобрения, дозы внесения которых зависят от накопления в хозяйстве навоза крупного рогатого скота или птичьего помета, определяются структурой посевных площадей и видами севооборотов, наличием торфа и сапропеля на территории сельскохозяйственных предприятий или других альтер-