

КИНЕТИКА ФОРМИРОВАНИЯ ИММОБИЛИЗАЦИОННО МИНЕРАЛИЗАЦИОННОГО ПУЛА АЗОТА КРИОАРИДНЫХ И МЕРЗЛОТНЫХ ПОЧВ: ЭФФЕКТ АКТИВНОСТИ МИКРОБНОГО ПУЛА И ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ЗАКОНОВ ТЕРМОДИНАМИКИ

Л. В. Будажапов

*Академия наук Республики Саха (Якутия), г. Якутск, Россия,
nitrolu@mail.ru*

АННОТАЦИЯ. На основе многолетних исследований в микрополевых опытах с ^{15}N и привлечением статистики и математического моделирования дана развернутая панорама кинетических характеристик трансформации азота в внутрипочвенных процессах иммобилизации – минерализации по эффекту разного проявления кинетической активности представителями микробного ценоза почв аридного и мерзлотного ряда как отражение фундаментального закона термодинамики и принципа Ле-Шателье в частном проявлении. В итоге, специфика этих кинетических проявлений (k) в формировании такого высоко динамичного азотного пула в почвах, независимо от их плодородия, и обеспечивает динамичную устойчивость функционирования иммобилизации и минерализации азота, обеспечивая поддержание азотного статуса почв и пополнение доступным азотом на любой момент времени (t). Подобная оценка различий во внутрипочвенных кинетических превращениях азота позволяет выстроить алгоритм прогнозных сценариев изменения азотного фонда почв с разным плодородием и перспективой создания цифрового помощника.

Ключевые слова: процессы иммобилизации и минерализации азота в почвах, кинетика роста и активности почвенной микрофлоры, константа скорости (k) процессов.

Общепризнанная значимость процессов внутрипочвенной трансформации азота в поддержании азотного фонда и пополнении доступным азотом почв не вызывает сомнений [1,2,3]. При этом, кинетика ключевых внутрипочвенных процессов превращений азота с характеристикой скоростных проявлений, оставалась за рамками подобных оценок. Последние, при всем многообразии, отражают фундаментальные законы термодинамики в частном восприятии – принцип Ле-Шателье и второй закон термодинамики.

Результативность исследований достигнута в микрополевых опытах с ^{15}N на каштановой и лугово-черноземной мерзлотной почве по общепринятым методикам [3,4] с применением статистического анализа и математического моделирования с вычленением кинетики процессов (k - константа скорости). Схема микрополевого опыта включала три варианта: 1). контроль, без удобрений; 2). P40K40 – фон; 3) фон + $^{15}\text{N}60$, которые вносили ежегодно весной перед посевом яр пшеницы, ячмень и овес. Меченую соль сульфата аммония ($^{15}\text{NH}_4$) $_2\text{SO}_4$ с исходным обо-

гащением 38.5–87.2 ат. % ^{15}N вносили в две разные повторности опыта, в результате которой через десять лет почва стала «меченой» по ^{15}N . Почвенные образцы отбирали ежегодно в динамике по «скользящему графику» через каждые 10 дней в прямом действии и последствии ^{15}N . Кинетику процессов внутрипочвенных превращений азота оценивали по различиям кинетических констант (k) процессов иммобилизации азота удобрений и минерализации иммобилизованного азота в почвах, которые удалось вычленить согласно построенной модели экспоненциальной регрессии.

В результате исследований и анализа накопленной базы данных впервые для аридных и мерзлотных почв северной части Центральной Азии установлена высокая кинетика процесса иммобилизации азота удобрений (^{15}N) в почвах после внесения, величина которой оказалась обратно пропорциональной величинам закрепления в органическую форму гетеротрофной микрофлорой (табл.1).

При меньших статистиках величин иммобилизации азота удобрений каштановой

почвой ($41.1 \pm 1.4\%$) в сравнении с лугово-черноземной мерзлотной ($53.3 \pm 1.3\%$) кинетика процесса в первом случае оказалась значительно выше ($k = 0.449$ в сутки), чем во втором ($k = 0.105$ в сутки). Соответственно, на почвах с низким плодородием и азотным фондом кинетические усилия на иммобилизацию азота удобрений втрое превышали кинетику закрепления азота в органическую форму лугово-черноземной мерзлотной почвой. И наоборот, в мерзлотной почве с более высоким плодородием и азотным статусом, большая величина закрепления азота удобрений обеспечивалась меньшими кинетическими усилиями (табл.1).

В этом восприятии, такой характер зависимостей процесса внутрипочвенной трансформации азота поддерживался в частном определении фундаментальным принципом Ле-Шателье. При низком энергетическом статусе каштановой почвы поступление извне дополнительных источников энергии в виде азота удобрений приводило к нивелированию неблагоприятных режимов ее функционирования во времени (полевой сезон) и пространстве (почвенный профиль), обеспечивая повышение азотного фонда (энергетического состояния) за счет иммобилизации вносимого азота при высоких кинетических усилиях. И наоборот, в почвах с высоким плодородием повышение статуса азотного фонда при поступлении азота удобрений обеспечивается процессом иммобилизации вносимого азота при значительно меньших кинетических усилиях. Отсюда, фундаментальный закон сохранения энергии как один из наиболее ключевых законов природы (первый закон термодинамики) в этом частном определении вполне адекватно отражает приложение этого закона в отклике на внутрипочвенную трансформацию азота – энергетический статус почвенной системы (азот-

ный фонд) под нагрузкой азота удобрений как источника энергии извне трансформируется в другое состояние с невозможностью исчезновения энергетического статуса самой системы.

Фундаментальные процессы внутрипочвенной трансформации азота в формате изменяющегося динамического их равновесия (иммобилизация – минерализация азота) во времени и пространстве определяется главным образом активностью почвенной микрофлоры [5,6]. В этом аспекте результативность проведенных исследований не стала исключением (табл.2).

Однако, в этом позиционировании, благодаря ^{15}N в сочетании с вариационно-статистическим анализом и математическому моделированию впервые удалось значительно расширить представления по участию и вкладу микробного пула почв в процессы иммобилизации азота удобрений и минерализации почвенного (иммобилизованного) азота с позиций проявления разных кинетических усилий и характеристик как самих процессов, так и микробного пула при разграничении понятий «роста и активности» основных групп почвенных микроорганизмов. При этом, основные идеи и ключевые постулаты в реализации подобной оценки выверены из анализа многолетних работ выдающейся группы авторов МГУ по биологии почв [5,6]. Именно в этих работах впервые выстроена принципиальная концепция по оценке скоростных различий микроорганизмов почв в отношении к разным доступным источникам минерального питания и энергетических поступлений.

Присутствие в почвах основных представителей почвенных микроорганизмов оказалось различным и определялось различиями экологических ниш с высокой численностью в лугово-черноземной мерзлотной почве, для

Таблица 1. Статистики масштабов закрепления и кинетические составляющие процесса иммобилизации ^{15}N удобрения в аридной и мерзлотной почве

Почва	Статистические показатели, % от внесенного					Кинетика процесса – k
	M ± m	lim	σ	M ± tm	V, %	
Каштановая	41.1 ± 1.4	36.2–48.1	4.1	37.9–44.3	9.98	0.449 в сутки
Лугово-черноземная мерзлотная	53.3 ± 1.3	48.1–61.2	3.8	50.3–56.3	7.13	0.105 в сутки

Таблица 2. Кинетика (k) роста и активности микроорганизмов аридных и мерзлотных почв при формировании иммобилизационного пула азота (¹⁵N)

Параметры оценки	Каштановая почва (n = 10)	Лугово-черноземная мерзлотная почва (n = 10)
Грибы		
численность, тыс / г	20.7 ± 1.9	85.9 ± 4.82
k	скорости роста	0.0004 в год
	активности (фон + N60)	0.011 в год
Актиномицеты		
численность, млн. / г	1.84 ± 0.49	7.37 ± 0.31
k	скорости роста	0.014 в год
	активности (фон + N60)	0.129 в год

которой характерно высокий потенциал плодородия с богатым и насыщенным реестром почвенной биоты (табл.2). В этом восприятии, низкий потенциал плодородия каштановой почвы с бедным азотным фондом предопределен и крайне скудным видовым и таксономическим представительством микробного пула в условиях, выраженных (крио)аридных режимов [3,7]. Тем не менее, несмотря на эти различия, кинетика роста доминирующих их микроорганизмов, находилась в пределах очень низких значений и повсеместно оказалась слабой – k = 0.0004–0.014 в сутки (табл.2). В отличие от этих скоростных характеристик, кинетика активности (k) этих же почвенных микроорганизмов при поступлении извне минеральных источников азота (фон + N60) приобрела совершенно иную панораму (табл.2). При общем значительном и резком возрастании кинетической активности микрофлоры каштановой (k = 0.010–0.011 в сутки) и особенно – в лугово-черноземной мерзлотной почве (k = 0.129–0.434 в сутки), адекватно этому и возростала кинетика (k) процесса иммобилизации азота удобрений (¹⁵N), величина и константа скорости которого складывались различно (табл.1). В целом, выявленный характер кинетических параметров иммобилизации азота и активности микробного пула, участвующих в функционировании этого процесса вполне адекватно отражают эффект фундаментального принципа Ле-Шателье в приложении к частному аспекту внутрипочвенной трансформации азота.

В разрезе кинетических характеристик формирования иммобилизационного пула азо-

та в почвах аридного и мерзлотного ряда отметим явное доминирование высокой кинетики снижения (k) минерального ¹⁵N удобрений над кинетикой (k) иммобилизации ¹⁵N удобрения микробным их пулом в пределах одного времени. Соответственно почвам кинетика (k) снижения минерального ¹⁵N удобрений составила k = 0.867 сутки⁻¹ и k = 0.865 сутки⁻¹ при кинетических параметрах иммобилизации ¹⁵N удобрений – k = 0.449 в сутки и k = 0.105 в сутки. В этом смысле, скоростные характеристики снижения минерального азота в почвах почти вдвое превышают аналогичные закрепления азота гетеротрофным пулом.

Известно, что процесс иммобилизации азота удобрений в почвах находится в сопряженном равновесии с процессом минерализации ранее иммобилизованного (почвенного) азота [1–4,7–9]. В проведенных исследованиях подобное не стало исключением. При этом, доказательность общепризнанных классических постулатов впервые реализовано через кинетические (скоростные) парадигмы.

Выявлена высокая кинетика минерализации лабильной фракции почвенного (иммобилизованного ¹⁵N) азота, константа скорости которой в каштановой почве (k = 0.148 год⁻¹) на варианте РК + N60 почти втрое превышала аналогичную для лугово-черноземной мерзлотной почвы (k = 0.053 год⁻¹). Подобное отражало высокую устойчивость этой фракции азотного фонда мерзлотной почвы нежеле почв аридного ряда. Как следствие, это сопровождалось низким потенциалом доступного азота в каштановой почве. При этом, кинетика

устойчивых форм или трудно- гидролизуемых фракций почвенного азота (ранее иммобилизованного) при внесении азота удобрений оказалась значительно ниже, константа скорости которых составила соответственно почвам $k = 0.008 \text{ год}^{-1}$ и $k = 0.0009 \text{ год}^{-1}$. Как следствие, незначительный потенциал минерализации почвенного азота трудно- гидролизуемых фракций на несколько порядков ниже в мерзлотной почве. На варианте контроль (без удобрений) кинетика (k) минерализационных процессов почвенного азота сохранилась без изменений при более высоких кинетических константах (k), обеспечивающих значительное снижение азотного статуса почв в отсутствие восполнения извне. Как следствие, на этих вариантах содержание доступных форм азота ограничено, а равно низкое состояние азотного их фонда.

Панорама кинетических характеристик формирования иммобилизационно – минерализационного пула азота позволила раскрыть скоростные зависимости этих процессов в цикле превращений азота и вычленил кинетический эффект активности почвенных микроорганизмов в криоаридных и мерзлотных почвах

северной части Центральной Азии как современная биокинетическая парадигма в оценке высокой динамичности процессов и построении прогнозных сценариев трансформации азота в системе почва – растение. На этой основе формируется база данных по разной кинетической ассимиляции, устойчивости и подвижности почвенного азота и азота удобрений, характер и направленность которых в итоге обеспечивает поддержание (пополнение) азотного фонда почв с одновременным потенциалом увеличения доступного минерального азота в почвах. Доказанный кинетический эффект внутрипочвенной трансформации азота поддерживается в частном проявлении фундаментальными законами термодинамики и сохранения энергии (вещества) вкуче с уникальным принципом Ле-Шателье как практика устойчивого функционирования природных систем в аридных и мерзлотных режимах. В этом смысле, кинетика формирования иммобилизационного пула в почвах и минерализационного отклика с кинетическим вкладом микробного их пула представлена впервые.

KINETICS OF IMMOBILIZATION AND MINERALIZATION OF NITROGEN POOL'S FORMATION IN CRYOARID AND PERMAFROST SOILS: THE EFFECT OF MICROBIAL POOL'S ACTIVITY AND FUNDAMENTAL LAWS OF THERMODYNAMICS

L. V. Budazhapov

*Academy of Sciences of the Republic of Sakha (Yakutia), Yakutsk, Russia,
nitrolu@mail.ru*

ABSTRACT. On the basis of long-term researches in micro-field experiments with ^{15}N and involving statisticians and mathematical model simulations it was provided a detailed panorama of kinetic characteristics of nitrogen transformation in soil-formation processes of immobilization – mineralization due to the effect of different demonstrations of kinetic activity by the representatives of microbial cenosis of arid and permafrost soils as a reflection of the fundamental law of thermodynamics and Le Chatelier's principle in a particular display. As a result, the specific nature of these kinetic displays (k) in the formation of such a highly dynamic nitrogen pool in soils, regardless of their fertility, provides a dynamic stability of the functioning of nitrogen immobilization and mineralization, ensuring the maintenance of the nitrogen status of soils and replenishment with available nitrogen at any moment of time (t). Such assessment enables to identify an algorithm of predictive scenarios of in-soil nitrogen transformations for the soils of various productivity with the prospect for creation of a digital supporter.

Keywords: *processes of nitrogen immobilization and mineralization in soils, kinetics of growth and productivity of soil microflora, the velocity constant (k) of processes*

Литература

- 1 Гамзиков Г. П. Азот в земледелии Западной Сибири. М.: Наука, 1981. 266с.
- 2 Кудеяров В. Н. Цикл азота в почве и эффективность удобрений М.: Наука, 1989. 216 с.
- 3 Будажапов Л. В. Биокинетический цикл азота и оборот азотных пулов. М.: ВНИИА им. Д. Н. Прянишникова, 2019. 288с.
- 4 Смирнов П. М. Вопросы агрохимии азота (в исследованиях с¹⁵N) М., 1982. 74с.
- 5 Звягинцев Д. Г. Бабьева И. П., Зенова Г. М. Биология почв. М.: Изд – во МГУ,
6 2005. 445с.
- 7 Бабьева И. П., Зенова Г. М. Биология почв. М.: МГУ, 1989. 336 с.
- 8 Гамзиков Г. П. Агрохимия азота в агроценозах. (Рос. акад. с-х. наук, Сиб. отд). Новосибирск: Новосибирский ГАУ, 2013.790 с.
- 9 Руделев Е. В. Минерализация – иммобилизация азота в основных типах почв России и эффективность азотных удобрений: автореф. дис. ... д-ра биол. наук / Е. В. Руделев; ВИУА. М., 1992. 34 с.
- 10 Petersen B. M. Jensen L. S., Hansen S. et al. CN – SIM: a model for the turnover of soil organic matter. II. Short-term carbon and nitrogen development // Soil Biol. Biochem. 2005. V.37. № 5. P. 375–393.