

ВКЛАД НИТРИФИКАЦИИ И ДЕНИТРИФИКАЦИИ В ОБРАЗОВАНИЕ ЗАКИСИ АЗОТА В ПРОФИЛЕ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ СУПЕСЧАНОЙ ПОЧВЫ

И. М. Мухина, Е. Я. Рижия, Н. П. Бучкина, Е. В. Балашов
 ФГБНУ Агрофизический научно-исследовательский институт
 Гражданский проспект, 14, Санкт-Петербург, 195220
 E-mail: muhinairina1989@gmail.com

Поступила в редакцию 27 июля 2015 г., принята к публикации 06 сентября 2015 г.

В лабораторном эксперименте проведена количественная оценка вклада процессов нитрификации и денитрификации в эмиссию закиси азота (N_2O) из профиля дерново-подзолистой супесчаной почвы. Результаты эксперимента показали, что денитрификация достоверно ($p < 0,001$) превышала нитрификацию (в среднем в 25–40 раз) в зависимости от глубины изучаемого профиля. С повышением влажности на 5% количество выделившейся N_2O в результате нитрификации увеличивалось в среднем в 1,4 раз, а в результате денитрификации – в 1,9 раз. С повышением температуры почвы на $5^\circ C$ как при нитрификации, так и денитрификации количество N_2O увеличивалось в среднем в 1,7 раз. Денитрификация увеличивалась вниз по почвенному профилю, а нитрификация уменьшалась с глубиной. Интенсивность процессов нитрификации и денитрификации во всех вариантах опыта достоверно ($p < 0,001$) повышалась с увеличением содержания минерального азота ($p < 0,001$) в среднем в два раза по сравнению с вариантами без внесения минеральных удобрений.

Ключевые слова: закись азота, нитрификация, денитрификация, дерново-подзолистая супесчаная почва, температура, влажность, минеральные удобрения.

CONTRIBUTION OF NITRIFICATION AND DENITRIFICATION IN THE NITROUS OXIDE FORMATION IN THE PROFILE OF AGRICULTURAL SOD-PODZOLIC SANDY LOAM SOIL

I.M. Mukhina, E.Y. Rizhiya, N.P. Buchkina, E.V. Balashov
 Agrophysical Research Institute,
 14 Grazhdansky prospect, St. Petersburg, 195220,
 E-mail: muhinairina1989@gmail.com

In a laboratory experiment, a quantitative assessment of the contribution of nitrification and denitrification in the emission of nitrous oxide (N_2O) from the profile of sod-podzolic sandy loam soil was conducted. The experimental results showed that denitrification was significantly higher ($p < 0,001$) than nitrification (in average – 25–40 times) and depended on the depth of the investigated soil profile. When soil water content was increased by 5%, the amount of N_2O released through nitrification was, on average, 1,4 times higher and the resulting denitrification – 1,9 times higher. When the soil temperature was increased by $5^\circ C$, for both, nitrification and denitrification, the amount of N_2O produced was, on average, 1,7 times higher. Denitrification increased down the soil profile while nitrification decreased with depth. The intensity of the nitrification and denitrification processes in all the variants of the experiment significantly ($p < 0,001$) increased with the increase of the soil mineral nitrogen content ($p < 0,001$) – on average was 2 times higher – in comparison with a variant without application of mineral fertilisers.

Keywords: nitrous oxide, nitrification, denitrification, sod-podzolic sandy loam soil, temperature, soil water content, mineral fertilisers.

ВВЕДЕНИЕ

Изучение источников и стоков закиси азота (N_2O) является актуальной темой исследований в мировом научном сообществе. Сравнительно низкая концентрация данного газа в атмосфере (310 ppb, по данным IPCC) компенсируется его чрезвычайной активностью – молекула N_2O в 200–300 раз сильнее способствует

образованию «парникового эффекта», чем молекула углекислого газа (CO_2), и продолжительность ее жизни в атмосфере составляет приблизительно 150 лет (Lashof, Ahuja, 1990). Основным источником азота являются сельскохозяйственные почвы (от 40 до 80% от всех источников антропогенного вклада в эмиссию N_2O , согласно IPCC). Прямые эмиссии N_2O из

почв обусловлены, во-первых, интенсивностью его образования в профиле почв и, во-вторых, величиной и направленностью потока в почвенном профиле. Источниками служат разнообразные микробиологические процессы при участии ферментов: аэробная и анаэробная денитрификация, автотрофная и гетеротрофная нитрификация, диссимиляционное восстановление нитратов в аммоний, процессы взаимодействия нитритов с аминокислотами, хемоденитрификация и некоторые другие. Все процессы, кроме автотрофной нитрификации и анаэробной денитрификации, по существующим оценкам, имеют низкую скорость в природной среде, их общий вклад в биогеохимический цикл азота в масштабах планеты невелик, и, как правило, не рассматривается в качестве значимого источника окисленных форм азота в наземных экосистемах (Умаров с соавт., 2007; Степанов, 2012). Активизации процесса денитрификации в наибольшей степени способствуют наличие доступного углерода и анаэробные условия, а нитрифицирующие бактерии нуждаются в аммонийном азоте и в аэробной среде. Оптимальной температурой для протекания процессов в почве является диапазон от 20 до 30 градусов и влажность, близкая или больше наименьшей влагоемкости (Blagodatskiy et al., 2008).

Из литературных данных (Breuer et al., 2002; Crutzen et al., 2008; Степанов и др., 2009) известно, что не менее 2/3 бактерий, распространенных в почвах, являются денитрификаторами. Образование N_2O при денитрификации в почвах может составлять в среднем 55% и варьировать в пределах 35–85%. Масштабы образования N_2O в почвах при нитрификации достигают 0,1–10% (Степанов и др., 2009). Оценка количества нитрифицирующих и денитрифицирующих бактерий, проведенная для дерново-подзолистой супесчаной почвы, показала, что количество последних в верхнем гумусовом горизонте может превышать количество первых в 53 раза (Рижия и др., 2015).

Скорость и направленность процессов нитрификации и денитрификации регулируется почвенными показателями – влажностью, плотностью сложения, температурой, рН, содержанием минерального азота и доступного органического вещества (Buchkina и др., 2008, 2013). В почвах существуют одновременно как аэробные, так и анаэробные зоны, поэтому трудно оценить отдельный вклад только нитрификации или только денитрификации в газообразные потери азота – чаще всего определяется их совместный вклад (Рижия и др., 2014). В связи с этим изучение отдельных факторов, влияющих на эмиссию N_2O из почв, а также поиск путей ее снижения через регулирование процессов, приводящих к ее образованию, являются актуальными задачами земледелия и охраны окружающей среды. Количественная оценка N_2O в результате нитрификации или денитрификации может являться одним из информативных индикаторов экологической устойчивости почв и использоваться для смягчения и предотвращения негативных последствий нарушения цикла азота (Кудеяров, 1999). Для выявления разделенного количественного вклада процессов нитрификации и денитрификации в эмиссию N_2O из дерново-подзолистой супесчаной почвы был проведен лабораторный эксперимент с целью оценки влияния различных параметров (температуры, влажности, содержания минерального азота) на накопление N_2O в данной почве.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объектом исследований служили дерново-подзолистые супесчаные почвы (агродерново-подзолистая типичная) стационара Меньковского филиала Агрофизического НИИ (Моисеев и др., 2013). Исследования проводились на образцах почв, отобранных с участка под многолетними травами 1-го года пользования со средней окультуренностью, из вариантов без внесения минеральных удобрений (контроль) и с внесением удобрений из расчета $N90P30K90$ на гектар (Оленченко и др., 2012). Образцы были отобраны в конце сентября 2013 г. с глубины

5–10, 25–30 и 45–50 см. Основные характеристики изучаемой почвы представлены в табл. 1 и 2.

Таблица 1. Основные агрохимические свойства изучаемых горизонтов дерново-подзолистой супесчаной почвы (на момент отбора образцов в конце сентября 2013 г.).

Вар-т	Гор-т см	рН сол.	мг кг ⁻¹					
			С общ	N общ	N-NO ₃	N-NH ₄	P ₂ O ₅	K ₂ O
N0	5–10	6,3	20,5±1,1	1,56±0,09	11,22±0,8	5,26±0,1	207±15	139±10
	25–30	5,8	22,4±1,3	1,42±0,11	20,25±0,9	5,41±0,2	132±19	76±5
	45–50	5,3	8,5±0,3	0,63±0,04	2,92±0,5	1,59±0,1	102±8	37±3
N90	5–10	6,2	23,6±1,5	1,61±0,10	18,42±0,9	10,06±0,2	259±16	164±12
	25–30	6,0	25,4±1,7	1,53±0,17	21,27±0,9	8,92±0,1	183±17	121±9
	45–50	5,6	12,5±0,5	0,75±0,06	8,84±0,4	5,09±0,1	131±10	68±7

N0 – вариант почвы без внесения минеральных удобрений; N90 – вариант почвы с внесением минеральных удобрений из расчета 90 кг N га⁻¹; С общ – содержание общего органического углерода; N общ – содержание общего азота; N-NO₃ – содержание нитратного азота; N-NH₄ – содержание аммонийного азота; P₂O₅ – содержание подвижного фосфора; K₂O – содержание подвижного калия.

Таблица 2. Гранулометрический состав (по Н.А. Качинскому) и некоторые физические свойства изучаемых горизонтов дерново-подзолистой супесчаной почвы.

Вар-т	Гор-т см	Грансостав, мм		ρ г см ⁻³	d	P	НВ %	ПВ
		Σ >0,01	Σ <0,01					
N0	5–10	87,3	12,6	1,2	2,54	53	32,3	40,1
	25–30	86,6	13,4	1,3	2,62	51	26,2	34,2
	45–50	84,8	15,2	1,5	2,68	45	17,7	24,2
N90	5–10	84,7	15,3	1,1	2,52	54	33,5	42,3
	25–30	83,9	16,1	1,2	2,60	51	27,1	37,5
	45–50	82,7	17,3	1,4	2,64	47	18,4	26,6

N0 – вариант почвы без внесения минеральных удобрений; N90 – вариант почвы с внесением минеральных удобрений из расчета 90 кг N га⁻¹; Σ – сумма фракций почвенных частиц: > 0,01 – физический песок, < 0,01 – физическая глина; ρ – плотность сложения почвы; d – плотность твердой фазы почвы; P – общая порозность почвы; НВ – наименьшая влагоемкость, ПВ – полная влагоемкость.

В течение вегетационных сезонов 2012 и 2013 гг. велось наблюдение за изменением температуры и влажности в профиле почвы. Температура на выбранных глубинах почвы регистрировалась с помощью температурных датчиков DS1921 на протяжении вегетационного сезона (Бучкина и др., 2011). Влажность и плотность сложения почв на тех же глубинах измерялись термостатно-весовым методом (Растворова и др., 1995) один раз в неделю.

Температура почва зависела от температуры воздуха и изменялась на протяжении вегетационного сезона. Максимальный прогрев исследуемой почвы наблюдался в июле, когда температура почвенных горизонтов составляла в среднем +17,5°C и варьировалась от 16 до 19°C. Минимальные температуры почвы были отмечены в начале вегетационного периода

(от 7 до 12°C). С увеличением глубины почвенного профиля температура снижалась. Однако различия между верхними горизонтами почвы и нижележащими были недостоверными.

Наблюдения показали, что влажность почвы зависела от количества выпавших осадков и температуры воздуха. В среднем за вегетационные сезоны 2012 и 2013 гг. она была существенно выше в горизонте 5–10 см и достоверно ниже (p < 0,05) в горизонте 45–50 см. Различия между горизонтами 5–10 см и 25–30 см были недостоверными. Влажность почвы на глубине 5–10 см изменялась от 7 до 25%, на глубине 25–30 см – от 13 до 22%, а на глубине 45–50 см – от 5 до 15,5%.

Таким образом, было установлено, что в изучаемой почве достаточно редко складывались условия, оптимальные для

протекания процессов нитрификации и денитрификации.

В контролируемых лабораторных условиях образцы почвы высушивались до воздушно-сухого состояния, просеивались через сито с отверстиями диаметром 1 мм и помещались в стеклянные флаконы в пропорции 1:8 по объёму, увлажнялись с шагом в 5%: до 8, 13, 28 и 23% весовой влажности. Заполненные флаконы инкубировались при температуре с шагом в 5 градусов: 8, 13 и 18°C. Повторность опыта во всех вариантах была 5-кратной. В течение первых 48 часов проводилась предварительная инкубация сосудов с почвой в биологическом шкафу для активизации почвенного микробного сообщества. Далее флаконы открывались и несколько минут проветривались воздухом в комнатных условиях (Seu et al., 2008).

Флаконы с почвой для определения денитрификации продувались газообразным азотом высокой чистоты. Через резиновую пробку при помощи шприца вводился ацетилен (в количестве 1% от объема флакона), образцы почв инкубировались в биологическом шкафу при заданной температуре. Ацетилен ингибировал образование N_2O в результате нитрификации и предотвращал трансформацию N_2O в молекулярный азот (как окончательный продукт денитрификации). Отбор проб воздуха для определения концентрации N_2O проводился через 0, 2, 4 и 6 часов (Seu et al., 2008).

Флаконы с почвой для определения нитрификации продувались воздухом и разделялись на две партии: флаконы без добавления ацетилена и с добавлением ацетилена в количестве 0,01% от их объёма. В первом случае почва служила эталоном потенциальной нитрификации. Во втором случае добавление ацетилена в объёме 0,01% выполнялось для того, чтобы ингибировать нитрификацию и убедиться в том, что одновременно с ней не происходит денитрификация. Отбор проб воздуха из флаконов обеих партий для определения концентрации N_2O проводился через сутки и далее регулярно в течение одной недели.

Окончательная количественная оценка интенсивности нитрификации выполнялась на основе измерения концентраций N_2O во флаконах с добавлением ацетилена и без ацетилена (Hergoualc'h et al., 2009).

Анализ концентрации N_2O в образцах воздуха проводился на газовом хроматографе Carlo Erba Strumentazione 4130, оснащённом детектором электронного захвата. Чувствительность данного детектора к N_2O (температура детектора – 380°C, скорость потока газа-носителя – 40–50 мл в минуту, газ-носитель – азот высокой чистоты) позволяет измерять его концентрацию в атмосферном воздухе с ошибкой 1%.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Влияние влажности и содержания минерального азота на нитрификационную и денитрификационную способности дерново-подзолистой супесчаной почвы

Интенсивность процессов нитрификации и денитрификации во всех вариантах опыта достоверно ($p < 0,001$) возрастала с увеличением влажности почвы и повышением содержания минерального азота ($p < 0,001$). Известно, что с увеличением влажности почвы в ней возрастает количество анаэробных зон (Каштанов и др., 1984). В почве без удобрений с повышением влажности денитрификация увеличивалась вниз по пахотному горизонту, но уменьшалась в подпахотном горизонте (рис. 1), т.к. активность денитрифицирующих бактерий лимитируется наличием легкодоступного энергетического материала и содержанием нитратов (Мамай, 2014). В почве с внесением минеральных удобрений денитрификация увеличивалась вниз по профилю и была максимальной в горизонте 45–50 см, что связано с выносом азота из удобрений вниз по профилю (таблица 1). Концентрация N_2O в данном горизонте достигала в среднем 18 мкг $N_2O-N \text{ кг}^{-1} \text{ час}^{-1}$ в почве без азота из удобрений и 27 мкг $N_2O-N \text{ кг}^{-1} \text{ час}^{-1}$ в почве с азотом.

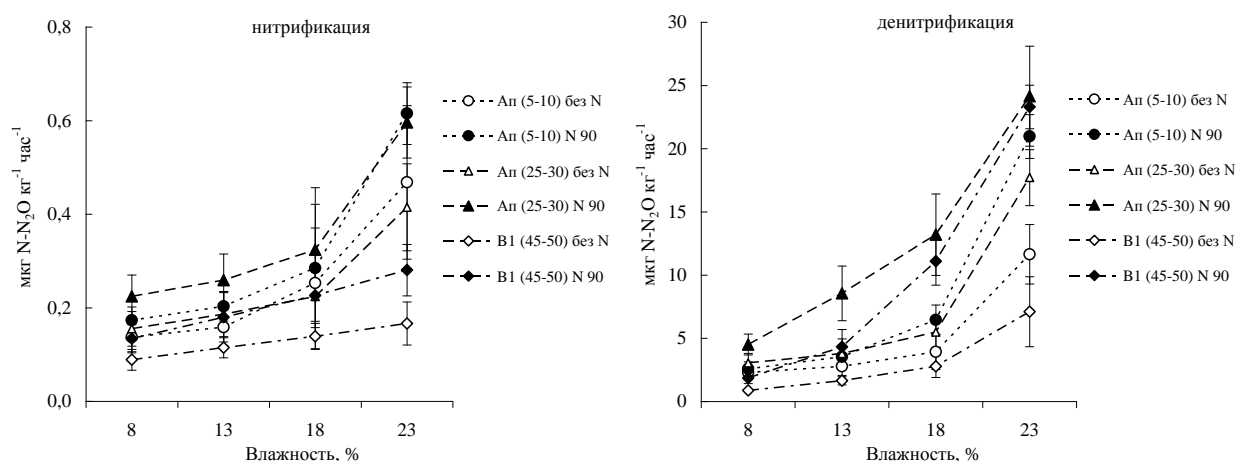


Рис. 1. Влияние влажности и содержания минерального азота на процессы нитрификации и денитрификации в профиле дерново-подзолистой супесчаной почвы с внесением минеральных удобрений из расчета 90 N га⁻¹ и без минеральных удобрений

Нитрификационный процесс с увеличением влажности почвы как в вариантах без удобрений, так и с удобрениями уменьшался с глубиной (рис. 1), поскольку зависел от наличия достаточного запаса кислорода в почвенном воздухе, а с глубиной количество пор в изучаемой почве существенно ($p < 0,01$) снижалось (табл. 1). Максимальная концентрация N₂O наблюдалась ближе к поверхности почвы (в образцах с глубины 5–10 см) – в среднем около 0,45 мкг N₂O-N кг⁻¹ час⁻¹ в почве без азота из удобрений и в среднем 0,65 мкг N₂O-N кг⁻¹ час⁻¹ в почве с азотом. Достоверных различий между горизонтами пахотного слоя (5–10 и 25–30 см) не наблюдалось. Минимальные значения концентрации N₂O были установлены в горизонте 45–50 см без минеральных удобрений, они составили около 0,14 мкг N₂O-N кг⁻¹ час⁻¹.

Таким образом, интенсивность процессов нитрификации и денитрификации зависела от соотношения между аэробными и анаэробными условиями в почве, которые регулировались изменениями влажности (от слабоувлажненного до переувлажненного состояния) и температуры почвы. Микробная трансформация азотсодержащих соединений в нитраты оказывала прямое влияние на интенсивность денитрификации и минерализации органических веществ, усиливая данные процессы. Лимитирующим фактором нитрификации был недостаток кислорода. Интенсивность нитрификации также снижалась с увеличением сухости

почвы, а высокая влажность ингибировала указанный процесс из-за ухудшения аэрации. Нитрификация в дерново-подзолистой почве, особенно при условиях, неблагоприятных для деятельности нитрифицирующих бактерий (плохой аэрации, избыточной влажности и низкой температуре), была подавлена и протекала медленно – в отличие от денитрификации. Возможно, нитрификация также была обусловлена соотношением C/N в почве. По данным Банкиной и др. (2002), при C/N ≥ 13–15 нитрификация происходит медленно, что было характерно для всех изучаемых горизонтов дерново-подзолистой супесчаной почвы (табл. 1). Внесение в почву азота с удобрениями увеличивало концентрацию N₂O как при нитрификации, так и при денитрификации. В среднем интенсивность денитрификации в дерново-подзолистой супесчаной почве при влажностях 8, 13, 18 и 23% превосходила нитрификацию в 17, 22, 30 и 41 раз соответственно.

Влияние температуры на нитрификационную и денитрификационную способности дерново-подзолистой супесчаной почвы

Температура является одним из важных факторов, определяющих скорость биохимических реакций, в том числе и процессы нитрификации и денитрификации. Температура влияет как на образование, так и поглощение N₂O бактериями, что в итоге отражается на величине потока закиси азота из почв. По сообщениям многих авторов, максимальная эмиссия N₂O из почв

наблюдается в интервале температур 25–32°C (Гришакина и др., 2006; Степанов и др., 2009). Однако в дерново-подзолистой супесчаной почве температура почвы редко достигает величины выше +20°C, даже в период жаркой и сухой погоды. Тем не менее, известно, что даже незначительное прогревание почвы (до +5°C) приводит к существенному росту активности бактерий, участвующих в азотном цикле.

В лабораторном эксперименте нитрификационный и денитрификационный процессы почвы изучались в диапазоне температур от +9 до +18°C. Результаты эксперимента показали, что с повышением температуры на 5°C образование N₂O, обусловленное протеканием изучаемых процессов в дерново-подзолистой супесчаной почве, достоверно ($p < 0,001$) увеличивалось в среднем в 1,7 раза. Обычно повышение температуры почвы влечет за собой изменение других факторов среды, которые также влияют на скорость изучаемых процессов. Так, чем выше была

влажность почвы во время инкубирования при заданной температуре, тем больше N₂O образовывалось в почве. Повышение влажности почвы на 5% при любой температуре инкубирования приводило к увеличению выделения N₂O как при нитрификации, так и денитрификации в среднем в 1,5 раза. Внесение азота с удобрениями даже при минимальной температуре инкубирования также приводило к усилению нитрификации и денитрификации и, соответственно, к достоверному ($p < 0,001$) увеличению выделения N₂O в среднем в два раза. Максимальная концентрация закиси азота наблюдалась во всех вариантах опыта при температуре +18°C, причем самые высокие ее показатели были отмечены в почве, отобранной с глубины 25–30 см. Минимальной концентрацией N₂O при всех заданных температурах инкубирования характеризовались образцы почвы, отобранные с глубины 45–50 см.

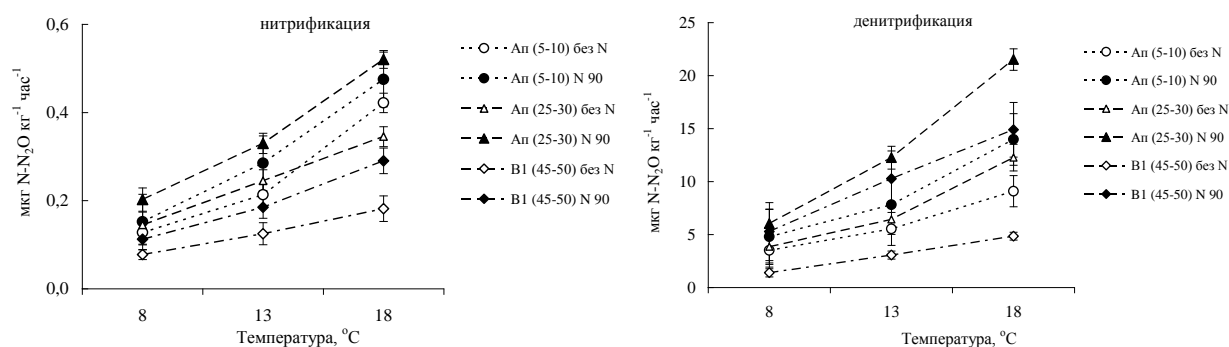


Рис. 2. Влияние температуры на интенсивность процессов нитрификации и денитрификации в профиле дерново-подзолистой супесчаной почвы с внесением минеральных удобрений из расчета 90 кг N га⁻¹ и без минеральных удобрений

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Интенсивность процессов нитрификации и денитрификации в изучаемой почве зависела от соотношения между аэробными и анаэробными условиями, которые определялись изменениями влажности почвы (от слабоувлажненного до переувлажненного состояния). Результаты эксперимента показали, что количество N₂O, образовавшееся при денитрификации, в образцах дерново-подзолистой супесчаной почвы из различных горизонтов было в 25–40 раз ($p < 0,001$) выше, чем количество N₂O, выделившееся при нитрификации.

Повышение влажности почвы от 8 до 23% с шагом 5% приводило к увеличению количества N₂O, выделившегося в результате нитрификации, в среднем в 1,4 раз в каждом шаге, образовавшегося в результате денитрификации – в 1,9 раз в каждом шаге. Увеличение температуры почвы с 8 до 18°C с шагом 5°C приводило к повышению количества N₂O в среднем в 1,7 раз в каждом шаге – как при нитрификации, так и при денитрификации. Денитрификация увеличивалась вниз по почвенному профилю, а нитрификация снижалась с глубиной. Интенсивность процессов нитрификации и денитрификации во всех

вариантах опыта достоверно ($p < 0,001$), в среднем в два раза, возростала с увеличением содержания минерального азота ($p < 0,001$) при внесении минеральных удобрений.

Количественная оценка вклада нитрификации и денитрификации в поток

N_2O в профиле почв предоставляет возможность более обоснованного анализа почвенного плодородия, эффективности применения обработки почв и внесения минеральных и органических удобрений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Банкина Т.А., Петров М.Ю., Петрова Т.М., Банкин М.П. 2002. Хроматография в агроэкологии. СПб.: НИИ Химии СПбГУ. 580 с.
- Бучкина Н.П., Рижия Е.Я., Балашов Е.В., Мухина И.М. 2011. Связь прямой эмиссии закиси азота из дерново-подзолистой супесчаной почвы с ее концентрацией в профиле // Материалы докладов международного агроэкологического форума. 21–23 мая 2011 года. СПб. С. 118–122.
- Гришакина И.Е., Трофимов С.Я., Степанов А.Л., Дорофеева Е.И. 2006. Микробная трансформация соединений азота в почвах южной тайги // Почвоведение. № 11. С. 1369–1373.
- Каштанов А.Н., Заславский М.Н. 1984. Почвоведохранное земледелие. М.: Россельхозиздат. 105 с.
- Кудеяров В.Н. 1999. Азотный цикл и продуцирование закиси азота // Почвоведение. № 8. С. 988–998.
- Мамай А.В. 2014. Микробная трансформация соединений азота и углерода в лесных почвах средней тайги (на примере Карелии): диссертация на соискание степени кандидата биологических наук. М. 153 с.
- Моисеев К.Г., Рижия Е.Я., Бойцова Л.В., Зинчук Е.Г., Гончаров В.Д. 2013. Корректировочные работы по крупномасштабному почвенному картографированию Меньковского филиала Агрофизического института Россельхозакадемии // Агрофизика. № 1. С. 30–36.
- Оленченко Е.А., Рижия Е.Я., Бучкина Н.П., Балашов Е.В. 2012. Влияние степени окультуренности дерново-подзолистой супесчаной почвы на ее физические свойства и урожайность сельскохозяйственных культур в агрофизическом стационаре // Агрофизика. № 4. С. 8–18.
- Растворова О.А., Андреев Д.П., Гагарина Э.И., Касаткина Г.А., Федорова Н.Н. 1995. Химический анализ почв: учебное пособие. СПб.: Изд-во СПбГУ. 264 с.
- Рижия Е.Я., Бучкина Н.П., Мухина И.М., Белинец А.С., Балашов Е.В. 2015. Влияние биоугля на свойства образцов дерново-подзолистой супесчаной почвы разной степени окультуренности (лабораторный эксперимент) // Почвоведение. № 2. С. 211–220.
- Рижия Е.Я., Мухина И.М., Москвин М.А., Бучкина Н.П., Балашов Е.В. 2014. Потенциальная нитрификационная и денитрификационная способность автоморфных и полугидроморфных дерново-подзолистых почв // Агрофизика. №2. С. 1–7.
- Степанов А.Л., Лебедева Е.В. 2009. Образование и поглощение азотсодержащих парниковых газов нитрифицирующими и денитрифицирующими бактериями в почвах: учебн. пособие. М.: Университет и школа. 87 с.
- Степанов А.Л. 2012. Образование и поглощение парниковых газов в почвах // Почвы в биосфере и жизни человека: монография. М., ФГБОУ ВПО МГУЛ. С. 118–134.
- Умаров М.М., Кураков А.В., Степанов А.Л. 2007. Микробиологическая трансформация азота в почве. М.: ГЕОС. 138 с.
- Blagodatskiy S.A., Avksent'ev A.A., Davydova M.A., Blagodatskaya E.V., Kurakov A.V. 2008. Nitrous Oxide Production in Soils and the Ratio of the Fungal to Bacterial Biomass. Eurasian Soil Science. V. 41. № 13. p. 1448–1455.
- Breuer L., Kiese R., Butterbach-Bahl K. 2002. Temperature and moisture effects on nitrification rates in tropical forest soils. Soil Science Society of America Journal. V.66, p. 834–844.
- Buchkina N.P., Rizhiya E.Y., Balashov E.V., Pavlik S.V. Influence of soil organic matter and nitrogen fertiliser on N_2O emission from a loamy sand Spodosol of north-western Russia. In: Crighton K., Audsley R. (eds.) Land management in changing environment. Proc. Of the SAC and SEPA Biennial conference, 2008, p. 203–208.
- Buchkina N.P., Rizhiya E.Y., Pavlik S.V., Balashov E.V. 2013. Soil Physical Properties and Nitrous Oxide Emission from Agricultural Soils. In: S. Grundas (Ed.) Advances in Agrophysical Research. InTech, Shanghai. p. 193–220.
- Crutzen P.J., Mosier A.R., Smith K.A., Winiwarter W. 2008. N_2O release from agro-biofuel production negates global warming reduction by replacing fossil fuels. Atmospheric Chemistry and Physics. p. 389–395.
- Hergoualc'h K., Harmand J.-M., Cannavo P., Skiba U., Oliver R., He'naul C. 2009. The utility of process-based models for simulating N_2O emissions from soils: A case study based on Costa Rican coffee plantations. Soil Biology & Biochemistry. 41: 2343–2355.
- IPCC Guidelines for national greenhouse gas inventories. 2007. Vol. 4, Chap. 11, Hayama, Japan: IGES.
- Lashof D.A., Ahuja D.R. 1990. Relative contributions of greenhouse gas emissions to global warming. Nature. 344, p. 529–531.
- Sey K.B., Manceur A.M., Whalen J.K., Gregorich E.G., Rochette P. 2008. Small-scale heterogeneity in carbon dioxide, nitrous oxide and methane production from aggregates of a cultivated sandy-loam soil. Soil Biology & Biochemistry. 40: 2468–2473.