

УДК 631.95

## ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ НИТРИФИКАЦИОННАЯ И ДЕНИТРИФИКАЦИОННАЯ СПОСОБНОСТЬ АВТОМОРФНЫХ И ПОЛУГИДРОМОРФНЫХ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТЫХ ПОЧВ

Е. Я. Рижия<sup>1</sup>, И. М. Мухина<sup>1</sup>, М. А. Москвин<sup>2</sup>, Н. П. Бучкина<sup>1</sup>, Е. В. Балашов<sup>1</sup><sup>1</sup> ГНУ Агрофизический научно-исследовательский институт Россельхозакадемии,  
Гражданский пр., 14, Санкт-Петербург, 195220<sup>2</sup> Российский Государственный Гидрометеорологический университет,

Малоохтинский пр., 98, Санкт-Петербург, 195196

E-mail: alenarizh@yahoo.com

*Поступила в редакцию 14 февраля 2014 г., принята к печати 30 мая 2014 г.*

Проведена оценка интенсивности потенциальной нитрификации и денитрификации в дерново-подзолистых почвах, сформированных в различных частях мезорельефа и различающихся по степени гидроморфизма. Количественный вклад каждого из изучаемых процессов в общий процесс формирования  $N_2O$  был изучен в лабораторных условиях с использованием нарушенных образцов из гумусовых горизонтов почв при помощи газохроматографического метода. Установлено, что на долю нитрификации в дерново-подзолистых почвах приходилось в среднем от 3 до 15% образующегося  $N_2O$ , а долю денитрификации – от 85 до 97% (в зависимости от положения почвы в мезорельефе и степени ее гидроморфизма). Полученные результаты могут быть использованы для разработки рекомендаций по рациональному сельскохозяйственному использованию автоморфных и полугидроморфных почв в целях снижения прямой эмиссии закиси азота в результате денитрификации.

**Ключевые слова:** закись азота, нитрификация, денитрификация, мезорельеф, степень гидроморфизма.

### ВВЕДЕНИЕ

Для смягчения и предотвращения негативных последствий нарушения цикла азота необходимо точное описание микробиологических процессов превращения соединений азота в природе. Количественная характеристика цикла азота в почве особенно важна при рассмотрении наземных экосистем (Vlagodatskiy et al., 2008). Почвенные микробиологические процессы нитрификации и денитрификации входят в систему азотного цикла. В настоящее время их разделяют на автотрофную и гетеротрофную нитрификацию и на денитрификацию в анаэробных и аэробных условиях (Kool et al., 2010). Биосферная и экологическая значимость указанных процессов заключается в высвобождении азота из почвы в атмосферу путем образования различных газообразных продуктов: закиси азота ( $N_2O$ ), окиси азота (NO), двуокиси азота ( $NO_2$ ), молекулярного азота ( $N_2$ ) (Банкина и др., 2003). Изучению эмиссии  $N_2O$  отводится особое место, т.к. данный газ, являющийся относительно инертным, пре-

терпевает в атмосфере ряд фотохимических превращений с образованием промежуточных продуктов, приводящих к деградации стратосферного озона. Помимо этого он обладает высокой способностью к экранированию инфракрасного излучения, отраженного с поверхности Земли (в 310 раз больше, чем  $CO_2$ ) и вносит вклад в глобальное явление саморазогрева атмосферы (Кудеяров, 1999).

Любые сельскохозяйственные мероприятия, такие как внесение минеральных и органических удобрений, запахивание пожнивных остатков, выпас животных, оказывают существенное влияние на эмиссию  $N_2O$  (Buchkina et al., 2013). До 40% почв Северо-западного региона, находящихся в сельскохозяйственном использовании, расположено на склоновых землях с уклоном 1–3° и более градусов (Явтушенко, Каштанов, 1997). Изучение эмиссии  $N_2O$  из почв на склонах требует такого же детального исследования, как и пространственной изменчивости физико-химических и агрохимических свойств почв по элементам мезорельефа (Лучицкая и др.,

1994). Кроме того, если на дерново-подзолистых почвах с избыточным увлажнением проведена мелиорация, то наряду с водно-физическими свойствами почв изменяются и происходящие в почве биохимические и биологические процессы, влияющие на интенсивность и направленность эмиссии  $N_2O$  (Инишева, 1992).

Все процессы, связанные с нитрификацией и денитрификацией, могут протекать в почвах одновременно. Биологическая денитрификация, например, может происходить в аэробных почвах, поскольку в почвах неизбежны анаэробные микрзоны, а диапазон благоприятной реакции для развития денитрификаторов довольно широкий (Buchkina et al., 2012). Выявить количественный вклад каждого из изучаемых процессов в общий процесс образования  $N_2O$  в полевых условиях практически невозможно, и поэтому единственным способом его оценки являются отдельные количественные исследования типов нитрификации и денитрификации в лабораторных условиях, например, газохроматографическим методом (Банкина и др., 2003).

В данной работе представлены результаты исследования, цель которого заключалась в оценке интенсивности нитрификационной и денитрификационной способности почв и ее вклада в эмиссию  $N_2O$  из гумусовых горизонтов дерново-подзолистых почв, расположенных на различных элементах мезорельефа и различающихся по степени гидроморфизма.

### ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследования проводились на территории Меньковского филиала Агрофизического института (Гатчинский район, Ленинградская область), расположенного на Лужско-Оредежской возвышенности. Для нее характерен полого-холмистый равнинный рельеф с выраженными краевыми мореными грядами и холмами (Моисеев и др., 2013; Якушев и др., 2010). Почвенная катена, объединенная в залегании условиями рельефа и геохимическим сопряжением, была заложена в августе 2013 года на юго-западном склоне одного из мелиорированных участков опытного поля № 19 (59° 25' с.ш. и 30° 0' в.д.) в 300 м на северо-восток от деревни Кривое Колено. На вершине (выровненный участок со

слабым уклоном на запад) находилась дерново-подзолистая суглинистая почва на морене (В), по центру склона в 3° располагалась дерново-подзолистая супесчаная глееватая почва на абрадированной морене (С), в ложбине – дерново-глеевая среднесуглинистая почва на морене (Л). Объектами исследований служили только гумусовые горизонты почв, т.к. нитрификационная и денитрификационная способность ниже лежащих горизонтов очень низка (Зинченко и др., 2011). На вершине и в средней части склона изучались пахотные горизонты почв, на которых в год проведения исследования произрастала яровая пшеница сорта «Дарья» Белорусской селекции, в ложбине – гумусовый горизонт необрабатываемой ввиду высокой гидроморфности почвы. Согласно разделению почв таежной и лесной зон по степени гидроморфизма, к автоморфным относятся почвы, никогда не испытывающие переувлажнения, приводящего к состоянию анаэробнобиозиса в гумусовом горизонте, к полугидроморфным – испытывающие анаэробнобиозис периодически, к гидроморфным – постоянно переувлажненные (Романова, 2004). Таким образом, исследуемые почвы на вершине и в средней части склона отнесены к автоморфным почвам, а почва, расположенная в ложбине, – к полугидроморфным почвам.

Исследуемые образцы почв высушивались до воздушно-сухого состояния, просеивались через сито 1 мм и помещались в стеклянные флаконы (1/4 от объёма). Образцы почв увлажнялись до наименьшей влагоёмкости, герметично закрывались резиновыми крышками и предварительно инкубировались в биологическом шкафу в течение 48 часов при температуре 25°C для активизации почвенного микробного сообщества (Seu et al., 2008). Далее флаконы открывались и в течение нескольких минут проветривались воздухом в комнатных условиях.

Флаконы с почвой для определения денитрификации продувались газообразным азотом высокой чистоты. Затем во флаконы вводился ацетилен (в объёме 10% от объёма флакона) для создания анаэробных условий и образцы почв инкубировались в биологическом шкафу при температуре 25°C. Предполагалось, что ацетилен, добавленный в

объёме 10%, ингибирует образование  $N_2O$  в результате нитрификации и предотвращает трансформацию  $N_2O$  в молекулярный азот, являющийся окончательным продуктом денитрификации. Отбор проб воздуха для определения концентрации  $N_2O$  проводился через 0, 2, 4 и 6 часов.

Флаконы с почвой для определения нитрификации продувались воздухом и разделялись на две партии: флаконы без добавления ацетилена и флаконы с добавлением ацетилена в объёме 0,01 % от их объёма. Образцы первой партии служили эталоном потенциальной нитрификации. В образцы второй партии добавлялся ацетилен с целью ингибирования нитрификации и контроля отсутствия денитрификации, протекающей одновременно с нитрификацией. Отбор проб воздуха из флаконов обеих партий для определения концентрации  $N_2O$  проводился через сутки и затем регулярно в течение одной недели. Окончательная количественная оценка интенсивности нитрификации производилась на основе измерения концентраций  $N_2O$  во флаконах с добавлением ацетилена и без его добавления (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 детектора к  $N_2O$  (температура детектора – 380°C, скорость потока газ-носителя – 40–50 мл в минуту, газ-носитель – азот высокой чистоты) позволяет измерять концентрацию данного газа в атмосферном воздухе с ошибкой 1%.

Агрохимические и агрофизические параметры изучаемых почв исследовались по стандартным методикам (Растворова и др., 1995).

Статистическая обработка результатов исследований включала вычисления значений средних, стандартных отклонений и коэффициентов линейной корреляции при  $p \leq 0,05$ . Достоверность различий средних значений оценивалась при помощи однофакторного дисперсионного анализа (ANOVA) при  $p \leq 0,05$ .

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Для сравнительной оценки пространственной изменчивости почвенных свойств на разных элементах мезорельефа были проанализированы агрофизические и агрохимические свойства гумусовых горизонтов дерново-подзолистых почв.

Изучаемые гумусовые горизонты почв различались по гранулометрическому составу. Исходя из данных о содержании физической глины (табл. 1) было установлено, что на вершине сформировалась легкосуглинистая почва, в средней части склона – супесчаная, а в ложбине – среднесуглинистая. Также была выявлена пространственная изменчивость плотности сложения и порового пространства гумусовых горизонтов (табл. 1). Почва в ложбине характеризовалась наибольшей плотностью сложения и наименьшей порозностью, что связано с засоренностью мелиоративных каналов и постоянным переувлажнением почвы из-за близкого расположения грунтовых вод на данном участке. Почва в средней части склона была достоверно ( $p < 0,05$ ) менее плотной, имела более высокую порозность и характеризовалась более низкими величинами наименьшей и полной влагоемкости по сравнению с почвами на вершине и в ложбине.

Таблица 1. Физические свойства гумусовых горизонтов исследуемых почв.

Почва	Глубина горизонта	$\rho$	d	P	Содержание физ. глины	НВ	ПВ
	см						
В	0–38	1,21	2,51	52	22,6	24,2	35,3
С	0–34	1,12	2,62	57	18,5	21,8	29,4
Л	2–30	1,44	2,55	43	31,2	27,6	36,5
НСР 05		0,06	0,07	3,5	1,4	3,6	2,1

В – дерново-подзолистая почва; С – дерново-подзолистая глееватая почва; Л – дерново-глеевая почва; НСР 05 – наименьшая существенная разница для 95% уровня вероятности;  $\rho$  – объемная плотность почвы, d – плотность

сложения почвы; Р – общая порозность почвы; НВ – наименьшая влагоемкость; ПВ – полная влагоемкость.

В таблице 2 представлены некоторые химические характеристики исследуемых почв. Анализ полученных данных позволил выявить, что мезорельеф значительно повлиял на кислотность почвы и содержание в ней подвижных форм азота, фосфора и калия. Наиболее кислая почва сформировалась в ложбине, что обусловлено высокой влажностью, а кислотность почвы на вершине была близкой к нейтральной, что является результатом окультуривания. Содержание общего углерода в почве, так же как и общего азота, уменьшалось вниз по склону. Содержание подвижных форм азота также снижалось от вершины к ложбине. На вершине отмечено высокое содержание нитратного и аммонийного азота в почве (результат внесения удобрений под выращиваемую культуру), в средней части склона и в низине – среднее. При этом содержание нитратного азота в исследуемых почвах превышало содержание аммонийного азота в среднем в 2,3 раза. Аналогичная картина наблюдалась и относительно содержания форм фосфора и калия – уменьшение содержания от вершины к ложбине.

Таблица 2. Агрохимические свойства гумусовых горизонтов исследуемых почв

Почва	рН (KCl)	Собщ	Нобщ	N-NO <sub>3</sub>	N-NH <sub>4</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
		г кг <sup>-1</sup>		мг кг <sup>-1</sup>			
В	5,8	20,6	1,9	22,5	9,7	219	69
С	5,1	20,1	1,7	12,9	6,8	197	51
Л	4,6	19,6	1,4	15,3	7,0	175	44
НСР 05	0,5	1,2	0,1	1,4	0,2	23,6	3,8

В – дерново-подзолистая почва; С – дерново-подзолистая глееватая почва; Л – дерново-глеявая почва; НСР 05 – наименьшая существенная разница для 95% уровня вероятности; Собщ – содержание общего органического углерода; Нобщ – содержание общего азота; N-NO<sub>3</sub> – содержание нитратного азота; N-NH<sub>4</sub> – содержание аммонийного азота; P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – содержание подвижного фосфора; K<sub>2</sub>O – содержание подвижного калия.

Почва в ложбине с частым поверхностным затоплением различной продолжительности, близким стоянием грунтовых вод и без сельскохозяйственной обработки содержала меньше N, P, K, чем почвы на пологом склоне и вершине, на которых применялись агротехнические приемы, повышающие уровень их окультуренности. Полученные данные согласуются с результатами других ученых, например, Бойцовой Л. В. (2012 г.),

установившей в работах по изучению систем удобрений в различных ландшафтно-экологических условиях, что месторасположение элементарных почвенных участков в мезорельефе является фактором, который оказывает существенное влияние на перераспределение физических и химических свойств почвы.

Агрофизические и агрохимические свойства, характеризующие почвы в момент

отбора проб для анализа нитрификации и денитрификации, оказали существенное влияние на показатели интенсивности изучаемых процессов. Результаты изучения потенциальной нитрификационной способности исследуемых почв показали, что максимальное количество  $N_2O$  - от 20,3 до 39,5 мкг  $N_2O-N$   $кг^{-1}$   $час^{-1}$  - сформировалось в дерново-подзолистой суглинистой почве (В) в течение

29–49 часов после начала инкубирования. В дерново-подзолистой глееватой (С) и дерново-глеевой (Л) почве интенсивность нитрификации была ниже и варьировалась от 8,8 до 13,0 мкг  $N_2O-N$   $кг^{-1}$   $час^{-1}$  и от 3,3 до 4,2 мкг  $N_2O-N$   $кг^{-1}$   $час^{-1}$  соответственно в течение 29–49 часов после начала инкубирования (рис. 1).

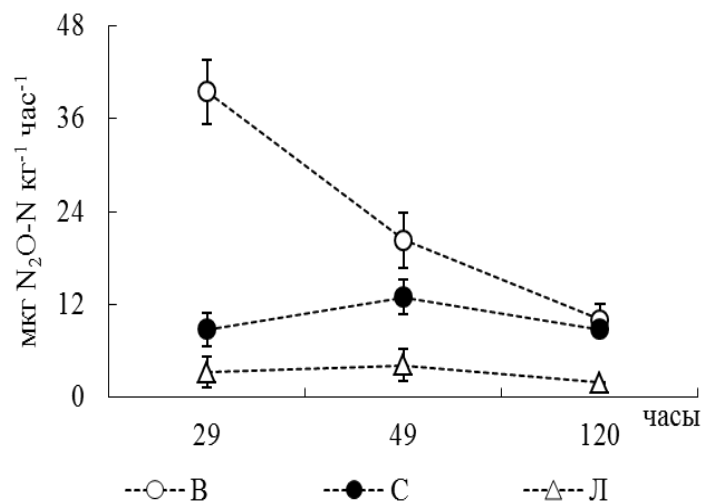


Рис. 1. Интенсивность нитрификации в дерново-подзолистой суглинистой, дерново-подзолистой глееватой и дерново-глеевой почвах, расположенных на различных элементах рельефа. В – вершина склона, С – средняя часть склона, Л – ложбина

Полученные данные показали, что автоморфная дерново-подзолистая суглинистая почва обладает лучшими физическими и физико-химическими условиями (нейтральная реакция среды, аэробные условия, достаточное количество органических и азотсодержащих соединений) для нитрификации, чем автоморфная дерново-подзолистая глееватая и полугидроморфная дерново-глеевая почвы, в которых условия для нитрифицирующих бактерий отличались от оптимальных.

Статистический анализ данных продемонстрировал, что формирование  $N_2O$  в почвах в условиях нитрификации достоверно зависело от содержания аммонийного азота в почве ( $r = 0,98, 0,96$  и  $0,97$ , при  $p < 0,001$  для дерново-подзолистой суглинистой, дерново-подзолистой глееватой и дерново-глеевой почв соответственно).

Потенциальная денитрификационная способность исследуемых почв, определяемая при одинаковых условиях влажности и температуры почвы, была в 7, 5 и 40 раз выше в дерново-подзолистой суглинистой, дерново-подзолистой глееватой и дерново-глеевой почвах соответственно по сравне-

нию с их потенциальной нитрификационной способностью. Дерново-глеевая почва находилась в низине, была переувлажнена чаще других почв и поэтому обладала наилучшими физико-химическими условиями для денитрифицирующих микроорганизмов. Дерново-подзолистая суглинистая почва, расположенная на вершине склона, также продемонстрировала высокую способность к денитрификации, поскольку, вероятно, содержала значительное количество доступных форм углерода и минерального азота, которые при заданных анаэробных условиях активно использовали денитрифицирующие микроорганизмы. Это подтверждается данными, содержащимися в работе Банкиной Т. А. с соавторами (2003), которые установили, что денитрифицирующая микрофлора в хорошо аэрируемой пахотной плодородной почве обладает большей активностью по сравнению с активностью соответствующей микрофлоры в почвах, насыщенных водой. Важную роль при этом играет кислотность почвы. Известно, что оптимальным условием для развития денитрифицирующих микроорганизмов является диапазон

pH от 7 до 8 и чем выше кислотность почвы, тем ниже ее денитрификационная способность (Кудеяров, 1999).

В течение первых 2-х часов после начала инкубирования наибольшая интенсивность формирования  $N_2O$  в результате денитрификации выявлена в дерново-подзолистой суглинистой почве (51,8–256,9 мкг  $N_2O-N$  кг<sup>-1</sup> час<sup>-1</sup>) и в дерново-глеевой почве (152,7–252,5 мкг  $N_2O-N$  кг<sup>-1</sup> час<sup>-1</sup>), а наименьшая – в дерново-подзолистой глееватой почве (23,3–133,5 мкг  $N_2O-N$  кг<sup>-1</sup> час<sup>-1</sup>, рис. 2). Спустя 6 часов после начала инкубирования дерново-подзолистая суглинистая почва по-прежнему сохраняла высокую способность к денитрификации – 149,9 мкг  $N_2O-N$  кг<sup>-1</sup> час<sup>-1</sup>, а в двух других почвах достоверные различия в интенсивности денитрификации уже не наблюдались – 2,5–3,1 мкг  $N_2O-N$  кг<sup>-1</sup> час<sup>-1</sup>. Отсутствие различий в интенсивности денитрификации в дерново-подзолистой глееватой и дерново-глеевой почвах к концу инкубирования обусловлено, скорее всего, критически низким уровнем

содержания доступных форм органического углерода и минерального азота, необходимых денитрифицирующим микроорганизмам. И. Кларк с соавторами (Clark et al., 2010) не обнаружил достаточных подтверждений тому, что популяция денитрифицирующих микроорганизмов изменяется при долговременных различиях в использовании почв.

В дерново-подзолистой суглинистой почве содержание доступных форм органического углерода и минерального азота оставалось, по-видимому, достаточно высоким для сохранения высокой активности денитрифицирующих микроорганизмов.

Статистический анализ данных показал, что формирование  $N_2O$  в почвах в условиях денитрификации достоверно зависело от содержания нитратного азота в почве ( $r = 0,96, 0,92$  и  $0,99$ , при  $p < 0,01$  для дерново-подзолистой суглинистой, дерново-подзолистой глееватой и дерново-глеевой почв соответственно).

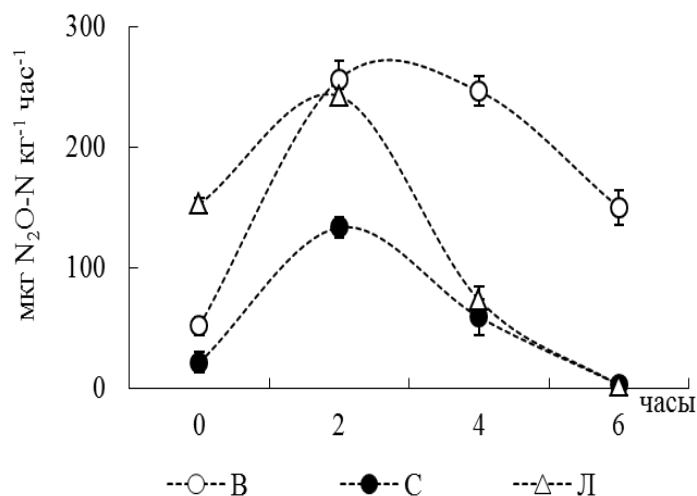


Рис. 2. Интенсивность денитрификации в дерново-подзолистой суглинистой, дерново-подзолистой глееватой и дерново-глеевой почвах, расположенных на различных элементах рельефа. В – вершина склона, С – средняя часть склона, Л – ложбина.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, по способности к нитрификации изучаемые почвы, различающиеся по степени гидроморфизма, располагаются в следующий ряд: дерново-подзолистая суглинистая (автоморфная) > дерново-подзолистая глееватая (автоморфная) > дерново-глеевая (полугидроморфная). По способности к денитрификации указанные почвы располагаются в другом порядке: дерново-подзолистая суглинистая (автоморфная) >

дерново-глеевая (полугидроморфная) > дерново-подзолистая глееватая (автоморфная). Интенсивность процессов нитрификации и денитрификации зависела от аэрации почв и от содержания в почве доступных форм органического вещества и минеральных форм азота. Установлены строгие и достоверные корреляционные зависимости между эмиссией закиси азота из исследуемых почв и содержанием минерального азота ( $r = 0,95–0,99$ ,  $p < 0,01$  –  $< 0,05$ ). Процессу денитрифи-

кации способствовала низкая степень аэрации почвы и высокое содержание нитратов. Образование  $N_2O$  в изучаемых почвах происходило преимущественно в результате денитрификации, поскольку вклад потенциальной нитрификации составлял лишь 3–15% от суммарной эмиссии  $N_2O$ .

Результаты исследований могут быть использованы для разработки рекомендаций по рациональному сельскохозяйственному использованию автоморфных и полугидроморфных почв с целью снижения прямой эмиссии закиси азота в результате денитрификации.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Банкина Т.А., Петров М.Ю., Петрова Т.М., Банкин М.П. 2002. Хроматография в агроэкологии. СПб., НИИ Химии СПбГУ. 580 с.
- Бойцова Л.В., Маглыш Е.Г. 2012. Точная система удобрения в различных ландшафтно-экологических условиях. Плодородие. № 5. С. 4–5.
- Зинченко М.К., Бучкина Н.П., Рижия Е.Я., Павлик С.В., Зинченко В.С. 2011. Влияние приемов основной обработки почв на биологическую активность серых лесных почв Владимирского Ополья. Земледелие. №8. С. 25 – 27.
- Инишева Л.И. 1992. Почвенно-экологическое обоснование комплексных мелиораций. Томск, Изд-во Том. Унта. 270 с.
- Кудяров В.Н. 1999. Азотный цикл и продуцирование закиси азота. Почвоведение. №8. С. 988–998.
- Лучицкая О. А., Башкина В. Н. 1994. Плодородие почв и рельеф. Почвоведение. №39. С. 75–79.
- 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(9). С. 30–36.
- 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.
- Романова Т.А. 2004. Водный режим почв Беларуси. Почвенные исследования и применение удобрений. Минск. № 28. С. 68–77.
- Явтушенко В. Е., Каштанов А. Н. 1997. Агроэкология почв склонов. М., Колос. 240 с.
- Якушев В.П., Канаш Е.В., Конев А.В., Ковтюх С.Н., Лекомцев П.В., Матвеев Д.А., Петрушин А.Ф., Якушев В.В., Буре В.М., Русаков Д.В., Осипов Ю.А. 2010. Теоретические и методические основы выделения однородных технологических зон для дифференцированного применения средств химизации по оптическим характеристикам посева. Учебное пособие. СПб., Изд-во АФИ РАСХН. 60 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.
- Buchkina N., Rizhiya E., Balashov E. 2010.  $N_2O$  Emission from a loamy sand Spodosol as related to soil fertility. Archives of Agronomy and Soil Sciences. 58 (supplement 1): S141-S146.
- Buchkina N.P., Rizhiya E.Y., Pavlik S.V., Balashov E.V. 2013. Soil Physical Properties and Nitrous Oxide Emission from Agricultural Soils // S. Grundas (Ed.) Advances in Agrophysical Research. InTech, Shanghai. P. 193–220.
- Clark I.M., Buchkina N., Jhurrea D., Goulding K.W.T., Hirsch P.R. 2012. Impacts of nitrogen application rates on the activity and diversity of denitrifying bacteria in the Broadbalk Wheat experiment. Philosophical Transactions of the Royal Society B. Vol. 367 (1593). P. 1235–1244.
- 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.
- Kool D.M, Dolfing J., Wrage N., Van Groenigen J.W. 2011. Nitrifier denitrification as a distinct and significant source of nitrous oxide from soil. Soil Biology & Biochemistry. 43: 174-178.
- 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.