

УДК 631.95

ПРЯМАЯ ЭМИССИЯ ЗАКИСИ АЗОТА ИЗ ЛУГОПАСТБИЩНЫХ ПОЧВ СЕВЕРО-ЗАПАДНОГО ФЕДЕРАЛЬНОГО ОКРУГА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Е. Я. Рижия¹, Н. П. Бучкина¹, Е. А. Соломатова², Е. В. Балашов¹

¹ГНУ Агрофизический научно-исследовательский институт Россельхозакадемии
Гражданский пр., Санкт-Петербург, 14, 195220
E-mail: alenarizh@yahoo.com

²Институт биологии Карельского научного центра Российской академии наук
ул. Пушкинская, д. 11, г. Петрозаводск, 185910

Поступила в редакцию 09 января 2013 г., принята к печати 15 февраля 2013 г.

Измерение прямой эмиссии закиси азота (N_2O) из почв, находящихся в пастбищном использовании, проводилось с мая по сентябрь 2010 года в ОПХ «Суйда» (Ленинградская область) и ЗАО «Эссойла» (Республика Карелия) Северо-Западного ФО РФ. Эмиссия N_2O из почв достоверно ($p < 0,001$) возрастала с увеличением градиента пастбищной нагрузки. За 95-дневный период выпаса коров из почв сильнообитых участков пастбищ в «Суйде» выделилось $0,9 \text{ кг } N_2O-N \text{ га}^{-1}$, а из почв аналогичных участков в «Эссойле» – $2,7 \text{ кг } N_2O-N \text{ га}^{-1}$. Из почв среднесбитых участков пастбищ кумулятивная эмиссия N_2O составила $0,4$ и $0,7 \text{ кг } N_2O-N \text{ га}^{-1}$, а из почв слабообитых – $0,25$ и $0,3 \text{ кг } N_2O-N \text{ га}^{-1}$, для «Суйды» и «Эссойлы» соответственно.

Ключевые слова: закись азота, сбитость пастбища, погодные условия, плотность сложения почвы.

ВВЕДЕНИЕ

Закись азота (N_2O) – один из основных парниковых газов, отличительной характеристикой которого является продолжительное время пребывания в атмосфере (до 150 лет) и высокий вклад (в 310 раз выше вклада углекислого газа) в развитие «парникового эффекта» (Khalil, Rasmussen, 1992). Другой важной особенностью данного газа является его преимущественно биологическое происхождение, причем именно почвы являются его основным источником. N_2O в почвах образуется в результате разнообразных процессов микробной трансформации соединений азота - денитрификации, диссимиляционного восстановления нитратов в аммоний, автотрофной и гетеротрофной нитрификации, процессов взаимодействия нитритов с аминокислотами, хемоденитрификации и некоторых других (Кудеяров, 1999).

Согласно данным национального доклада о кадастре парниковых газов за 2011 год, аграрный сектор Российской Федерации является основным источником выброса N_2O в атмосферу. В последнее десятилетие приоритетное внимание в данном секторе уделяется почвам лугов и пастбищ, т.к. вследствие экономических преобразований произошло прекращение возделывания значительных

площадей пахотных почв и их частичный перевод в земли кормовых угодий.

В Северо-Западном федеральном округе за последние два десятилетия площадь пастбищ сократилась почти в 2 раза и составила на 2010 год 18% от всех сельскохозяйственных угодий округа (5-е Национальное сообщение РФ об изменении климата). Это явилось следствием значительного снижения в регионе поголовья крупного рогатого скота (КРС), ухудшения финансового состояния многих мелких хозяйств, а также перевода значительной части поголовья скота на круглогодичное стойловое содержание. Однако для молочных и мясных предприятий среднего уровня низкокзатратная система содержания скота на культурных пастбищах сохраняет свое приоритетное значение. Пастбищный корм в 2–3 раза дешевле скармливания зеленой массы в стойлах, он позволяет по крайней мере в 4 раза снизить расходы на питание по сравнению с круглогодичным кормлением силосом, сенажом, сеном (Данилова, Синицина, 2012).

Согласно данным, полученным за рубежом, эмиссия N_2O из почв, занятых пастбищами, составляет $6 \text{ Тг } N_2O-N \text{ год}^{-1}$ – третья часть от общего количества данного газа, выделяющегося в атмосферу из всех сельскохозяйственных почв в мире (Oenema et

al., 2005). Выпас КРС приводит к изменению теплового, водного и воздушного режимов верхних горизонтов почв, влияет на изменение микробного сообщества и, как следствие, эмиссию парниковых газов из почв (Singer et al., 2008). Основное влияние на изменение данных показателей оказывает плотность сложения почвы, которая увеличивается из-за давления животных на верхние слои почвы, которое у КРС составляет от 2–5 кг см⁻³ (Раменский и др., 1956). Кроме того, поступление в почву отходов жизнедеятельности животных существенно увеличивает эмиссию N₂O из почвы (Velthof et al., 1998). Экскременты коров содержат аммонийную форму азота, экстремально превышающую ПДК аммония в почве.

N₂O является одним из парниковых газов, эмиссию которого необходимо регулировать с помощью рациональных и эффективных сельскохозяйственных мероприятий. Изучение влияния выпаса КРС на выбросы N₂O и круговорот азота в целом является одним из ключевых шагов при оценке вклада сельского хозяйства страны в общий бюджет выбросов парниковых газов. Цель данного исследования – оценить влияние выпаса КРС на прямую эмиссию N₂O из почв пастбищ Северо-западного региона РФ.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Агроэкологический мониторинг почв пастбищ Ленинградской области и Республики Карелия проводился с мая по сентябрь 2010 года, в период выпаса КРС. Объектами исследования служили пастбища пригонной системы, различающиеся по способу их использования.

В Ленинградской области исследования проводили в ОПХ «Суйда», расположенном в центральной части Гатчинского района. Общая площадь пастбищ хозяйства составляет 388 га. Для изучения эмиссии N₂O использовалось пастбище площадью 77,9 га, на котором в 2010 году выпасалось стадо в 200 молодых коров из 500 содержащихся на ферме. Начало выпаса – 30 мая. Способ выпаса – пригонная система близ скотного двора. До 15 августа соблюдалось порционное (полосное) использование пастбищ вокруг фермы, после указанной даты использовался бессистемный выпас.

В Республике Карелия прямая эмиссия N₂O изучалась на пастбищах Пряжинского района, где находится ЗАО «Эссойла», в структуру сельскохозяйственных земель которого входит 209 га пастбищ. На ферме содержалось стадо из 2000 коров с постоянным стойловым содержанием, а на огороженных пастбищах выпасалось 150 голов молодняка в возрасте от 1 до 2-х лет. Исследование проводилось на пастбище площадью 60 га. Начало выпаса в сезоне 2010 года – 27 мая.

Как в «Эссойле», так и в «Суйде» культуртехнические мероприятия по улучшению кормовых угодий в сезон выпаса 2010 года не проводились: после стравливания не происходило подкашивание травостоя, не вносились минеральные удобрения, отходы жизнедеятельности коров не разравнивались по полю.

Почвенный покров пастбища в «Суйде» представлен различными разновидностями дерново-подзолистых и дерново-карбонатных почв – от супесчаных до тяжелосуглинистых по гранулометрическому составу. Уровень грунтовых вод – от 2 метров. Рельеф – плоская равнина с уклоном 3-4° к реке Суйда, протекающей с юго-восточной стороны пастбища. В пониженных участках склона выражено оглеение, в замкнутых пониженных элементах рельефа развиты болотные и перегнойные почвы. Границы участка – мелиоративные каналы, проложенные в 1982 году, и дорога между участками пастбищ (Моисеев и др., 2011).

Почвенный покров в Эссойле представлен выработанными низинными торфяниками (агроземы на ленточных глинах тяжелосуглинистого гранулометрического состава) Корзинской низины болотного массива Льеже-суо. Рельеф – западный сектор Шуйской аккумулятивной озерно-ледниковой впадины. На исследуемой территории мелиоративные работы проводились около 40 лет назад. Осушение произведено открытым дренажем. Грунт из траншей укладывался на поверхность спланированной почвы, затем разравнивался и перепахивался, что привело к более или менее равномерному перемешиванию верхних горизонтов с нижележащими. Дальнейшее использование территории под посевы многолетних

трав способствовало образованию дернины. Уровень грунтовых вод – от 0,3 м (Дубровина, Соломатова, 2006).

Погодные условия лета 2010 года были признаны аномальными для региона. В период выпаса КРС (июнь – сентябрь 2010 г.) в Ленинградской области и в Республике Карелия выпало 460 и 490 мм осадков соответственно. Максимальное количество осадков пришлось на июнь – 220 и 245 мм соответственно, в июле и августе выпало до 90 мм осадков. Средняя температура воздуха для Северо-Западного региона в июне составила 18,7°С, в июле – 27,8, а в августе – 23,6°С.

Для изучения влияния выпаса КРС на свойства почв и эмиссию закиси азота был использован метод трансект. Как в «Суйде», так и в «Эссойле» трансекта имела длину

1500 метров и состояла из 5-ти учетных площадок на основных элементах мезорельефа вдоль градиента пастбищной нагрузки – от слабосбитой до сильносбитой. Сбитость пастбищ – динамический процесс, связанный с выпасом коров и проявляющийся в замене ценных видов растений на сорные и неподаваемые, уменьшении их урожайности и проективного покрытия растительности вплоть до оголения почвы. В данной работе в основу градации сбитости пастбища помимо различий по фитомассе вошли также мощность дернины и индекс физического состояния почвы (ИФС) – среднее геометрическое отношение экспериментально определенных физических параметров почвы (плотность сложения, твердость, влажность) к оптимальным значениям (Балашов, Моисеев, 2009) (табл.).

Таблица. Распределение различных участков пастбищ ОПХ «Суйда» и ЗАО «Эссойла» за сезон 2010 года по градиенту пастбищной нагрузки.

Показатель		Участки трансекты				
		I	II	III	IV	V
«Суйда»	Растительное сообщество	Злаково-осотовое	Осотовое	Разнотравное	Осотово-разнотравное	Камышово-осотовое
	Число видов, шт.	60	48	16	26	41
	Проективное покрытие, %	94	85	40	55	75
	Мощность дернины, см	8	6	2	3	5
	ИФС*	0,83	0,79	0,70	0,67	0,75
	Нагрузка на почву	Слабо-сбитая	Средне-сбитая	Сильносбитая	Сильносбитая	Средне-сбитая
«Эссойла»	Растительное сообщество	Разно-травное	Камышово-осотовое	Осотово-разнотравное	Злаково-осотовое	Злаково-осотовое
	Число видов, шт	14	32	49	52	59
	Проективное покрытие, %	32	58	77	79	82
	Мощность дернины, см	2	4	5	7	8
	ИФС*	0,65	0,72	0,76	0,80	0,82
	Нагрузка на почву	Сильно-сбитая	Средне-сбитая	Слабосбитая	Слабосбитая	Слабо-сбитая

* ИФС – индекс физического состояния

Отбор проб воздуха проводился на всех учетных площадках методом закрытых камер (Бучкина и др., 2008; Buchkina et al., 2010) в 3-кратной повторности 1–2 раза в неделю. Определение концентрации N_2O в пробах воздуха проводилось на газовом хроматографе, оснащенный детектором электронного захвата. Мониторинг кислотности, плотности сложения и влажности почв, а также содержания минеральных форм азота проводился 2–3 раза в месяц по стандартным методикам физического и химического анализа почв (Растворова и др., 1995). Учет растительной биомассы и биоразнообразия проводился с использованием геоботанических площадок, закладываемых в 3-х кратной повторности на всех учетных площадках.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Содержание влаги и температура почвы являются основными параметрами, влияющими на эмиссию закиси азота из почв (Merino et al., 2001). Динамика влажности изучаемых почв пастбищ в течение сезона выпаса в слое 0–10 см менялась в широких пределах и зависела как от погодных условий, так и от положения почвы в рельефе. Существенных различий по влажности почв между участками с различной сбитостью не наблюдалось. Больше количество влаги содержалось в почвах у подножия склонов и рядом с мелиоративными каналами, меньшее – на более дренированных, выровненных участках. Наименьшая влажность почв была отмечена после продолжительной засухи, и в августе достигала значений 7–8%, что было в 5–6 раз ниже по сравнению с июньскими показателями. Существенной разницы по температуре верхнего горизонта почв на исследуемых участках также не наблюдалось. В течение выпаса диапазон изменений температуры органогенного горизонта почв пастбища составлял от 11,3 до 19,9°C и не был существенно выше на сильносбитых участках.

Почвы изучаемых пастбищ характеризовались слабокислой реакцией среды. В течение сезона наблюдалось незначительное снижение данного показателя в сторону подкисления на обоих пастбищах. Сильносбитые участки пастбищ отличались менее кислой реакцией почвенной среды, pH_{KCl}

изменялся от 6,6 до 5,1. На слабо- и средне-сбитых участках показатель варьировал в пределах от 5,7 до 4,8.

Повышение плотности сложения почв – важный фактор увеличения эмиссии N_2O из почв. Данный фактор через изменение доли пор, занятых водой, влияет на направленность процессов нитрификации и денитрификации, в результате которых и образуется N_2O (Dobbie et al., 2003). В июне показатели плотности почв обоих пастбищ были достаточно низкими и варьировались от 1,03 до 1,18 г cm^{-3} в «Суйде» и от 1,15 до 1,35 г cm^{-3} в «Эссойле». Июльская и августовская засухи привели к достоверному ($p < 0,001$) увеличению плотности сложения почв до 1,65–1,75 г cm^{-3} . Максимальные показатели плотности сложения наблюдались в почвах на сильносбитых участках, однако разница данного показателя со средне – и слабосбитыми участками почвы была недостоверной.

Из статистического анализа данных следует, что динамика содержания в почве минерального азота ($N_{мин}$) на исследуемых пастбищах «Суйды» и «Эссойлы» достоверно зависела от погодных условий, а именно – температуры и влажности почвы ($r = 0,96$ и $0,97$, соответственно, при $p < 0,001$). Это согласуется с данными Р. А. Полуэктова и В. В. Терлеева (2012), отмечавших строгую зависимость динамики содержания нитратов и аммония в дерново-подзолистой почве от погодных условий. С момента начала выпаса коров до июльской жары наблюдалось увеличение содержания $N_{мин}$ в почвах всех участков пастбищ, что связано с началом поступления в почву продуктов жизнедеятельности КРС и благоприятными погодными условиями (тепло и влажно). Существенных различий по данному показателю между участками с разной степенью сбитости пастбища не наблюдалось при незначительно более высоких показателях на почвах сильносбитых участков. В среднем, в первый месяц выпаса коров количество $N_{мин}$ варьировало от 40 до 120 мг ($N-NO_3^- + N-NH_4^+$) kg^{-1} почвы. От середины сезона выпаса и до его окончания в сентябре отмечалось снижение содержания $N_{мин}$ в почвах изучаемых пастбищ. В данный период времени достоверно большее его количество ($p < 0,05$) наблюдалось в почвах сильносбитых участков. Ми-

нимальное содержание $N_{\text{мин}}$ в почвах было отмечено в середине августа и составило на сильносбитых участках 22 и 29 мг ($N\text{-NO}_3^- + N\text{-NH}_4^+$) кг^{-1} почвы для «Суйды» и «Эссойлы» соответственно. На слабо- и среднесбитых участках данный показатель был в 1,2 раза ниже.

В течение 95-дневного периода выпаса как на пастбище в «Суйде», так и в «Эссойле» эмиссия N_2O была выше в начале и конце сезона, а в июле и августе, из-за засухи в регионе, наблюдались минимальные эмиссии N_2O . Расчет кумулятивной эмиссии N_2O за период выпаса позволил выявить различия по данному показателю между участками с разной степенью сбитости пастбища. На рисунке представлена кумулятивная эмиссия N_2O за 95 дней из почв пастбища в «Суйде». Участки с разным градиентом нагрузки имели достоверные различия ($p < 0,001$) по кумулятивным эмиссиям N_2O с увеличением выделения газа из почвы при возрастании сбитости пастбища. Из сильносбитой почвы кумулятивная эмиссия N_2O за время выпаса коров составила 0,85 $\text{кг } N_2O \text{ га}^{-1}$. Из среднесбитой почвы за этот же период времени выделилось 0,4 $\text{кг } N_2O \text{ га}^{-1}$, а из слабосбитой – 0,2 $\text{кг } N_2O \text{ га}^{-1}$. В «Эссойле», как и в «Суйде», кумулятивные эмиссии N_2O из почв участков с разной степенью сбитости имели достоверные различия ($p < 0,001$) (рис.). Однако кумулятивная эмиссия N_2O из почв участков пастбища со средней и сильной сбитостью в «Эссойле» была, соответственно, в 1,8 и 3 раза выше, чем из почв аналогичных участков в Суйде. Кумулятивная эмиссия N_2O из почв слабосбитых участков пастбищ «Суйды» и «Эссойлы» достоверно не отличалась. Различия по кумулятивной эмиссии N_2O между пастбищами региона объясняются отличными друг от друга способами выпаса коров, различием в гранулометрическом составе почв и влиянием уровня грунтовых вод. Из литературных данных известно, что с утяжелением гранулометрического состава эмиссия N_2O из почв возрастает. Чем тяжелее гранулометрический состав почв и чем выше их плотность сложения, тем меньше их поровое пространство и тем меньшего количества влаги требуется для образования в почве анаэробных условий и развития процесса денитрификации.

(Balashov et al., 2010, Giltrap et al., 2010). Более высокая скорость образования N_2O в анаэробных условиях – достаточно известный феномен, который показан для денитрифицирующих бактерий, также как и для автотрофных и гетеротрофных нитрификаторов, которые обладают способностью к денитрификации (Семенов и др., 1999; Blagodatskiy et al., 2008).

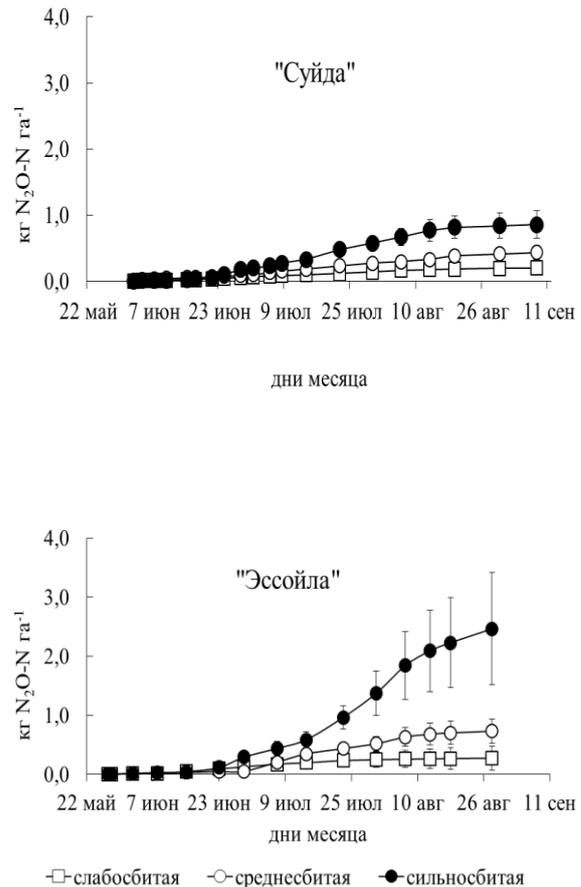


Рис. Кумулятивная эмиссия N_2O из почв пастбищ ОПХ «Суйда» и ЗАО «Эссойла» за 95 дней. Слабосбитая, среднесбитая и сильносбитая – участки пастбища, различающиеся по степени сбитости растительности.

Эмиссия N_2O достоверно возрастает в почвенных горизонтах, близких к уровню грунтовых вод, что также объясняется преобладанием в таких горизонтах анаэробных условий (Berglund et al., 2011; Van Beek et al., 2012). После проведенных мелиоративных работ в «Эссойле», в результате которых вся толща торфа до материнской породы – синих кембрийских глин – была удалена, сплани-

рованная почва в настоящее время имеет тяжелосуглинистый гранулометрический состав. Кроме того, грунтовые воды здесь расположены достаточно близко к поверхности, в отличие от почв «Суйды», которые по своему составу легкие и среднесуглинистые, а грунтовые воды на исследованном участке расположены достаточно глубоко.

Почвы участков с разным градиентом пастбищной нагрузки различались по физическим и химическим свойствам, а также по фитоценоотическому состоянию растений. Сильносбитая почва характеризовалась более высокими показаниями плотности сложения, большим содержанием минерального азота, а биомасса растений в таких местах была наименьшей. Это могло влиять на структуру микробного сообщества, отвечающую за нитрификацию и денитрификацию. В работах ряда ученых (Романовская, 2003; van Groenigen et al, 2005b) установлено, что с ростом плотности сложения почвы и увеличением давления почвенной влаги от -100 до $-0,01$ атмосфер повышается численность и биомасса микроорганизмов, происходит перестройка микробного комплекса в сторону возрастания его разнообразия независимо от генетического происхождения почв, что сопровождается повышением денитрифицирующей активности почв и усилением эмиссии N_2O из почвы в атмосферу.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований установлено, что пригонный выпас крупного рогатого скота как на огражденных пастбищах, так и на не огражденных приводит к формированию на данных территориях участков с разной степенью сбитости. С увеличением сбитости пастбищ происходит уменьшение видового состава растительности и проективного покрытия почв, ухудшение физических свойств почв, а эмиссия N_2O из почвы достоверно возрастает. Различия в эмиссии N_2O из почв пастбищ с разной степенью сбитости обусловлены изменением плотности сложения почв и обогащением их минеральным азотом, что приводит к усилению процесса денитрификации. Строгое соблюдение приемов рационального использования пастбищ и перераспределение интенсивности выпаса должны привести к уменьшению эмиссии N_2O из почв кормовых угодий.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность кандидату с.-х. наук К. Г. Моисееву за предоставление данных по индексу физического состояния почв пастбищ; А. В. Ганину, директору ОПХ «Суйда» в 2010 г., за предоставление возможности проведения исследований на пастбищах хозяйства; Г. И. Деминой за помощь в отборе образцов почв и воздуха в ЗАО «Эссойла».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Балашов Е. В., Моисеев К. Г. 2009. Нормативы оценки оптимизации физических параметров почв, обеспечивающие совершенствование технологий возделывания сельскохозяйственных культур в полевых и регулируемых условиях. Изд. АФИ, Санкт-Петербург. 52 с.
- Бучкина Н. П., Балашов Е. В., Рижия Е. Я., Павлик С. В. 2008. Мониторинг эмиссии закиси азота из сельскохозяйственных почв. Методические рекомендации. СПб, Россельхозакадемия, 20 с.
- Данилова Т. А., Сеницына С. М. 2012. Развитие пастбищного хозяйства нечерноземной зоны. Информационный бюллетень АПК Ярославской области, 1:34-35.
- Дубровина И. А., Соломатова Е. А. 2006. Диагностика торфяных почв Корзинской низины с использованием Классификации 2004 года. Материалы Международной конференции, посвященной 60-летию КарНЦ РАН, 24–27 октября 2006 г, секция "Науки о Земле". Петрозаводск: КарНЦ РАН, с. 96–98.
- Кудеяров В. Н. 1999. Азотный цикл и продуцирование закиси азота. Почвоведение, 8:988-998.
- Моисеев К. Г., Рижия Е. Я., Бучкина Н. П., Балашов Е. В. 2011. Агрофизическая оценка состояния почвенно-растительного комплекса сельскохозяйственных земель северо-западного региона Российской Федерации. Сборник докладов заседаний Санкт-Петербургского отделения Общества почвоведов им. В. В. Докучаева за 2008–2011 гг., СПб.: ВВМ, с. 9–18.
- Пятое национальное сообщение Российской Федерации, представленное в соответствии со статьями 4 и 12 Рамочной Конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата и статьей 7 Киотского протокола. 2010. Москва. 196 с.

- Полуэктов Р. А., Терелеев В. В. 2010. Компьютерная модель динамики содержания азота в корнеобитаемом слое почвы // *Агрохимия*. № 10. С. 68–74.
- Раменский Л. Г., Цаценкин И. А., Чижииков О. Н., Антипин Н. А. 1956. Экологическая оценка кормовых угодий по растительному покрову. М.: Сельхозгиз. 320 с.
- Растворова О. Г., Андреев Д. П., Гагарина Э. И., Касаткина Г. А., Федорова Н. Н. 1995. Химический анализ почв: Учебное пособие. СПб., Изд-во СПбГУ. 264 с.
- Романовская А. А. 2003. Эмиссии парниковых газов в аграрном секторе России. Использование и охрана природных ресурсов в России. 7-8:65-70.
- Семенов В. М., Кузнецова Т. В., Ходжаева А. К., Семенова Н. А., Кудеяров В. Н. 1999. Почвенная эмиссия закиси азота: влияние природных и агрогенных факторов // *Агрохимия*. 1:30-39.
- Balashov E., Horak J., Siska B., Buchkina N., Rizhiya E., Pavlik S. 2010. N₂O fluxes from agricultural soils in Slovakia and Russia - direct measurements and prediction using the DNDC model. *Folia Oecologica*, 37:8-15.
- Berglund Ö. and Berglund K. 2011. Influence of water table level and soil properties on emissions of greenhouse gases from cultivated peat soil. *Soil biology & biochemistry*. 43(5):923-931.
- 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*. 41(13):1448-1455.
- Buchkina N.P., E.V. Balashov, E.Y. Rizhiya and K.A. Smith. 2010. Nitrous oxide emissions from a light-textured arable soil of North-Western Russia: effects of crops, fertilizers, manures and climate parameters. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 87(3):429-442.
- Dobbie K, Smith K.A. 2003. Nitrous oxide emission factors for agricultural soils in Great Britain: the impact of soil water filled pore space and other controlling variables. *Global Change Biol* 9:204–218.
- Giltrap D.L., Li C., Saggar S. 2010. DNDC: A process-based model of greenhouse gas fluxes from agricultural soils. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 136, p. 292–300.
- Khalil M.A.K., Rasmussen R.A. 1992. The global sources of nitrous oxide. *J. Geophys. Res.* 97:14651-14660.
- Merino M.P., Estavillo J.M., Pinto M., Rodriguez M., Dunabeitia M.K., Gonzalez-Murua C., 2001. Nitrous oxide emissions from grassland in an intensive dairy farm in the Basque Country of Spain. *Soil Use Manage.* 17:121-127.
- Oenema O., Wrage N., Velthof G.L., Van Groeningen J.W., Dolfing J., Kuikman P.J. 2005. Trends in global N₂O emissions from animal production systems. *Nutrient Cycling in Agroecosystem*, 72:51-65.
- Singer J.W., Cambardella C.A., Moorman T.B. 2008. Enhancing nutrient cycling by coupling cover crops with manure injection. *Agron. J.* 100:1735–1739.
- Van Beek C., Pleijter M., Jacobs C.M., Velthof G.L., Van Groenigen J.W., Kuikman P. 2012. Emissions of N₂O from fertilized and grazed grassland on organic soil in relation to groundwater level. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 86 (3):331-340.
- Van Groenigen, J.W., Velthof, G.L., Der Bolt, F.J.E., Vos, A., Kuikman, P.J., 2005b. Seasonal variation in N₂O emissions from urine patches: Effect of urine concentration, soil compaction and dung. *Plant Soil* 273:15-27.
- Velthof G.L., Van Beusichem M.L., Oenema O., 1998. Mitigation of nitrous oxide emission from dairy farming systems. *Environ. Pollut.* 102, S1, 173–178.