

## БИОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В РИЗОСФЕРЕ ЯЧМЕНЯ И КЛЕВЕРА КРАСНОГО НА АГРОДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЕ

Е. Я. Рижия<sup>1</sup>, И. М. Мухина<sup>1</sup>, Т. А. Банкина<sup>2</sup>, Ю. В. Хомяков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт»,  
195220, Санкт-Петербург, Гражданский пр., д. 14;

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО СПбГУ,  
199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., д. 7/9,  
E-mail: alenarizh@yahoo.com

Поступила в редакцию 08 мая 2018 г., принята к печати 28 августа 2018 г.

В мелкоделяночном полевом эксперименте на дерново-подзолистой супесчаной почве проводилось изучение биологических процессов, протекающих в ризосфере зерновых и бобовых культур. Цель исследования заключалась в сопряжённой оценке эмиссии диоксида углерода (CO<sub>2</sub>) и закиси азота (N<sub>2</sub>O) из дерново-подзолистой супесчаной почвы и интенсивности процессов минерализации и иммобилизации в ризосфере ячменя (*Hordeum Vulgare* L.) и клевера красного (*Trifolium pratense* L.). В рамках эксперимента изучались содержание лабильных форм углерода и азота, динамика минерализации органического вещества по продуцированию CO<sub>2</sub>, интенсивность процессов азотфиксации и денитрификации в ризосфере культур и прямые эмиссии N<sub>2</sub>O и CO<sub>2</sub> из почвы. Установлено, что количество лабильного углерода в ризосфере клевера увеличивалось в фазу созревания семян, а в ризосфере ячменя – в фазу выхода в трубку. Содержание азота в лабильном органическом веществе в ризосфере как клевера, так и ячменя снижалось от начала вегетации к ее концу. Интенсивность иммобилизационных процессов в ризосфере клевера существенно ( $p < 0,05$ ) превышала их интенсивность в ризосфере ячменя. Между показателями минерализации и иммобилизации органических веществ в ризосфере культур и прямой эмиссией парниковых газов установлена высокая положительная корреляция ( $r = 0,96-0,98$  при  $p < 0,05$ ). В течение периода наблюдений основной вклад в образование закиси азота вносил процесс денитрификации – до 70–80%, в то время как доля нитрификации составляла 20–30%. Вклад ризосферы ячменя и клевера в эмиссию парниковых газов из почв в среднем составил 52 и 71% соответственно.

**Ключевые слова:** ризосфера, зерновые, бобовые, минерализация, иммобилизация, лабильный углерод, лабильный азот, эмиссия, парниковые газы.

## BIOLOGICAL PROCESSES IN THE RHIZOSPHERE OF BARLEY AND RED CLOVER ON LOAMY SAND SPodosol SOIL

E. Ya. Rizhiya<sup>1</sup>, I. M. Mukhina<sup>1</sup>, T. A. Bankina<sup>2</sup>, Yu. V. Khomyakov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Agrophysical Research Institute,  
14 Grazhdanskiy pr., Saint Petersburg, 195220;

<sup>2</sup>Saint Petersburg State University,  
7/9, Universitetskaya emb., Saint Petersburg, 199034  
E-mail: alenarizh@yahoo.com

Biological processes taking place in the rhizosphere of cereals and legumes have been studied in a small-scale field experiment on sod-podzolic sandy loamy soil. The aim of the study was to evaluate the emission of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) and nitrous oxide (N<sub>2</sub>O) from the soil as well as intensity of mineralization and immobilization processes in the rhizosphere of barley (*Hordeum Vulgare* L.) and red clover (*Trifolium pratense* L.). The content of carbon and nitrogen labile forms, the dynamics of organic matter mineralization (for CO<sub>2</sub> production), the intensity of nitrogen fixation and denitrification processes in the rhizosphere of the cultures, and direct emissions of N<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub> from the soil have been measured in the experiment. It was found that the amount of labile carbon in the rhizosphere of clover increased during the phase of seed maturation, and in the rhizosphere of barley – during the stem-extension stage. The nitrogen content in the labile organic matter in the rhizosphere of both clover and barley decreased from the beginning of vegetation to the end. The intensity of immobilization processes in the clover rhizosphere was significantly ( $p < 0.05$ ) higher than that in the barley rhizosphere. A high positive correlation was found between the indicators of mineralization and immobilization of organic substances in the rhizosphere of the cultures and direct emission of the greenhouse gases ( $r = 0.96-0.98$  for  $p < 0.05$ ). During the observation period, the main contributor to the nitrous oxide emission was the process of denitrification, up to 70–80%, while the contribution of nitrification was 20–30%. The contribution of the rhizosphere of the studied crops to the emission of greenhouse gases from soils was on average 52 and 71% for barley and clover, respectively.

**Key words:** rhizosphere, mineralization, immobilization, labile organic matter, labile organic nitrogen, emission, greenhouse gases.

## ВВЕДЕНИЕ

Одними из основных вопросов почвенной экологии являются оценка и прогнозирование изменений, происходящих в почве после ее вовлечения в сферу хозяйственных интересов человека. Для этого разрабатывается система критериев, позволяющих судить о степени деградации почвы как природной экосистемы вследствие антропогенного воздействия. Оценка биологических показателей сельскохозяйственных почв позволяет установить реакцию агросистемы на агротехнические приемы, применяемые при выращивании различных культур (Balashov et. al., 2010).

Почвенные процессы, как известно, наиболее ярко выражены в зоне жизнедеятельности корневых систем растений – ризосфере, непосредственно примыкающей к поверхности корней. Концентрация микроорганизмов в ризосфере в сотни и тысячи раз больше, чем во внекорневой зоне (Bais et al., 2006). Условия, складывающиеся в ризосфере, зависят от вида растений, метаболической активности корневой системы, условий окружающей среды и содержания доступных питательных элементов, а ее границы - от вида растений, типа почвы, влажности и ряда других факторов (Тихонович, Проворов, 2009). Активное выделение корнями растений различных органических соединений обеспечивает питательными веществами почвенные микроорганизмы, а протекающие биологические процессы разложения и синтеза органических веществ накладывают определенный отпечаток на их количественный и качественный состав (Звягинцев и др., 2005).

Особое внимание при изучении биологических параметров почвы уделяется группе лабильного органического вещества, которая играет важную роль во многих почвенных биохимических процессах, в том числе в продуцировании парниковых газов и азотистых соединений, которые высвобождаются из растительного опада, детрита и гумуса и становятся доступными для вегетирующих растений и микроорганизмов (Банкина и др., 2002). Помимо минерального азота из почвы, растения могут получать молекулярный азот из атмосферы за счет деятельности симбиотических, ассоциативных и свободноживущих азотфиксирующих микроорганизмов (Семенов, Когут, 2015). Вклад данного источника азота в производство растительной продукции зависит от жизнедеятельности азотфиксирующих микроорганизмов, которая определяется особенностями возделывания растений и их корневых эксудатов.

До настоящего времени роль ризосферы сельскохозяйственных почв в процессах образования, накопления, поглощения и эмиссии парниковых газов изучена не в полной мере, в связи с чем современные

мультидисциплинарные исследования циклов азота и углерода в зоне жизнедеятельности корневых систем растений остаются весьма актуальными. В мелкоделяночном полевом эксперименте на дерново-подзолистой супесчаной почве проводилось изучение биологических процессов, протекающих в ризосфере под зерновыми и бобовыми культурами. Целью исследования являлась сопряжённая оценка эмиссии диоксида углерода (CO<sub>2</sub>) и закиси азота (N<sub>2</sub>O) из дерново-подзолистой супесчаной почвы и интенсивности процессов минерализации и иммобилизации в ризосфере ячменя (*Hordeum Vulgare* L.) и клевера красного (*Trifolium pratense* L.) в динамике.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследования проводились в течение вегетационного периода 2015 г. на агродерново-подзолистой иллювиально-железистой почве на девонских песках (Классификация почв России, 2004) в мелкоделяночном опыте агрофизического стационара Меньковского полигона ФБГНУ АФИ (Гатчинский район Ленинградской области). По данным Меньковской метеостанции, расположенной в 20 м от места проведения мелкоделяночного опыта, 2015 г. характеризовался как умеренно-влажный, количество осадков за вегетационный период составило 435 мм с обильным выпадением в июне и августе и засухой в июле. Для изучения биологических процессов в ризосфере культур использовался контрольный вариант мелкоделяночного опыта, в котором не вносились минеральные удобрения и мелиоранты. Опыт проводился в 4-кратной повторности. Основные агрохимические характеристики почвы до высева семян были следующими: C<sub>орг</sub> – 2,4%; N<sub>общ</sub> – 0,17%; N-NO<sub>3</sub> – 11,2 мг кг<sup>-1</sup>; N-NH<sub>4</sub> – 4,5 мг кг<sup>-1</sup>; подвижный P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – 299 мг кг<sup>-1</sup>; подвижный K<sub>2</sub>O – 97 мг кг<sup>-1</sup>; рН(KCl) – 5,3.

Объектом исследования являлась ризосфера ячменя (*Hordeum Vulgare* L.) сорта Ленинградский (C/N = 18) и клевера красного (*Trifolium pratense* L.) сорта Орфей (C/N = 62). Растения с корнями и почвой отбирались при помощи цилиндра диаметром 30 см на глубину пахотного горизонта в соответствии с тремя фазами их развития. Отбор проб ячменя проводился в фазы кущения (1), выхода в трубку (2) и колошения-цветения (3), а проб клевера – в фазы бутонизации (1), цветения (2) и начала созревания семян (3). Свежая почва разделялась на растительные корневища с прилегающей к ней ризосферой и пустую почву. Материал ризосферы высушивался вместе с корнями, которые отделялись уже в сухом виде. В качестве контрольного варианта служила почва без растений (пар). Показатели динамики кислотности, влажности и содержания минерального азота в ризосфере изучаемых культур представлены в табл. 1.

Таблица 1. Динамика кислотности, влажности и содержания минерального азота в ризосфере ячменя и клевера красного в течение вегетационного периода 2015 г.

ФР*	Контроль (без растений)			Ячмень			Клевер красный		
	pH, КСl	W, %	N <sub>мин</sub> , мг кг <sup>-1</sup>	pH, КСl	W, %	N <sub>мин</sub> , мг кг <sup>-1</sup>	pH, КСl	W, %	N <sub>мин</sub> , мг кг <sup>-1</sup>
1	5,4	15	15	5,5	17	18	5,7	19	18
2	5,3	13	12	5,2	15	11	5,8	15	19
3	5,2	19	10	5,1	21	16	5,9	21	24
НСР <sub>0,95</sub>	0,03	1,5	1,9	0,07	1,2	1,1	0,05	1,3	1,4

**Примечание.** ФР\* – фазы развития ячменя: 1 – кущение, 2 – выход в трубку, 3 – колошение-цветение; фазы развития клевера: 1 – бутонизация, 2 – цветение, 3 – начало созревания семян; W – весовая влажность почвы; N<sub>мин</sub> – содержание минерального азота (сумма аммонийного и нитратного азота).

Агрохимический и агрофизический анализы почвы проводились по общепринятым методам (Крейер и др., 2005). Содержание лабильной фракции органического вещества определялось посредством экстракции горячей водой по методу Шульц-Кершница (1999). Биологическая активность в почве ризосферы определялась по продуцированию CO<sub>2</sub> газохроматографическим методом, денитрификация – ацетиленовым методом по Федоровой (1972) (Банкина и др., 2002), азотфиксация – косвенным (ацетиленовым) газохроматографическим методом по Харди (Hardy et al., 1968), прямые эмиссии N<sub>2</sub>O и CO<sub>2</sub> – методом закрытых камер (Balashov et al., 2010) с дальнейшим анализом проб воздуха на газовом хроматографе с детектором электронного захвата CarloErbaStrumentazione 4130 (Италия).

Статистический анализ был проведен с использованием пакета программ Statistics 5.0. Статистическая обработка результатов включала

вычисление значений средних и стандартных отклонений и коэффициентов линейной корреляции при уровне надежности  $p \leq 0,05$ . Достоверность различий оценивалась с помощью однофакторного дисперсионного анализа ANOVA ( $p < 0,05$ ).

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для определения содержания лабильной фракции органического вещества (C<sub>лаб</sub>) и лабильного азота (N<sub>лаб</sub>) в ризосфере культур применялась экстракция органических соединений горячей водой по Шульц-Кершницу, так как она наиболее близка к количеству органических соединений, минерализуемых почвенной биотой в течение вегетационного периода (Бойцова, Зинчук, 2014). Показатели динамики содержания C<sub>лаб</sub> и N<sub>лаб</sub> в ризосфере изучаемых культур представлены в табл. 2.

Таблица 2. Динамика содержания лабильного углерода и азота в лабильной фракции в ризосфере ячменя и клевера красного

ФР*	Контроль (без растений)			Ячмень			Клевер красный		
	C <sub>лаб</sub>	N <sub>лаб</sub>	C/N	C <sub>лаб</sub>	N <sub>лаб</sub>	C/N	C <sub>лаб</sub>	N <sub>лаб</sub>	C/N
	мг кг <sup>-1</sup>			мг кг <sup>-1</sup>			мг кг <sup>-1</sup>		
1	155±6	26±2	6,3	309±12	78±4	3,9	269±17	74±5	3,6
2	143±12	20±4	7,1	252±19	46±6	5,5	288±12	51±4	5,6
3	132±8	12±1	1,0	320±16	22±3	14,1	345±15	38±5	9,1

**Примечание.** ФР\* – фазы развития культур: 1- кущение ячменя и бутонизация клевера, 2 – трубкование ячменя и цветение клевера, 3 – колошение ячменя и начало созревания семян клевера; C<sub>лаб</sub> – лабильная фракция углерода в органическом веществе; N<sub>лаб</sub> – лабильная фракция азота в органическом веществе.

Результаты исследования показали, что содержание C<sub>лаб</sub> в почве без растений (пар) было в среднем в два раза ниже, чем в почве под культурами, и уменьшалось от начала вегетации к ее концу, что было обусловлено изменением микробиологической активности при разных уровнях температуры и влажности, а также активной переработкой органического вещества микробиотой. В течение вегетации ячменя содержание C<sub>лаб</sub> в ризосфере колебалось от 250 до 320 мг кг<sup>-1</sup> с максимальным значением в фазу колошения и уменьшением в фазу трубкования. В то же время в ризосфере клевера наблюдалось постепенное увеличение содержания

C<sub>лаб</sub> от фазы бутонизации к фазе созревания семян – показатель варьировался от 265 до 345 мг кг<sup>-1</sup>. Полученные результаты согласуются с данными других исследователей (Кудеяров, 2007; Семенов, Когут, 2015), отмечавших, что корни растений различных видов выделяют неодинаковые органические соединения. В ризосфере бобовых культур обнаруживается больше азотистых соединений аминокислот и амидосоединений, а в корневых выделениях злаковых – углеродистых веществ, сахаров и органических кислот. В результате настоящего исследования было установлено, что клевер красный выделяет вещества, имеющие

нейтральную или слабощелочную реакцию, а ячмень – вещества, имеющие кислую реакцию (табл. 1). Существенные различия между изучаемыми культурами ( $p < 0,05$ ) по содержанию  $C_{\text{лаб}}$  наблюдались только в фазу кушения ячменя и бутонизации клевера. Содержание азота в лабильном органическом веществе ( $N_{\text{лаб}}$ ) в ризосфере изучаемых культур снижалось от начала вегетации к ее концу, что было связано с интенсивной минерализацией  $C_{\text{лаб}}$  и поступлением продуктов минерализации в растения. Максимальное количество  $N_{\text{лаб}}$  было установлено в начале вегетации в ризосфере ячменя, оно составило  $88 \text{ мг кг}^{-1}$  и было в 1,2 раза выше ( $p < 0,05$ ), чем в ризосфере клевера. В конце вегетации, наоборот, количество  $N_{\text{лаб}}$  в ризосфере клевера превысило его содержание в ризосфере ячменя в 1,7 раза. Узкое соотношение  $C/N$  в изучаемых культурах в начальный

период их развития обусловлено интенсивной минерализацией данной фракции органического вещества и поглощением азота растениями и микроорганизмами. По мере роста и развития культур соотношение расширялось, что свидетельствовало о возрастании иммобилизационной способности ризосферы за счет корневых эксудатов, в частности, выделения сахаров (Красильников, 1958; Bais et al., 2006). В целом за вегетацию в ризосфере ячменя и клевера минерализационный порог ( $C/N=22-25$ ) не был превышен (Банкина и др., 2005). Это означает, что в ризосфере изучаемых культур процессы минерализации преобладали над процессами иммобилизации.

В табл. 3 представлены показатели динамики минерализации, денитрификации и азотфиксации в ризосфере изучаемых культур.

Таблица 3. Показатели трансформации соединений азота и углерода в ризосфере ячменя и клевера красного (среднее,  $n = 4$ )

ФР*	Контроль (без растений)			Ячмень			Клевер красный		
	C-CO <sub>2</sub>	N-N <sub>2</sub> O	N-NH <sub>3</sub>	C-CO <sub>2</sub>	N-N <sub>2</sub> O	N-NH <sub>3</sub>	C-CO <sub>2</sub>	N-N <sub>2</sub> O	N-NH <sub>3</sub>
	мг кг <sup>-1</sup>								
1	142	11	33	305	23	92	245	16	128
2	125	9	26	232	12	58	282	18	144
3	136	8	22	282	18	63	350	24	176
НСР <sub>0,95</sub>	9,2	0,7	1,9	19,8	1,2	5,0	18,1	1,3	10,5

**Примечание.** ФР\* (1–3) – фазы развития культур (см. табл. 2); C-CO<sub>2</sub> – минерализация; N-N<sub>2</sub>O – денитрификация; N-NH<sub>3</sub> – азотфиксация.

Величина C-CO<sub>2</sub>, продуцируемого инкубируемой почвой, характеризует одновременно минерализующую активность почвенных микроорганизмов и способность к минерализации самого почвенного органического вещества (Rizhiya et al., 2017). Как следует из полученных данных (табл. 3), выращивание культур усилило трансформацию органических соединений в ризосфере. Если в почве без растений в изучаемые фазы выделялось от 119 до 142 мг C-CO<sub>2</sub> кг<sup>-1</sup>, то почве под исследуемыми культурами данный показатель увеличился в 2–2,5 раза, причем в ризосфере ячменя в период наблюдений отмечалось снижение продуцирования CO<sub>2</sub> от фазы кушения к фазе трубкавания и дальнейшее увеличение к фазе колошения, а в ризосфере клевера – повышение от начала вегетации к ее концу. Максимальное содержание C-CO<sub>2</sub> в ризосфере ячменя было установлено в фазу колошения ( $335 \text{ мг кг}^{-1}$ ), а в ризосфере клевера – в фазу начала созревания семян, в среднем оно составило  $350 \text{ мг кг}^{-1}$ . Между содержанием лабильного углерода и минерализацией органического вещества в ризосфере изучаемых культур была выявлена тесная корреляционная связь ( $r = 0,95$  при  $p < 0,05$ ).

Активность денитрификации в ризосфере изучаемых культур была в среднем в два раза выше по сравнению с почвой без растений. Как и в случае с CO<sub>2</sub>, количество выделенного N<sub>2</sub>O в ризосфере ячменя уменьшалось от фазы кушения к фазе

трубкавания и возрастало к фазе колошения, а в ризосфере клевера – повышалось к фазе созревания семян. При этом потери азота в виде N<sub>2</sub>O из ячменя были существенно выше, чем из клевера. Интенсивность процесса денитрификации во всех вариантах опыта достоверно ( $p < 0,05$ ) возрастала с увеличением уровня влажности почвы, которое приводит к повышению количества заземленного воздуха, уменьшению капиллярных сил, снижению водопроницаемости и, как следствие, к образованию большого количества анаэробных зон. Кроме того, она достоверно ( $p < 0,05$ ) зависела от содержания минерального азота в почве (табл. 1) и от соотношения  $C/N$ , которое в клевере было узким (18), а в ячмене – широким (62).

Азотфиксирующая активность в ризосфере исследуемых культур существенно варьировалась по фазам их развития. В контрольном варианте (без растений) в период наблюдений она снижалась с 33 до 22 мг N-NH<sub>3</sub> кг<sup>-1</sup> почвы (табл. 3). Ячмень и клевер оказали существенное влияние на увеличение активности азотфиксации – в вариантах с их выращиванием она была в среднем в 3 и 4 раза больше по сравнению с контролем. В ризосфере ячменя установлено снижение активности данного процесса от фазы кушения к фазе выхода в трубку и дальнейшее увеличение к фазе колошения, а в ризосфере клевера – повышение азотфиксирующей активности к концу эксперимента с максимумом в фазу созревания семян ( $176 \text{ мг N-NH}_3 \text{ кг}^{-1}$ ). В более

раннем исследовании А. Д. Нельсона с соавт. (Nelson et al., 1976) по изучению нитрогеназной активности в ризосфере различных злаков было установлено, что в ризосфере ячменя она была примерно в 10–20 раз выше, чем в почве между рядами. Результаты опытов М. М. Умарова (2009) по изучению динамики ассоциативной азотфиксации под посевами луговых трав в течение двух вегетационных периодов показали, что активность азотфиксации в дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве имела два максимума: постепенно возрастающая с развитием всходов (с середины мая до середины июня), она достигла первого максимума в начале колошения и второго – в фазу цветения злаков. Наиболее существенное поступление азота из клубеньков

клевера наблюдалось в период цветения-начала созревания семян.

Результаты определения прямых эмиссий  $\text{CO}_2$  и  $\text{N}_2\text{O}$  из почвы под изучаемыми культурами представлены в табл. 4. Установлено, что эмиссия  $\text{CO}_2$  из почвы без растений варьировалась от 163 до 220  $\text{мг кг}^{-1}$  без существенных различий по срокам наблюдений. Эмиссия из почвы под ячменем и клевером снижалась от начала вегетации культур к середине, возрастала в конце вегетации и в среднем была в 2–2,3 раза выше по сравнению с контрольным вариантом без растений. Существенные различия между культурами по данному показателю не наблюдались только в конце вегетации, причем из ячменя эмиссия была выше, чем из клевера.

Таблица 4. Прямые эмиссии диоксида углерода и закиси азота из почвы под изучаемыми культурами (среднее, n = 4)

ФР*	Контроль (без растений)		Ячмень		Клевер красный	
	$\text{CO}_2\text{-C}$	$\text{N}_2\text{O-N}$	$\text{CO}_2\text{-C}$	$\text{N}_2\text{O-N}$	$\text{CO}_2\text{-C}$	$\text{N}_2\text{O-N}$
$\text{мг кг}^{-1}$						
1	163	15	508	36	376	22
2	202	13	409	28	383	19
3	224	14	477	34	435	28
НСР <sub>0,95</sub>	13,7	1,0	32,5	2,3	28,6	2,2

**Примечание.** ФР\* (1–3) – фазы развития культур (см. табл. 2).

Эмиссия  $\text{N}_2\text{O}$  из почвы под ячменем по фазам развития растения была существенно ( $p < 0,05$ ) выше, чем его эмиссия из почвы под клевером, и достигла максимума в конце наблюдений. При этом, исходя из данных по денитрификации (табл. 3), установлено, что в течение периода наблюдений основной вклад в образование закиси азота вносил процесс денитрификации – в среднем до 70–80%, в то время как доля нитрификации составляла 20–30%.

Между показателями минерализации и иммобилизации органических веществ в ризосфере культур и прямой эмиссией парниковых газов установлена высокая положительная корреляция ( $r = 0,96 - 0,98$  при  $p < 0,05$ ). Расчет отношения выделений  $\text{CO}_2$  и  $\text{N}_2\text{O}$  в ризосфере к эмиссии изучаемых парниковых газов позволил установить, что вклад ризосферы ячменя в выделение  $\text{CO}_2$  составлял 60%, а ризосферы клевера – 65% от общего вклада в его эмиссию. Вклад ризосферы ячменя и клевера в выделение  $\text{N}_2\text{O}$  составлял 52 и 71% соответственно.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оценка биологических показателей агродерновой почвы позволила установить реакцию

агросистемы на протекающие в ней процессы образования парниковых газов при выращивании различных культур.

В ризосфере ячменя и клевера красного процессы минерализации органического вещества преобладали над процессами иммобилизации. Интенсивность минерализации в ризосфере изучаемых культур изменялась в процессе их роста и развития. Увеличение количества лабильного углерода в ризосфере клевера наблюдалось в фазу созревания семян, а в ризосфере ячменя – в фазу выхода в трубку. Содержание азота в лабильном органическом веществе в ризосфере как клевера, так и ячменя снижалось от начала вегетации к ее концу. Интенсивность иммобилизационных процессов в ризосфере клевера существенно ( $p < 0,05$ ) превышала их интенсивность в ризосфере ячменя. Установлено, что в течение периода наблюдений основной вклад в эмиссию закиси азота вносил процесс денитрификации – до 70–80%, в то время как вклад нитрификации составлял 20–30%. Вклад ризосферы изучаемых культур в эмиссию парниковых газов из почв составил 60–70%.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Банкина Т. А., Петров М. Ю., Петрова Т. М., Банкин М. П. Хроматография в агроэкологии. СПб: НИИ Химии, СПбГУ, 2002. 580 с.
- Бойцова Л. В., Зинчук Е. Г. Динамика содержания и профильное распределение водорастворимого органического вещества в дерново-подзолистой супесчаной почве разной степени окультуренности // Агрофизика. 2014. № 1(13). С. 26–32.
- Звягинцев А. Г., Бабьева И. П., Зенова Г. М. Биология почв. Изд. 3-е, испр. и доп. М.: Издательство Московского университета, 2005. 448 с.
- Красильников Н. А. Микроорганизмы почвы и высшие растения. М.: Изд-во АН СССР. 1958. 465 с.

- Крейер К. Г., Банкина Т. А., Орлова Н. Е., Юрьева Г. М. Практикум по агрохимическому анализу почв. СПбГУ, 2005. 88 с.
- Кудеяров В. Н., Заварзин Г. А., Благодатский С. А., Борисов А. В., Воронин П. Ю. и др. Потоки и пулы углерода в наземных экосистемах России. М.: Наука, 2007. 315 с.
- Семенов В. М., Когут Б. М. Почвенное органическое вещество. М.: ГЕОС, 2015. 233 с.
- Тихонович И. А., Проворов Н. А. Сельскохозяйственная микробиология как основа экологически устойчивого агропроизводства: фундаментальные и прикладные аспекты // Сельскохозяйственная биология. 2011. № 3. С. 3–9.
- Умаров М. М. Азотфиксация в ассоциациях организмов // Проблемы агрохимии и экологии. 2009. № 2. С. 22–26.
- Balashov E., Horak J., Siska B., Buchkina N., Rizhiya E., Pavlik S. N<sub>2</sub>O fluxes from agricultural soils in Slovakia and Russia – direct measurements and prediction using the DNDC model. *Folia Oecologica*, 2010, v. 37, pp. 8–15.
- Bais H. P., Tiffany L., Weir L. T., Perry L. G., Gilroy S., Vivanco J. M. The role of root exudates in rhizosphere interactions with plant and other organisms. // *Annu. Rev. Plant Biol.*, 2006, v. 57, pp. 233–266.
- Hardy R. W. F., Holsten R. D., Jackson E. K., Burns R. C. The Acetylene/Ethylene Assay for N<sub>2</sub> Fixation: Laboratory and Field Evaluation. // *Plant Physiology*, 1968, v. 43, pp. 1185–1207.
- Nelson A.D., Barber L.E., Tjepkema J., Russell S.A., Powelson R., Evans H., Seidler R.J. Nitrogen fixation associated with grasses in Oregon. *Can. // J. Microbiol.*, 1976, v. 22, pp. 523–530.
- Rizhiya E. Ya., Mukhina I. M., Vertebniy V. E., Horak J., Kononchuk P. Yu., Khomyakov Yu. V. 2017. Soil enzymatic activity and nitrous oxide emission from light-textured Spodosol amended with biochar. // *Agricultural biology (Sel'skokhozyaistvennaya biologiya)*, v. 52(3), pp. 464–470.

#### REFERENCES

- Bankina T. A., Petrov M. Ju., Petrova T. M., Bankin M. P. *Hromatografija v agrojekologii* [Chromatography in agroecology]. Saint Petersburg: Chemistry Institute Publishing, 2002. 580 p.
- Boitsova L. V., Zinchuk E. G. Dinamika sodержaniya i profil'noye raspredeleniye vodorastvorimogo organicheskogo veshchestva v derno-podzolistoj supeschanoj pochve raznoj stepeni okul'turnosti [Dynamics of dissolved organic matter and its distribution in soil profiles of loamy-sand spodosol with different fertility levels]. *Agrofizika*, 2014, no. 1(13), pp. 26–32.
- Zvjaginцев A. G., Bab'eva I. P., Zenova G. M. *Biologija pochv* [Soil biology]. Izd. 3-e, ispr. i dop. Moscow: MSU Publishing, 2005. 448 p.
- Krasil'nikov N. A. *Mikroorganizmy pochvy i vysshije rasteniya* [Soil microorganisms and higher plants]. Moscow: AN SSSR Publishing, 1958. 465 p.
- Krejser K. G., Bankina T. A., Orlova N. E., Jur'eva G. M. *Praktikum po agrohicheskomu analizu pochv* [Practical guidance on agrochemical analysis of soils]. Saint Petersburg: Saint Petersburg State University Publishing, 2005. 88 p.
- Kudejarov V. N., Zavarzin G. A., Blagodatskij S. A., Borisov A. V., Voronin P. Ju. i dr. *Potoki i puly ugleroda v nazemnyh ekosistemah Rossii* [Carbon fluxes and pools in terrestrial ecosystems in Russia]. Moscow: Nauka, 2007. 315 p.
- Semenov V. M., Kogut B. M. *Pochvennoye organicheskoye veshchestvo* [Soil organic matter]. Moscow: GEOS, 2015. 233 p.
- Tihonovich I. A., Provorov N. A. Sel'skohozjajstvennaja mikrobiologija, kak osnova ekologicheskij ustojchivogo agroproduktstva: fundamental'nye i prikladnye aspekty [Agricultural microbiology as the basis of environmentally sustainable agricultural production: fundamental and applied aspects]. *Agricultural biology (Sel'skohozjajstvennaja biologija)*, 2011, no. 3, pp. 3–9.
- Umarov M. M. Azotifiksacija v asociacijah organizmov [Nitrogen fixation in associations of organisms]. *Problemy agrohimii i ekologii*, 2009, no. 2, pp. 22–26.
- Balashov E., Horak J., Siska B., Buchkina N., Rizhiya E., Pavlik S. N<sub>2</sub>O fluxes from agricultural soils in Slovakia and Russia – direct measurements and prediction using the DNDC model. *Folia Oecologica*, 2010, v. 37, pp. 8–15.
- Bais H. P., Tiffany L., Weir L. T., Perry L. G., Gilroy S., Vivanco J. M. The role of root exudates in rhizosphere interactions with plant and other organisms. // *Annu. Rev. Plant Biol.*, 2006, v. 57, pp. 233–266.
- Hardy R. W. F., Holsten R. D., Jackson E. K., Burns R. C. The Acetylene/Ethylene Assay for N<sub>2</sub> Fixation: Laboratory and Field Evaluation. // *Plant Physiology*, 1968, v. 43, pp. 1185–1207.
- Nelson A. D., Barber L. E., Tjepkema J., Russell S. A., Powelson R., Evans H., Seidler R. J. Nitrogen fixation associated with grasses in Oregon. *Can. // J. Microbiol.*, 1976, v. 22, p. 523–30.
- Rizhiya E. Ya., Mukhina I. M., Vertebniy V. E., Horak J., Kononchuk P. Yu., Khomyakov Yu. V. Soil enzymatic activity and nitrous oxide emission from light-textured Spodosol amended with biochar. // *Agricultural biology (Sel' skokhozyaistvennaya biologiya)*, 2017. v. 52(3), pp. 464–470.