

## ВЛИЯНИЕ ДЛИТЕЛЬНОГО ПРИМЕНЕНИЯ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ НА ЭКОФИЗИОЛОГИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ МИКРОБОЦЕНОЗОВ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЫ ПРЕДУРАЛЬЯ<sup>1</sup>

© 2020 г. Н. Е. Завьялова<sup>1,\*</sup>, Н. П. Ковалевская<sup>2,\*\*</sup>, Д. Ю. Шаравин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Пермский научно-исследовательский институт сельского хозяйства ПФИЦ УрО РАН  
614532 Пермский край, с. Лобаново, ул. Культуры, 12, Россия

<sup>2</sup> Институт экологии и генетики микроорганизмов ПФИЦ УрО РАН  
614081 Пермь, Пермский край, ул. Голева, 13, Россия

\*E-mail: nezavyalova@gmail.com

\*\*E-mail: nina\_kov@mail.ru

Поступила в редакцию 19.02.2019 г.

После доработки 12.03.2019 г.

Принята к публикации 10.10.2019 г.

Применение минеральных удобрений в возрастающих дозах НРК в полевом севообороте длительного стационарного опыта замедлило минерализацию гумусовых веществ в дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве, способствовало увеличению содержания углерода водной вытяжки с 168 мг/кг почвы в контрольном варианте без внесения удобрений до 303 мг/кг в варианте N150P150K150. Содержание подвижной фракции углерода, извлекаемого 0.1 М NaOH, изменялось от 0.26 до 0.37%, доля лабильного органического вещества к массе почвы составила 0.26–0.47%. Отмечено увеличение общего, легкогидролизуемого и минерального азота в сравнении с контролем в 1.58, 2.29 и 5.35 раза соответственно. Содержание углерода микробной биомассы варьировало в вариантах опыта от 290 до 366 мкг/г почвы. Наиболее благоприятные условия для развития почвенных микробиоценозов были выявлены в варианте N60P60K60, где содержание микробной биомассы составляло 2.96% от  $C_{\text{орг}}$  и превышало показатель контроля в 1.26 раза. По величине базального (БД) и субстрат-индуцированного (СИД) дыхания изученные варианты длительного стационарного опыта аналогичны естественным дерново-подзолистым почвам. При внесении НРК в возрастающих дозах отмечена тенденция к уменьшению БД на 17–24%, увеличения СИД на 17–26% относительно неудобренной почвы. Наиболее высокое удельное дыхание микробной биомассы было зафиксировано в контроле, показатель  $qCO_2$  соответствовал 0.985 мкг С- $CO_2$ /мг  $C_{\text{микро}}$ /ч. В вариантах с минеральными удобрениями отмечено снижение показателя  $QR$ , выявлена слабая степень нарушения устойчивости микробиоценоза, минимальная его величина была зафиксирована при применении N60P60K60 и N120P120K120 и составила 0.26.

**Ключевые слова:** длительное применение минеральных удобрений, экофизиологические показатели, микробиоценозы, дерново-подзолистая почва, Предуралье.

**DOI:** 10.31857/S0002188120010147

### ВВЕДЕНИЕ

Положительное влияние на баланс почвенного органического вещества (ПОВ) оказывают органические и минеральные удобрения, многолетние травы в структуре севооборота, обработка почвы и другие агротехнические приемы [1–3]. Для выявления ответной реакции почвенной микрофлоры на антропогенное воздействие на почву используют комплекс экофизиологических

показателей активности микробиоценоза: базальное дыхание (БД), субстрат-индуцированное дыхание (СИД), интенсивность азотфиксации. Верхний горизонт почвы, в котором расположена основная масса корней растений, характеризуется наибольшей биологической активностью. При определении краткосрочной динамики  $C_{\text{орг}}$ , диагностики состояния почвенного органического вещества и оценки эффективности мероприятий по воспроизводству ПОВ следует измерять не столько валовое количество  $C_{\text{орг}}$ , сколько его содержание в химически лабильных и биологиче-

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 17-45-590166 p\_a).

ски активных пулах и фракциях. Биологически активный пул ПОВ со временем оборачиваемости от <3 до 10 лет ответственен за реализацию большинства физических, химических, биологических, экологических и агрономических функций органического вещества (**ОВ**) в почве [4, 5].

Важнейшим источником поступления азота в почву служит биологический, фиксируемый микроорганизмами азот атмосферы, составляющий более половины общего количества этого элемента, поступающего в почву из разных источников. Последствие разных систем удобрения на биологическую азотфиксацию изучали в работе [6]. Наибольший уровень азотфиксирующей и денитрифицирующей активности и положительный баланс биологического азота обеспечили почвы фонов, сформированных с участием органических удобрений. Наличие растений повысило активность этих процессов и снизило долю закиси азота в потерях за счет денитрификации. При внесении минеральных азотных удобрений баланс биологического азота был отрицательным.

Цель работы – изучить влияние длительного применения возрастающих доз полного минерального удобрения на экофизиологические показатели активности микробсоценоза дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почвы Предуралья.

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Полевой стационарный опыт по изучению влияния различных доз минеральных удобрений на качество ПОВ и урожайность полевых культур заложен в 1978 г. на опытном поле Пермского НИИСХ ПФИЦ УрО РАН на дерново-подзолистой почве со следующими характеристиками (слой 0–20 см):  $pH_{KCl}$  5.6, гидролитическая кислотность – 2.0, обменная – 0.025, сумма поглощенных оснований – 21.0 мг-экв/100 г почвы, содержание органического углерода – 1.23%, подвижных форм фосфора – 175, обменного калия – 203 мг/кг почвы (по Кирсанову). Варианты опыта включали 6 уровней минерального питания: N0P0K0, N30P30K30, N60P60K60, N90P90K90, N120P120K120, N150P150K150. Минеральные удобрения вносили под зерновые культуры и картофель, в посеве клевера изучали последствие. В опыте использовали  $N_{aa}$ ,  $P_{cd}$  и  $K_x$ . Известь вносили перед закладкой опыта в дозе по 1.0  $H_r$ . Органические удобрения в опыте не использовали. Севооборот – 8-польный со следующим чередованием культур: чистый пар – озимая рожь – картофель – пшеница – клевер 1-го года пользования – клевер 2-го года пользования – ячмень – овес. Общая площадь делянки 120 м<sup>2</sup>, учетная – 76.4 м<sup>2</sup>. Опыт заложен в двукратной повторности, разме-

щение вариантов рендомизированное. Почвенные образцы для исследования отбирали ручным буром в конце 5-й ротации севооборота после уборки овса с 2-х несмежных повторений в слое 0–20 см почвы в 3-х точках с каждой делянки. Содержание органического углерода в почве определяли методом бихроматного окисления, общий азот – по Кьельдалю, углерод, экстрагируемый горячей водой ( $C_{эгр}$ ), – 0.1 н. раствором NaOH, 0.1 М  $Na_4P_2O_7$  при pH 7.0 – по методу [7]. Параметры гумусовой системы оценивали по уточненной системе показателей [8].

Субстрат-индуцированное дыхание (СИД) почвы оценивали по скорости начального максимального дыхания микроорганизмов после обогащения почвы дополнительным источником углерода и энергии (глюкозой). Во флаконы помещали навеску почвы (1 г) и прединкубировали в течение 3 ч при 22°C. После проветривания во флаконы добавляли 0.4 мл 4%-ного раствора глюкозы и инкубировали при 22°C в течение 3–4 ч. Концентрацию  $CO_2$  определяли на хроматографе Chrom 5 на колонке длиной 1.8 м, внутренним диаметром 3 мм с наполнителем Porapak N. В качестве детектора использовали катарометр. Повторность измерений трехкратная. Субстрат-индуцированное дыхание почвы оценивали по скорости начального максимального дыхания микроорганизмов после обогащения почвы глюкозой. Углерод микробной биомассы рассчитывали по формуле:

$$C_{\text{микр}} \text{ (мкг С/г почвы)} = \text{СИД (мкг } CO_2/\text{г/ч)} \times 40.04 + 0.37.$$

Показатели почвенного дыхания выражали в мкг  $CO_2/\text{г почвы/ч}$ . Микробный метаболический коэффициент рассчитывали как отношение скорости базального дыхания к величине микробной биомассы:  $БД : C_{\text{микр}} = qCO_2 \text{ (мкг С-} CO_2 : (\text{мг } C_{\text{микр}}/\text{ч}))$ . Углерод микробной биомассы рассчитывали по формуле:  $C_{\text{микр}} \text{ (мкг С/г почвы)} = \text{СИД (мкг } CO_2/\text{г сухой почвы/ч)} \times 40.04 + 0.37$  [9, 10].

Для определения активности азотфиксации применяли классический ацетиленовый метод. Во флаконы помещали навеску почвы (1 г), вносили 0.5 объема раствором 2%-ной глюкозы, закрывали флакон и замещали оставшийся объем воздуха ацетиленом. Далее инкубировали при 28°C в течение 24 ч. Количественные измерения этилена проводили на хроматографе Chrom 5. Потенциальную активность азотфиксации выражали в мкг этилена/кг почвы/ч [11]. Измерения  $C_{\text{орг}}$ , СИД, БД, азотфиксации проводили в индивидуальных образцах в шестикратной повторности. Статистическую обработку результатов проводили с помощью программы Microsoft Excel 2007.

Таблица 1. Агрохимическая характеристика дерново-подзолистой почвы

Вариант	pH <sub>KCl</sub>	C <sub>орг</sub> , %	N <sub>общ</sub> , мг/кг	N <sub>лг</sub> , мг/кг	N <sub>мин</sub> , мг/кг	C <sub>ГК</sub> : C <sub>ФК</sub>	C <sub>ЭГВ</sub> , мг/кг	C <sub>0.1н. NaOH</sub> , %	C <sub>0.1м Na<sub>4</sub>P<sub>2</sub>O<sub>7</sub></sub> , %
N0P0K0	5.1	1.04	1120	112	20.2	0.70	168	0.28	0.26
N30P30K30	5.0	1.06	1210	120	48.4	0.80	200	0.26	0.28
N60P60K60	4.9	1.19	1380	134	67.3	0.83	243	0.26	0.32
N90P90K90	4.8	1.25	1490	175	81.5	0.88	274	0.31	0.35
N120P120K120	4.7	1.24	1610	221	84.4	0.94	293	0.34	0.41
N150P150K150	4.5	1.25	1760	256	108	0.98	305	0.37	0.47
HCP <sub>05</sub>	0.2	0.06	60	12	5.2	—	20	0.03	0.04

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Минерализуемый пул органического вещества пахотных почв рассматривается как совокупность растительных остатков, микробной биомассы и подвижного гумуса. Поступление органического углерода в виде корневых и пожнивных остатков в 8-польном севообороте с 2-мя полями клевера при внесении минеральных удобрений в дозах N90P90K90–N150P150K150 привело к восстановлению исходного содержания углерода в почве (1.23%) (табл. 1). В варианте N150P150K150 установлено повышение содержания общего (N<sub>общ</sub>), легкогидролизуемого (N<sub>лг</sub>) и минерального азота (N<sub>мин</sub>) в сравнении с контролем в 1.58, 2.29 и 5.35 раза. При многолетнем изучении состава гумуса дерново-подзолистой почвы при возрастающих дозах NPK было отмечено изменение его состава и повышение степени гумификации органического вещества на минеральном фоне питания, что позволило обосновать возможность применения показателей фракционного состава гумусовых кислот при оценке направленности и интенсивности трансформации органического вещества. При внесении удобрений больше N90P90K90 отмечено увеличение показателя C<sub>ГК</sub> : C<sub>ФК</sub> до 0.94–0.98.

Длительное воздействие минеральных удобрений повлияло прежде всего на активную часть органического вещества почвы, которая непосредственно участвует в круговороте углерода в процессе возделывания сельскохозяйственных культур [5, 12]. Внесение в почву возрастающих доз NPK привело к увеличению содержания углерода, экстрагируемого горячей водой с 168 мг/кг почвы в контрольном варианте до 303 мг/кг в варианте N150P150K150. Содержание подвижной фракции углерода изменялось от 0.26 до 0.37% к массе почвы. Доля лабильного органического вещества к массе почвы составляла 0.26–0.47%, что было характерно для дерново-подзолистых почв [13]. Минеральные удобрения способствовали повышению подвижности органического вещества.

Установлена тесная корреляционная связь между содержанием экстрагируемых компонентов *OB* и общего углерода в почве:  $r = 0.94–0.96$  ( $P \leq 0.05$ ).

Важным показателем динамики свойств пахотных почв является их микробиологическая активность, которая меняется гораздо быстрее, чем содержание общего углерода. Углерод микробной биомассы – важный параметр во многих экологических исследованиях, т.к. является функциональной частью почвенного органического вещества. Показано, что величина микробной биомассы – более чувствительный параметр к изменениям окружающей среды, чем, например, содержание органического вещества в почве. В зависимости от дозы NPK, содержание C<sub>орг</sub> (табл. 2) менялось от 104 до 125 мг/г почвы. При внесении минеральных удобрений в дозах N30P30K30–N150P150K150 отмечено увеличение содержания C<sub>орг</sub> на 1.7–20.0% относительно варианта без удобрений.

Содержание углерода микробной биомассы варьировало в вариантах опыта от 290 до 366 мкг/г почвы. Эти величины характерны для дерново-подзолистых почв [14, 15]. Величина C<sub>микр</sub> в значительной степени зависела от приемов землепользования. В исследованной почве она была больше в удобренных вариантах. Доля углерода микробной биомассы в составе органического углерода почвы – важный показатель качества органического вещества. Он характеризует состояние и разнообразие микробиоценоза, а также степень его зрелости [16]. Минимальное соотношение C<sub>микр</sub> : C<sub>орг</sub> определено при дозе N90P90K90 и было равно 2.71. Наиболее благоприятные условия для развития почвенных микробиоценозов были выявлены в вариантах N60P60K60 и N150P150K150, где содержание микробной биомассы составляло 2.92 и 2.96% от C<sub>орг</sub> и превышало показатель контроля в 1.26 и 1.22 раза соответственно. По-видимому, количество поступавших растительных остатков в почву в этих вариантах было достаточным для компенсации потребно-

**Таблица 2.** Влияние доз минеральных удобрений на содержание микробной биомассы

$C_{\text{орг.}}$ мг/г	Углерод биомассы ( $C_{\text{мб}}$ )				$q\text{CO}_2$ (мкг С- $\text{CO}_2$ /г/ч) $C_{\text{микр}}/\text{ч}$
	$C_{\text{микр}}$ , мкг/г	$C_{\text{микр}} : C_{\text{орг}}$	$C_{\text{микр}} : C_{0,1\text{MNaOH}}$ , %	$C_{\text{микр}} : C_{0,1\text{MNa}_2\text{P}_2\text{O}_7}$ , %	
	N0P0K0				
104	290	2.78	10.4	11.2	0.985
	N60P60K60				
120	354	2.96	13.6	11.1	0.649
	N90P90K90				
125	338	2.71	10.9	9.67	0.724
	N120P120K120				
124	355	2.88	10.4	8.17	0.647
	N150P150K150				
125	366	2.92	9.9	7.78	0.657

стей микроорганизмов в углероде. Микробный метаболический коэффициент ( $q\text{CO}_2$ ) количественно описывает физиологический статус микробного сообщества и чувствителен к нарушениям в почве, по его величине можно прогнозировать продолжительность и глубину нарушений в почвенных экосистемах [17, 18]. Высокая величина  $q\text{CO}_2$  характерна для молодых и сильно нарушенных экосистем, более низкая – для старых или стабильных экосистем. Высокий  $q\text{CO}_2$  связан также с большей скоростью отмирания микробной биомассы. Наиболее высокое удельное дыхание микробной биомассы было зафиксировано в контроле, показатель  $q\text{CO}_2$  соответствовал 0.985 мкг С- $\text{CO}_2$ /мг  $C_{\text{микр}}/\text{ч}$  (табл. 2). Улучшение функционирования микробоценоза почвы наблюдали при применении N60P60K60–N150P150K150, где показатели  $q\text{CO}_2$  соответствовали 0.647 и 0.724 мкг С- $\text{CO}_2$ /мг  $C_{\text{микр}}/\text{ч}$ .

Важнейшим показателем, определяющим интенсивность минерализации органического вещества почвы при внесении удобрений, являются скорость продуцирования углекислого газа (табл. 3). Базальное дыхание (БД) почвенной микрофлоры характеризует доступность органического углерода в почве, отражает интенсивность минерализации органических веществ. В исследованной дерново-подзолистой почве скорость БД при внесении минеральных удобрений в сравнении с контролем (2.86 мкг С- $\text{CO}_2$ /г/ч) во всех вариантах снижалась. Минимальные показатели БД были получены при применении N60P60K60 и N120P120K120 и соответствовали 2.30 мкг С- $\text{CO}_2$ /г/ч. Микроорганизмы исследованных почв обладали высокой активностью к использованию легкогидролизуемого источника углерода (глюкозы), по скорости потребления которой судят об их потенциальной биохимической активности. Скорость СИД увеличилась при внесении минеральных удобрений в возрастающих дозах. Максимальную величину СИД (9.12) зафиксировали при применении N150P150K150, что превышало СИД в контроле в 1.26 раза.

Коэффициент микробного дыхания ( $QR$ ) считается интегральным показателем, позволяющим оценивать экологическое состояние почв. Его величина дает представление о запасах питательных веществ в почве, устойчивости системы микробного сообщества, отражает степень антропогенного или климатического воздействия на почвенные ценозы [19, 20]. Величины  $QR$  могут быть ранжированы к антропогенным воздействиям. Чем меньше показатель  $QR$ , тем меньше выявляется нарушений в качественном и количественном составе почвенной биоты. Оптимальные показатели  $QR$  находятся в пределах от 0.1 до 0.2 (0.3) и характерны для естественных биоценозов при оптимальных климатических условиях [17, 20–22]. В контрольном варианте N0P0K0 показатель  $QR$  соответствовал 0.395, что свидетельствовало о средней степени нарушения устойчивости микробного сообщества почвы. В вариантах с минеральными удобрениями отмечено снижение этого показателя, минимальные показатели  $QR$

**Таблица 3.** Биологические показатели состояния микробного сообщества

Показатель	Варианты				
	N0P0K0	N60P60K60	N90P90K90	N120P120K120	N150P150K150
БД, мкг С- $\text{CO}_2$ /г/ч	2.86 ± 0.28	2.30 ± 0.05	2.45 ± 0.09	2.30 ± 0.21	2.40 ± 0.14
СИД, мкг С- $\text{CO}_2$ /г/ч	7.24 ± 1.33	8.84 ± 1.18	8.44 ± 0.32	8.86 ± 0.78	9.12 ± 0.31
$QR$	0.395	0.260	0.290	0.260	0.263
Азотфиксация, мкг $\text{C}_2\text{H}_4$ /кг/ч	32.1 ± 3.8	46.8 ± 11.4	68.7 ± 10.9	57.1 ± 13.6	53.1 ± 11.1

были зафиксированы при N60P60K60 и N120P120K120 и соответствовали 0.26 (слабая нарушенность устойчивости микробоценоза).

Важный процесс, характеризующий интенсивность биологических процессов в почве — азотфиксация. В природных биоценозах азот не является лимитирующим их продуктивность фактором, поскольку все звенья биогеохимического цикла сбалансированы. В агроэкосистемах он сильно нарушен из-за регулярных обработок почвы, севооборотов и выноса значительного количества азота урожаем [23]. Показано, что азотфиксирующая активность микробных сообществ дерново-подзолистой почвы возрастала с увеличением доз минеральных удобрений от 32.1 в варианте без удобрений до 68.7 мкг  $C_2H_4$ /кг/ч в варианте N30P30K30—N90P90K90. Тенденция к снижению биологической фиксации азота была зафиксирована при применении N120P120K120 и N150P150K150, где азотфиксирующая активность соответствовала 57.1 и 53.1 мкг  $C_2H_4$  кг/ч/, т.е. на 17 и 23% меньше, чем при N90P90K90. Вероятно, что снижение азотфиксирующей активности микроорганизмов при высоких дозах минеральных удобрений связано с изменением кислотно-щелочных условий почвенного раствора (рН 4.8—4.5), возрастанием содержания легкогидролизуемого и минерального азота (в 4—5 раз больше контроля). Наличие в севообороте 2-х полей клевера также могло изменить в почве соотношение несимбиотических и симбиотических азотфиксирующих бактерий. Бобовые культуры, выращиваемые на фоне применения высоких доз азотных удобрений, как правило, снижают способность к симбиотической азотфиксации [24].

## ВЫВОДЫ

1. Применение минеральных удобрений в дозах NPK 90—150 кг д.в./га привело к сохранению исходного содержания углерода (1.23%) в дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве, повысило подвижность органического вещества: содержание углерода водной вытяжки с 168 мг/кг почвы в контрольном варианте до 303 мг/кг в варианте применения N150P150K150. Содержание подвижной фракции углерода, извлекаемого 0.1 М NaOH, изменялось от 0.26 до 0.37%, доля лабильного органического вещества к массе почвы составила 0.26—0.47%. Отмечено увеличение содержания общего, легкогидролизуемого и минерального азота в сравнении с контролем в 1.58, 2.29 и 5.35 раза соответственно.

2. Содержание углерода микробной биомассы варьировало в вариантах опыта от 290 до 366 мкг/г почвы. Наиболее благоприятные условия для развития почвенных микробиоценозов были выяв-

лены в варианте применения N60P60K60, где содержание микробной биомассы составляло 2.96% от  $C_{орг}$  и превышало показатель контроля в 1.26 раза. По величине базального и субстрат-индуцированного дыхания изученные варианты почвы длительного стационарного опыта были аналогичны естественным дерново-подзолистым почвам. При внесении NPK в возрастающих дозах отмечена тенденция уменьшения почвенного базального дыхания (БД) на 17—24%, увеличения субстрат-индуцированного дыхания (СИД) на 17—26% относительно неудобренной почвы. Наиболее высокое удельное дыхание микробной биомассы было зафиксировано в контроле, показатель  $qCO_2$  соответствовал 0.985 мкг  $C-CO_2$ /мг  $C_{микр}$ /ч. В вариантах с применением минеральных удобрений отмечено снижение показателя  $QR$ , выявлена слабая нарушенность устойчивости микробоценоза, минимальная его величина была зафиксирована при применении N60P60K60 и N120P120K120 и составила 0.26.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Семенов В.М., Лебедева Т.Н. Проблемы углерода в устойчивом земледелии: агрохимические аспекты // Агрохимия. 2015. № 11. С. 3—12.
2. Романенков В.А., Сиротенко О.Д., Рухович Д.И., Романенко И.А., Шевцова Л.К., Королева П.В. Прогноз динамики запасов органического углерода пахотных земель Европейской территории России. М.: ВНИИА, 2009. 96 с.
3. Зинякова Н.Б., Ходжаева А.К., Тулина А.С., Семенов В.М. Активное органическое вещество в серой лесной почве пахотных и залежных земель // Агрохимия. 2013. № 9. С. 3—14.
4. Семенов В.М., Тулина А.С. Сравнительная характеристика минерализуемого пула органического вещества в почвах природных и сельскохозяйственных экосистем // Агрохимия. 2011. № 12. С. 53—63.
5. Семенов В.М., Козут Б.М., Лукин С.М., Шарков И.Н., Русакова И.В., Тулина А.С., Лазарев В.И. Оценка обеспеченности почв активным органическим веществом по результатам длительных полевых опытов // Агрохимия. 2013. № 3. С. 19—31.
6. Егоров В.С. Последствие разных систем удобрения на процессы несимбиотической азотфиксации и денитрификации на дерново-подзолистой почве // Пробл. агрохим. и экол. 2008. № 1. С. 13—16.
7. Методы определения активных компонентов в составе гумуса. М.: ВНИИА, 2010. 34 с.
8. Орлов Д.С., Бирюкова О.Н., Розанова М.С. Дополнительные показатели гумусного состояния почв и их генетических горизонтов // Почвоведение. 2004. № 8. С. 918—926.
9. Ананьева Н.Д., Сусьян Е.А., Гавриленко Е.Г. Особенности определения углерода микробной биомассы почвы методом субстрат-индуцированного дыхания // Почвоведение. 2011. № 11. С. 1327—1333.

10. *Anderson J.P.E., Domsch K.H.* A physiological method for the quantitative measurement of microbial biomass in soils // *Soil Biol. Biochem.* 1978. V. 10. № 3. P. 215–221.
11. *Эмер Н.Р., Семенов А.М., Зеленов В.В., Зинякова Н.Б., Костина Н.В., Голицынов М.В.* Ежесуточная динамика численности и активности азотфиксирующих бактерий на участках залежной и интенсивно возделываемой почвы // *Почвоведение.* 2014. № 8. С. 963–970.
12. *Дричко В.Ф., Бакина Л.Г., Орлова Н.Е.* Устойчивая и лабильная части гумуса дерново-подзолистой почвы // *Почвоведение.* 2013 № 2. С. 41–47.
13. *Завьялова Н.Е.* Методические подходы к изучению гумусного состояния пахотных почв // *Плодородие.* 2006. № 1. С. 11–15.
14. *Ананьева Н.Д., Сусьян Е.А., Рыжова И.М., Бочарникова Е.О., Стольников Е.В.* Углерод микробной биомассы и микробное продуцирование двуокси углерода дерново-подзолистыми почвами постагрогенных биоценозов и коренных ельников южной тайги (Костромская область) // *Почвоведение.* 2009. № 9. С. 1109–1116.
15. *Гончарова О.В., Телеснина В.М.* Биологическая активность постагрогенных почв (на примере Московской области) // *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 17. Почвоведение.* 2010. № 4. С. 24–31.
16. *Insam H., Domsch K.H.* Relationship between soil organic carbon and microbial biomass on chronosequences of reclamation sites // *Microb. Ecol.* 1988. № 15. P. 177–188.
17. *Ананьева Н.Д., Благодатская Е.В., Демкина Т.С.* Пространственное и временное варьирование микробного метаболического коэффициента в почвах // *Почвоведение.* 2002. № 10. С. 1233–1241.
18. *Фрунзе Н.И.* Респираторная активность микробных сообществ пахотного чернозема Молдовы // *Агрохимия.* 2018. № 4. С. 59–64.
19. *Anderson T.H., Domsch K.H.* Application of eco-physiological quotient CO<sub>2</sub> (qCO<sub>2</sub> and qD) on microbial biomasses from soil of different cropping histories // *Soil Biol. Biochem.* 1990. V. 22. № 2. P. 251–255.
20. *Ананьева Н.Д., Благодатская Е.В., Демкина Т.С.* Оценка устойчивости микробных комплексов почв к природным и антропогенным воздействиям // *Почвоведение.* 2002. № 5. С. 580–587.
21. *Жукова А.Д., Хомяков Д.М.* Показатели микробного дыхания в почвенном покрове импактной зоны предприятия по производству минеральных удобрений // *Почвоведение.* 2015. № 8. С. 984–992.
22. *Благодатская Е.В., Ананьева Н.Д., Мякишина Т.Н.* Характеристика состояния микробного сообщества почвы по величине метаболического коэффициента // *Почвоведение.* 1995. № 2. С. 205–210.
23. *Добровольская Т.Г., Звягинцев Д.Г., Чернов И.Ю., Головченко А.В., Зенова Г.М., Лысак Л.В., Манучарова Н.А., Марфенина О.Е., Полянская Л.М., Степанов А.Л., Умаров М.М.* Роль микроорганизмов в экологических функциях почв // *Почвоведение.* 2015. № 9. С. 1087–1096.
24. *Никитишен В.И., Личко В.И.* Баланс азота в агроэкосистемах на серых лесных почвах при длительном внесении удобрений // *Почвоведение.* 2008. № 4. С. 481–493.

## Effect of Prolonged Application of Mineral Fertilizers on the Physiological Indices of Microbiocenosis of Sod-Podzolic Soils of the Cis-Urals

N. E. Zavyalova<sup>a,\*</sup>, N. P. Kovalevskaya<sup>b,##</sup>, and D. Yu. Sharavin<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Perm Research Institute of Agriculture RAS  
ul. Kultury 12, Perm Region, p. Lobanovo 614532, Russia

<sup>b</sup>Institute of Ecology and Genetics of Microorganisms RAS  
ul. Goleva 13, Perm Region, Perm 614081, Russia

\*E-mail: nezavyalova@gmail.com

##E-mail: nina\_kov@mail.ru

The usage of mineral fertilizers in increasing doses of NPK in the field crop rotation of a long stationary experiment slowed down the mineralization of humus substances in sod-podzolic heavy loamy soil, made extracts from 168 mg/kg of soil in the control variant up to 303 mg/kg in variant N150P150K150. The content of the mobile fraction of carbon extracted by 0.1 M of NaOH varied from 0.26 to 0.37%, the share of labile organic matter to the mass of soil was 0.26–0.47%. An increase in total, easily hydrolysable and mineral nitrogen was noted in comparison with the control 1.58, 2.29 and 5.35 times, respectively. The carbon content of microbial biomass varied in the variants of the experiment from 290 to 366 mg/g of soil. The most favorable conditions for the development of soil microbiocenoses were identified in variants N60P60K60 and N150P150K150, where the content of microbial biomass was 2.92 and 2.96% of C<sub>org</sub> and exceeded the control indicator 1.26 and 1.22 times. In terms of the basal and substrate-induced respiration, the studied soil variants of the long-term stationary experiment are similar to the natural sod-podzolic soils. When NPK was applied in increasing doses, a decrease in the basal respiration (BR) by 17–24%, an increase in the substrate-induced respiration (SIR) by 17–26% relative to non-fertilized soil is noted. The highest specific respiration of microbial biomass was recorded in the control, the qCO<sub>2</sub> indicator corresponded to 0.985 mg C-CO<sub>2</sub>/mg C<sub>micro</sub>/h. In the variants with mineral fertilizers, a decrease in the QR index was observed, a weak degree of impaired microbiocenosis resistance was detected, its minimum values were recorded at N60P60K60 and N120P120K120 and corresponded 0.26.

**Key words:** prolonged application of mineral fertilizers, physiological indices, microbiocenosis, sod-podzolic soils, Cis-Urals.