

УДК 631.46+579.6

## ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИЯ НА ПРОКАРИОТНЫЕ СООБЩЕСТВА И СТАБИЛИЗАЦИЮ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЫ

© 2021 г. Н. Е. Завьялова<sup>а</sup>, \*, И. Г. Широких<sup>б</sup>, М. Т. Васбиева<sup>а</sup>, Д. С. Фомин<sup>а</sup><sup>а</sup>Пермский федеральный исследовательский центр УрО РАН,  
ул. Культуры, 12, Лобаново, Пермский край, Пермский район, 614532 Россия<sup>б</sup>Федеральный научный центр Северо-Востока им. Н.В. Рудницкого, ул. Ленина, 166а, Киров, 610007 Россия

\*e-mail: nezavyalova@gmail.com

Поступила в редакцию 13.02.2020 г.

После доработки 01.06.2020 г.

Принята к публикации 07.06.2020 г.

В длительном стационарном опыте (1977–2018 гг.) на дерново-подзолистой почве (Eutric Albic Re-tisols (Abruptic, Loamic, Cutanic)) Пермского края изучали влияние севооборотов с различным насыщением бобовыми травами и бессменных посевов зерновых культур (озимая рожь, яровой ячмень) на структуру прокариотных сообществ и сохранность органического вещества (ОВ). В качестве эталонов сравнения использовали бессменный чистый пар и залежь. Минимальные значения коэффициентов минерализации (0.37) и педотрофности (0.28), найденные на основании учета численности при посеве на традиционные среды МПА, КАА и ПА, выявлены в залежной почве, максимальные (1.97 и 1.30 соответственно) – в парующей почве. Обнаружена обратная зависимость между содержанием в почве  $C_{\text{орг}}$  и коэффициентами минерализации ( $r = -0.67$ ;  $p < 0.01$ ); между соотношением  $C_{\text{ГК}}/C_{\text{ФК}}$  в составе ОВ почвы и коэффициентами ее педотрофности ( $r = -0.64$ ;  $p < 0.02$ ). Показано, что стабилизация ОВ дерново-подзолистой почвы зависит от типа использования, ухудшаясь в ряду: залежь > севообороты (0–28.6–42.9% бобовых) > бессменный посев зерновых > бессменный чистый пар. В возделываемых и парующей почвах, наряду с общим уменьшением запаса ОВ, повысилась его лабильность, о чем свидетельствуют более низкие, чем в залежной почве (0.96), соотношения  $C_{\text{ГК}}/C_{\text{ФК}}$  (0.55–0.79). Между коэффициентами минерализации и показателями  $C_{\text{ГК}}/C_{\text{ФК}}$  в почве длительного стационара прослеживалась наиболее тесная отрицательная корреляция ( $r = -0.81$ ;  $p < 0.001$ ). Показано также, что различное использование дерново-подзолистой почвы сопровождалось структурными перестройками комплекса актиномицетов, выбранных в качестве модельной группы почвенных микроорганизмов. В частности, регулярная механическая обработка почвы и внесение минеральных удобрений (N60P30K60) способствовали увеличению видового спектра стрептомицетов, изменению частоты встречаемости и долевого участия представителей отдельных секций и серий, смене доминантных форм. Полученные результаты указывают на возможность использования микробиологических показателей в качестве биомаркеров состояния почвенного ОВ.

**Ключевые слова:** коэффициенты минерализации и педотрофности, органический углерод, актиномицеты, севооборот, бессменная культура, залежь

DOI: 10.31857/S0032180X21020167

### ВВЕДЕНИЕ

Проблема рационального использования органического вещества (ОВ) приобрела большое научно-практическое значение в связи со значительными его потерями в пахотных почвах, как в нашей стране [2, 5], так и за рубежом [1, 9]. К числу основных факторов, контролирующих степень дегумификации почв, относят тип землепользования, структуру севооборотов, обработку почвы, системы удобрений и др.

Вопросы стабилизации ОВ в агроэкосистемах не могут быть решены без выявления роли микроорганизмов в формировании бездефицитного баланса. Результаты ранее выполненной оценки величины углерода микробной биомассы по вариантам варьируют от 1.50 до 3.24% от общих запасов почвенного ОВ дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почвы [7]. Очевидно, это является причиной недостаточного внимания к важной роли почвенной микробиоты в динамике ОВ. Между тем для разработки мер, препятствующих

щих развитию потерь ОВ, повсеместно проводятся исследования, направленные на выявление связей между динамикой ОВ почвы и другими микробиологическими показателями в разных почвенно-климатических зонах и типах почв [10–12, 14, 16].

Действие различных биологических факторов и агротехнических приемов на состояние ОВ и плодородие почвы становится очевидным по истечении десятков лет. Поэтому особую ценность представляют исследования, выполненные в длительных полевых стационарах, где на фоне изменения факторов окружающей среды действие изучаемого фактора накапливается во времени.

Цель работы – сравнительная оценка состояния почвенных микробных сообществ и ОВ, сформировавшихся за сорокалетний период при различных типах землепользования в тяжелосуглинистой дерново-подзолистой почве Предуралья.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследования выполнены в условиях длительного стационарного опыта, заложенного в 1977 г. на дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве (Eutric Albic Retisols (Abruptic, Loamic, Cutanic)). Варианты опыта: 1 – чистый пар бессменно; 2 – ячмень бессменно; 3 – озимая рожь бессменно; 4 – зерновой пятипольный севооборот (0% бобовых культур) (ячмень, рожь озимая, пшеница яровая, ячмень, овес); 5 – полевой семипольный севооборот (типичный, 28.6% бобовых культур) (унавоженный чистый пар, рожь озимая, пшеница яровая с подсевом клевера, клевер 1 года пользования (г. п.), клевер 2 г. п., ячмень, овес); 6 – полевой семипольный севооборот (42.9% бобовых культур) (сидеральный пар (клевер 1 г. п.), рожь озимая, пшеница яровая с подсевом клевера, клевер 1 г. п., клевер 2 г. п., ячмень, овес с подсевом клевера); 7 – залежь. Представленные варианты изучали без применения минеральных удобрений и при внесении удобрений в дозе N по 60, P по 30 и K по 60 кг д. в./га. Минеральные удобрения вносили под зерновые культуры, на клевере изучали последствие. В опыте использовали аммиачную селитру или мочевины, хлористый калий, суперфосфат. В паровом поле типичного для Предуралья полевого севооборота вносили подстильный навоз в дозе 40 т/га пашни.

На момент закладки опыта почва имела следующие агрохимические показатели:  $pH_{KCl}$  5.2–5.3, гидролитическая кислотность 2.1–2.3 смоль (экв)/кг, сумма поглощенных оснований 14.0–15.5 смоль (экв)/кг, содержание органического углерода по Тюрину 1.10–1.12%, подвижного фосфора 225–240 мг/кг, подвижного калия 196–204 мг/кг (по Кирсанову). Почвенные образцы для исследований отбирали осенью 2018 г. с двух несмежных повторений в слое 0–20 см.

Для микробиологического анализа из каждого образца брали по две усредненных навески массой 1.0 г. Количество микроорганизмов определяли методом посева из разведений почвенных суспензий на мясо-пептонном (МПА), крахмало-аммиачном (КАА), почвенном (ПА) агаре. Количество колониеобразующих единиц различных групп микроорганизмов пересчитывали на 1 г воздушно-сухой почвы с учетом разведения суспензий в  $10^4$  раз при посеве на МПА и КАА, в  $10^5$  раз – при посеве на ПА. Для характеристики изменений в структуре почвенного микробного сообщества по вариантам рассчитывали коэффициент минерализации (КАА/МПА), отражающий интенсивность мобилизации азота, и коэффициент педотрофности (ПА/МПА), характеризующий развитие в почве автохтонной микрофлоры [6].

При выявлении структурных перестроек микробного сообщества в качестве модельной группы микроорганизмов использовали вырастающие на казеин-глицериновом (КГА) агаре актиномицеты, проводя дифференцированный учет колонии разных морфотипов. Для характеристики структуры комплексов определяли частоту встречаемости и долевое участие представителей отдельных секций и серий рода *Streptomyces* [1].

Морфологические признаки исследовали при помощи светового микроскопа Leica DM 2500 (Carl Zeiss, Германия). Принадлежность выделенных культур актиномицетов к роду *Streptomyces* определяли на основании характерных морфологических признаков: нефрагментированный мицелий, длинные цепочки спор – на воздушном и отсутствие спор – на субстратном мицелии.

Диагностические признаки природных изолятов стрептомицетов изучали на минеральном агаре I, органическом агаре II, глицерин-нитратной, овсяной и пептон-дрожжевой средах в соответствии с ключом Гаузе с соавт. [1].

Таксономическое положение выборочно отобранных штаммов (культуры с различными морфотипами колоний) определяли на основе анализа фрагментов 16S рРНК в НПК “Синтол” (г. Москва). Первичный сравнительный анализ полученных нуклеотидных последовательностей с последовательностями из базы данных GenBank проводили с помощью программы NCBI BLAST (<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/blast>). Парное выравнивание последовательностей осуществляли с помощью программы LALIGN ([https://embnet.vital-it.ch/software/LALIGN\\_form.html](https://embnet.vital-it.ch/software/LALIGN_form.html)).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

За сорокалетний период использования дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почвы в длительном полевом опыте выявлены существен-

**Таблица 1.** Агрохимические свойства дерново-подзолистой почвы

Тип землепользования (фактор А)	Минеральные удобрения (фактор В)	C <sub>орг</sub> , %	C <sub>ГК</sub> /C <sub>ФК</sub>	pH <sub>KCl</sub>	S	Нг	Ca	Mg	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , мг/кг
					смоль(экв)/кг				
Чистый пар бессменно	Без удобрений	0.78	0.55	5.0	21.1	3.1	16.2	3.9	340
Ячмень бессменно		1.01	0.72	5.1	22.5	3.1	18.6	2.0	440
Озимая рожь бессменно		0.95	0.70	5.1	19.8	3.2	18.4	2.7	294
Севооборот									
0% бобовых		1.07	0.72	5.2	20.1	3.2	17.9	3.6	420
28.6% бобовых		1.47	0.76	5.5	21.5	3.0	17.2	3.2	537
42.9% бобовых	1.21	0.78	4.9	21.7	3.5	18.2	2.9	314	
Залежь	НРК	1.36	0.96	4.8	19.8	4.8	17.2	2.8	473
Ячмень бессменно		1.03	0.76	5.0	19.6	3.7	18.2	1.9	679
Озимая рожь бессменно		1.06	0.76	5.1	19.3	3.0	16.3	3.7	321
Севооборот									
0% бобовых		1.12	0.72	5.1	20.0	3.5	17.7	2.9	462
28.6% бобовых		1.56	0.78	5.3	21.0	3.2	17.9	2.7	732
42.9% бобовых	1.25	0.79	5.0	20.5	3.2	19.4	1.2	495	
Главные эффекты	Фактора А	0.06	—	0.1	—	0.3	$F_{\Phi} < F_T$	$F_{\Phi} < F_T$	70
	Фактора В и взаимодействия АВ	$F_{\Phi} < F_T$	—	0.1	—	0.2	1.1	$F_{\Phi} < F_T$	53
Частные различия	I порядка	0.10	—	0.1	—	0.4	4.5	4.6	99
	II порядка	0.07	—	0.1	—	0.5	3.0	4.1	141

ные различия между вариантами с бессменными посевами зерновых культур, севооборотами с различным насыщением бобовыми травами, бессменным чистым паром и залежью. Так, залежная почва по агрохимическим характеристикам (по кислотности почвенного раствора, содержанию углерода и другим параметрам) стала соответствовать целинной [3]. В 2018 г. в ней отмечено характерное для дерново-подзолистых почв Предуралья содержание углерода – 1.36% (табл. 1). Наименьшие в опыте значения коэффициентов минерализации (0.37) и педотрофности (0.28), рассчитанные по данным учета численности прокариот, показывают, что в залежной почве процессы деструкции ОВ протекают гораздо медленнее, чем при других типах землепользования (табл. 2, рис. 1). Исходя из этих результатов, залежь можно охарактеризовать как климаксную экосистему, в которой процессы разложения и синтеза ОВ уравновешены и хорошо сбалансированы.

Минимальный уровень содержания углерода отмечен в бессменном чистом пару – 0.78%. Эта величина на 30% меньше, чем перед закладкой опыта. В условиях отсутствия растительности и связанного с ней поступления свежих растительных остатков, преобладали процессы разложения почвенного ОВ. Состояние микробной системы в

длительно парующей почве типичное для поздних стадий микробных сукцессий: почти в два раза увеличилась численность бактерий, утилизирующих минеральные формы азота, возросло количество олиготрофных бактерий и актиномицетов, участвующих в разложении наиболее трудногидролизующих органических соединений. По сравнению с залежью коэффициент минерализации в бессменном чистом пару выше в 5.3 раза, а коэффициент педотрофности – в 4.6 раза. Это свидетельствует об интенсивных процессах разложения ОВ в пару. Уровень углерода, установившийся за 41 год в бессменном пару, условно принят за минимальное содержание углерода в дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве Предуралья [4].

Бессменное возделывание ячменя и озимой ржи без удобрений и при внесении N60P30K60 способствовало поддержанию агрохимических параметров почвы на уровне, близком к исходному. Пожнивные и корневые остатки, прижизненная корневая экссудация зерновых культур способствовали поддержанию численности микроорганизмов, участвующих в цикле углерода. Но почва в посевах зерновых культур, очевидно, вследствие дефицитного поступления азота, характеризовалась невысокими значениями коэффициентов минера-

**Таблица 2.** Количество микроорганизмов, вырастающих на традиционных средах, в зависимости от способа хозяйственного использования почвы (среднее  $\pm$  стандартное отклонение)

Вариант	Общая численность, тыс./г почвы		
	МПА	КАА	ПА
Чистый пар бессменно	1733 $\pm$ 340	3467 $\pm$ 2721	2250 $\pm$ 989
Ячмень бессменно без удобрений	4358 $\pm$ 860	3142 $\pm$ 807	3983 $\pm$ 2025
НРК	3883 $\pm$ 914	2842 $\pm$ 1124	3900 $\pm$ 1081
Озимая рожь бессменно без удобрений	4800 $\pm$ 604	3892 $\pm$ 1408	6650 $\pm$ 1438
НРК	8300 $\pm$ 5166	5367 $\pm$ 4945	7417 $\pm$ 1459
Севооборот (0% бобовых) без удобрений	6558 $\pm$ 2157	3700 $\pm$ 775	5417 $\pm$ 3032
НРК	4267 $\pm$ 1684	3500 $\pm$ 1341	8650 $\pm$ 1014
Типичный семипольный сево- оборот (28.6% бобовых) навоз	10542 $\pm$ 5851	5050 $\pm$ 1723	8483 $\pm$ 3540
навоз + НРК	5975 $\pm$ 1690	3733 $\pm$ 866	4117 $\pm$ 801
Севооборот (42.9% бобовых) без удобрений	8792 $\pm$ 2716	3333 $\pm$ 2048	5150 $\pm$ 1716
НРК	10592 $\pm$ 1320	3767 $\pm$ 1413	6950 $\pm$ 1858
Залежь	4308 $\pm$ 716	1717 $\pm$ 740	1200 $\pm$ 839

лизации (0.70–0.79) и близкими к единице индексами педотрофности (0.91–1.38).

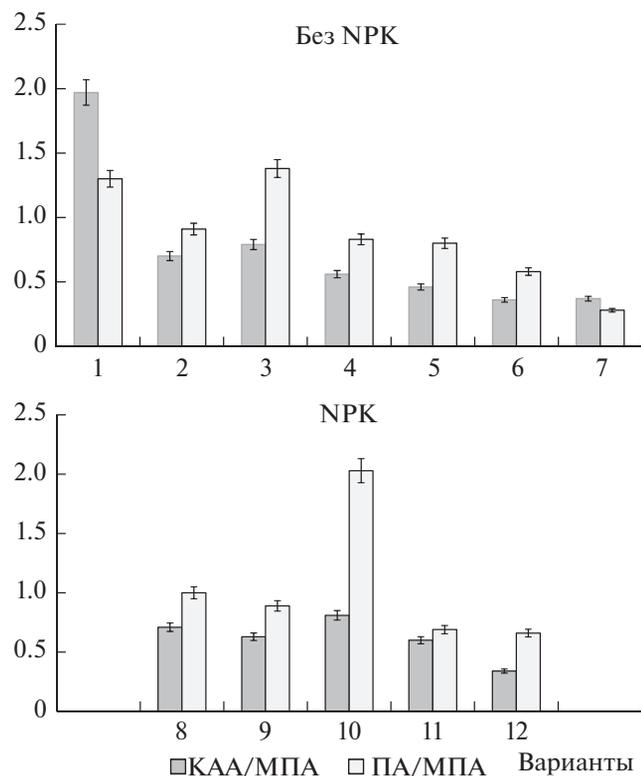
В отличие от яровой культуры (ячменя), бессменное выращивание озимой ржи, даже без удобрений, привело к формированию в почве большего пула микроорганизмов. Вероятно, это связано с тем, что биомасса корневых и пожнивных остатков озимой культуры превосходит такую для яровой культуры. На фоне внесения под озимую рожь минеральных удобрений коэффициенты минерализации (0.63) и педотрофности (0.89) имели более близкие значения, чем в вариантах без удобрений (0.79 и 1.38 соответственно), что говорит об оптимизирующем влиянии минеральных удобрений на процессы трансформации ОВ в посевах озимой ржи.

В севообороте без бобовых трав и минеральных удобрений коэффициенты минерализации и педотрофности по величине были сопоставимы со значениями в вариантах с посевами зерновых культур бессменно. На фоне НРК численность микроорганизмов, вырастающих на МПА и КАА, практически не изменилась, тогда как численность учтенных на ПА бактерий олиготрофного блока, довольствующийся незначительным количеством питательных веществ и завершающий сложный процесс разложения ОВ увеличилась в пределах порядка. В результате индекс педотрофности в этом варианте возрос до максимального в

опыте значения – 2.03, а коэффициент минерализации составил 0.81.

Возделывание сельскохозяйственных культур в севообороте с долей бобовых 42.9% без внесения органических удобрений обеспечило стабилизацию исходного уровня ОВ в почве, не ухудшая ее другие агрохимические свойства. Бобовые травы в севообороте являются центрами формирования бобово-ризобияльного комплекса, который обеспечивает биологическим азотом практически все микробное население почвы. Коэффициенты минерализации в почве севооборотов, включающих 42.9% бобовых (0.34 и 0.36), имели низкие значения, сопоставимые с коэффициентом минерализации залежной почвы (0.37), а в почве севооборотов с меньшим насыщением (28.6%) бобовыми травами увеличивались до 0.46 (при внесении навоза) и до 0.60 (при внесении навоза + НРК). Ведение традиционного севооборота с двумя полями клевера, применением органической и органо-минеральной систем удобрения привело к улучшению комплекса агрохимических параметров дерново-подзолистой почвы. Кислотность почвы изменилась от кислой ( $\text{pH}_{\text{KCl}}$  4.8) до слабокислой ( $\text{pH}_{\text{KCl}}$  5.3–5.4), содержание  $\text{C}_{\text{орг}}$  увеличилось от 1.10 до 1.47–1.56%, фосфора – до 537.5–732.5 мг/кг.

Приведенные результаты показывают, что стабилизация ОВ дерново-подзолистой почвы зависит от типа использования и снижается в ряду: залежь >



**Рис. 1.** Коэффициенты минерализации (КАА/МПА) и педотрофности (ПА/МПА) по вариантам: 1 – чистый пар бессменно; 2, 8 – ячмень бессменно; 3, 9 – озимая рожь бессменно; 4, 10 – зерновой пятипольный севооборот (0% бобовых культур) (ячмень, рожь озимая, пшеница яровая, ячмень, овес); 5, 11 – полевой семипольный севооборот (типичный, 28.6% бобовых культур) (унавоженный чистый пар, рожь озимая, пшеница яровая с подсевом клевера, клевер 1 г. п., клевер 2 г. п., ячмень, овес); 6, 12 – полевой семипольный севооборот (42.9% бобовых культур) (сидеральный пар (клевер 1 г. п.), рожь озимая, пшеница яровая с подсевом клевера, клевер 1 г. п., клевер 2 г. п., ячмень, овес с подсевом клевера); 7 – залежь.

> севообороты (0–28.6–42.9% бобовых) > бессменный посев зерновых > бессменный чистый пар. При сопоставлении полученных в опыте агрохимических данных с результатами микробиологических исследований обнаружена обратная зависимость между содержанием в почве  $C_{орг}$  и коэффициентами минерализации ( $r = -0.67$ ;  $p < 0.01$ ). Отрицательная корреляция выявлена также между соотношением гуминовых и фульвокислот ( $C_{ГК}/C_{ФК}$ ) в составе ОВ почвы и коэффициентами ее педотрофности ( $r = -0.64$ ;  $p < 0.02$ ). Помимо количественных различий в бессменно парующей и возделываемых почвах произошли качественные изменения в составе ОВ: увеличилась его лабильность, о чем свидетельствуют меньшие (0.55–0.79), чем в залежной почве (0.96), соотношения  $C_{ГК}/C_{ФК}$ . Между показателями  $C_{ГК}/C_{ФК}$  и коэффициентами минерализации в почве длительного стационара установ-

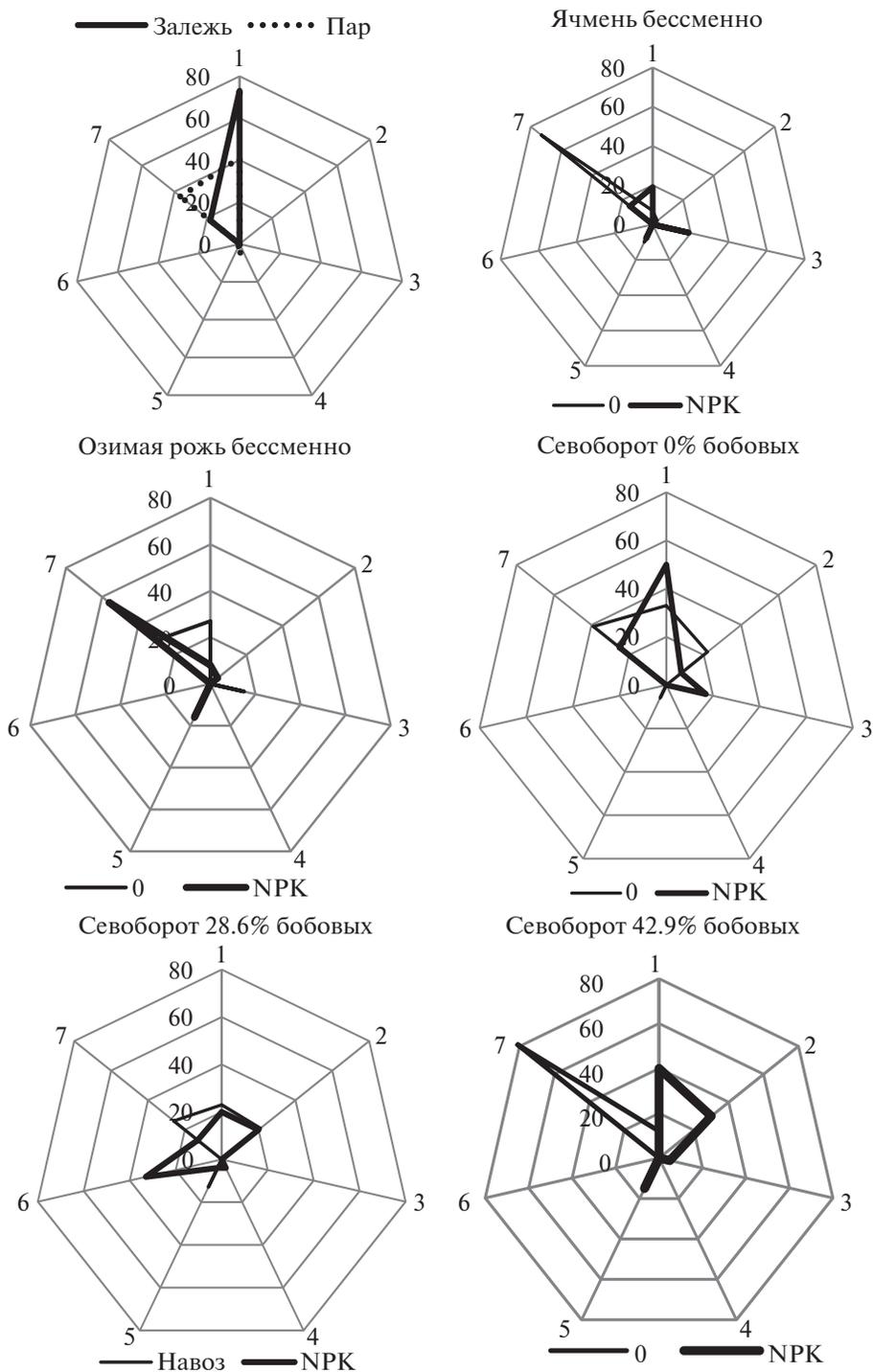
лена наиболее тесная отрицательная корреляция ( $r = -0.81$ ;  $p < 0.001$ ). Таким образом, по соотношению в почве микроорганизмов, вырастающих при посеве на средах с различными источниками азота – минеральными (КАА), органическими (МПА) и теми и другими одновременно, взятыми в минимальных концентрациях (ПА). Были рассчитаны экологические коэффициенты минерализации и педотрофности, величины которых тесно коррелируют с показателями гумусности почвы. Это не только позволяет судить о направленности микробных процессов трансформации ОВ дерново-подзолистой почвы за сорокалетний период ее различного использования, но и прогнозировать дальнейшую динамику содержания ОВ при различных типах землепользования.

Для выявления структурных перестроек микробного сообщества в результате различного использования дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почвы в качестве модельной группы использовали актиномицеты – мицелиальные бактерии, которые играют ключевую роль в поддержании почвенного гомеостаза [15].

Дифференцированный учет в посевах на КГА колоний по морфотипам позволил установить, что во всех вариантах опыта на дерново-подзолистой почве преобладали колонии, микроскопия которых выявила типичные для рода *Streptomyces* морфологические признаки.

Выборочная идентификация выделенных штаммов, основанная на анализе фрагментов гена 16S рРНК, подтвердила, что изоляты с данным морфотипом являются представителями рода *Streptomyces*, семейства Streptomycetaceae, порядка Streptomycetales, класса Actinobacteria. В то же время видовая идентификация стрептомицетов, основанная на анализе гена 16s рРНК, была затруднена из-за высокого сходства нуклеотидных последовательностей данного гена для представителей всех таксонов внутри семейства Streptomycetaceae [8]. Действительно, все нуклеотидные фрагменты, выданные BLAST, для исследуемых штаммов более, чем на 98% соответствовали введенным последовательностям. В связи с этим помимо генетических данных в работе были изучены такие фенотипические признаки изолятов, как цвет воздушного и субстратного мицелия на диагностических средах. Это позволило в образцах почвы из различных вариантов опыта определить частоту встречаемости и долевое участие представителей отдельных цветковых секций и серий.

Анализ структуры комплексов актиномицетов в почвах сравниваемых вариантов показал, что залежную и бессменно парующую почву от других отличает узкий спектр выделяемых таксонов. С высокой частотой встречались виды серии Clnereus Achromogenes и секции Imperfectus, доминирующие в большинстве и других вариантов



**Рис. 2.** Долевое участие (%) в комплексах актиномицетов дерново-подзолистой почвы при разных способах ее использования видов: 1 – *Clnereus Achromogenes*, 2 – *Clnereus Chromogenes*, 3 – *Clnereus Aureus*, 4 – *Clnereus Violaceus*, 5 – *Albus*, 6 – *Helvolus*, 7 – *Imperfectus*.

опыта. В парующей почве отмечены случайные представители *Clnereus Violaceus* и секции *Albus* (рис. 2). В бесменных посевах ячменя и озимой ржи видовой спектр актиномицетов расширился за счет видов из секций и серий *Clnereus Chromo-*

*genes*, *Clnereus Aureus*, *Albus*, выявляемых в различных соотношениях в зависимости от вида культуры (яровая или озимая) и внесения NPK. Сходный видовой состав имели комплексы актиномицетов в вариантах с севооборотами без включения бобовых

трав, отличаясь лишь более значительной долей участия пигментированных видов серии *Clnereus Chromogenes*.

Насыщение севооборота на 28.6% бобовыми травами, при одновременном внесении в почву навоза отдельно и в сочетании с NPK, привело к формированию актиномицетных комплексов, в структуре которых все выявляемые секции и серии были представлены относительно равномерно, без выделения явных доминантов. Актиномицетный комплекс в почве севооборота с увеличенной до 42.9% долей бобовых трав, напротив, характеризовался сильной концентрацией доминирования. В его структуре на долю видов секции *Imperfectus* приходилось более 80% всего актиномицетного разнообразия. Внесение NPK в этом же варианте расширило видовой состав от двух до четырех различных секций и серий, при этом в комплексе произошла элиминация представителей секции *Imperfectus*. Таким образом, различный характер использования дерново-подзолистой почвы нашел отражение в специфической структуре комплекса почвенных актиномицетов по вариантам длительного полевого стационара.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Различным типам землепользования соответствуют различные структуры сообществ почвенных микроорганизмов. Бессменные посевы зерновых культур, севообороты с различным насыщением бобовыми травами, бессменные чистый пар и залежь, внесение минеральных удобрений и навоза сопровождались структурными перестройками в комплексе мицелиальных прокариот, заключавшимися в изменении количества выявляемых секций и серий рода *Streptomyces*, частоте встречаемости отдельных представителей, их долевого участия в комплексе, состава доминантов. Главным фактором, ответственным за выявленные различия в структуре микробных комплексов, является, по-видимому, содержание органического углерода в почве и его качество. Механическая обработка почвы сама по себе и возделывание на ней сельскохозяйственных культур ведут к повышению интенсивности микробных процессов трансформации ОВ, что выразилось в увеличении коэффициентов минерализации и педотрофности почвы. Отказ от земледелия (залежь) привел к сдвигу в структуре микробного сообщества, первичным эффектом которого явилось снижение коэффициентов минерализации и педотрофности. Изменения структуры комплексов актиномицетов, взятых в качестве модельной группы почвенных микроорганизмов, согласуются с показателями численности других почвенных микроорганизмов, учитываемых на традиционных средах, и величинами коэффициентов минерализации и педотрофности по вариантам опыта.

### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гаузе Г.Ф., Преображенская Т.П., Свешникова М.А., Терехова Л.П., Максимова Т.С. Определитель актиномицетов. Роды *Streptomyces*, *Streptoverticillium*, *Chainia*. М.: Наука, 1983. 248 с.
2. Добровольский Г.В., Куст Г.С., Чернов И.Ю., Добровольская Т.Г., Лысак Л.В. и др. Почвы в биосфере и жизни человека. М., 2012. 584 с.
3. Завьялова Н.Е. Органическое вещество дерново-подзолистых почв Предуралья. Пермь, 2014. 328 с.
4. Наумкин В.Н. Биологизация и экологизация земледелия Юго-Запада России // Агро XXI. 2001. № 3. С. 20–21.
5. Семенов В.М., Когут Б.М. Почвенное органическое вещество. М.: ГЕОС, 2015. 233 с.
6. Титова В.И., Козлов А.В. Методы оценки функционирования микробоценоза почвы, участвующего в трансформации органического вещества. Нижний Новгород: Нижегородская с.-х. акад., 2012. 64 с.
7. Ковалевская Н.П., Завьялова Н.Е., Шаравин Д.Ю., Фомин Д.С. Биологическая активность дерново-подзолистой почвы в длительном опыте с различными агротехническими приемами // Российская сельскохозяйственная наука. 2019. № 3. С. 38–41. <https://doi.org/10.31857/S2500-26272019338-41>
8. Labeda D.P., Goodfellow M., Brown R., Ward A.C., Lanoot B., Vannanneyt M., Tamura T. Phylogenetic study of the speCles within the family Streptomycetaceae // Anton. Leeuw. Int. J. G. 2012. V. 1. 101. P. 73–104. <https://doi.org/10.1007/s10482-011-9656-0>
9. Lehmann J., Kleber M. The contentious nature of soil organic matter // Nature. 2015. V. 528. P. 60–68. <https://doi.org/10.1038/nature16069>
10. Manzoni S., Taylor P., Richter A., Porporato A., Ågren G.I. Environmental and stoichiometric controls on microbial carbon-use efficiency in soils // New Phytol. 2012. V. 196. P. 79–91. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2012.04225.x>
11. Martí-Roura M., Hagedorn F., Rovira P., Romanyà J. Effect of land use and carbonates on organic matter stabilization and microbial communities in Mediterranean soils // Geoderma. 2019. V. 351. P. 103–115. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.05.021>
12. Miltner A., Bombach P., Schmidt-Brücken B., Kästner M. SOM genesis: microbial biomass as a significant source // Biogeochemistry. 2012. V. 111. P. 41–55. <https://doi.org/10.1007/s10533-011-9658-z>
13. Schmidt M.W.I., Torn M.S., Abiven S., Dittmar T., Gugenberger G., Janssens I.A., Kleber M., Kögel-Knabner I. et al. Persistence of soil organic matter as an ecosystem property // Nature. 2011. V. 478. № 7367. P. 49–56. <https://doi.org/10.1038/nature10386>
14. Soares M., Rousk J. Microbial growth and carbon use efficiency in soil: Links to fungal-bacteria dominance, SOC-quality and stoichiometry // Soil Biol. Biochem.

2019. V. 131. P. 195–205.  
<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2019.01.010>
15. *Strohl W.R.* Antimicrobials // *Microbial Diversity and Bioprocessing* / Ed. A.T. Bull. Washington DC: American Society for Microbiology, 2004. P. 336–355.
16. *Zornoza C.G., Mataix-Solera J., Scow K.M., Arcenegui V.V., Mataix-Beneyto J.* Changes in soil microbial community structure following the abandonment of agricultural terraces in mountainous areas of Eastern Spain // *Appl. Soil Ecol.* 2009. V. 42 P. 315–323.  
<https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2009.05.011>

## Influence of Different Types of Land Use on the Microbial Communities and Organic Matter Stabilization in Soddy-Podzolic Soil

N. E. Zavyalova<sup>1,\*</sup>, I. G. Shirokikh<sup>2</sup>, M. T. Vasbieva<sup>1</sup>, and D. S. Fomin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Perm Federal Research Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Lobanovo, Perm oblast, 614532 Russia

<sup>2</sup>Rudnitsky Northeast Federal Research Center, Kirov, 610007 Russia

\*e-mail: nezavyalova@gmail.com

In a long-term stationary experiment (1977–2018) on a soddy-podzolic soil (Eutric Albic Retisol (Abruptic, Loamic, Cutanic)) of Perm oblast, the influence of crop rotation with different saturation with legumes and continuous grain crops (winter rye and spring barley) on the structure of microbial communities and preservation of soil organic matter were studied. Permanent black fallow and unmanaged fallow were used as reference standards. Minimum values of the coefficients of mineralization (0.37) and pedotrophicity (0.28) calculated on the basis of direct counting of abundances of microbial colonies cultivated on standard nutrient media (MPA, SAA, and SA) were found in the unmanaged fallow soil, and maximum values of these coefficients (1.97 and 1.30, respectively) were found in the black fallow soil. Inverse relationships were found between the  $C_{org}$  content in the soil and the mineralization coefficient ( $r = -0.67$ ;  $p < 0.01$ ), as well as between the Cha : Cfa ratio and the pedotrophicity coefficient ( $r = -0.64$ ;  $p < 0.02$ ). It was shown that the OM stabilization in soddy-podzolic soil depends on the type of soil use and decreases in the following sequence: unmanaged fallow > crop rotation (0–28.6–42.9% of legumes) > continuous grain crop > permanent black fallow. In the cultivated and black fallow soils, along with a general decrease in the organic matter stock, its lability increased as evidenced by the Cha : Cfa ratios (0.55–0.79), which were lower than in the unmanaged fallow soil (0.96). The closest negative correlation ( $r = -0.81$ ;  $p < 0.001$ ) was observed between the mineralization coefficient and the Cha : Cfa ratio. It was also shown that the different uses of soddy-podzolic soil were accompanied by structural rearrangements of the complex of actinomycetes selected as a model group of soil microorganisms. In particular, regular mechanical tillage and application of mineral fertilizers (N60P30K60) contributed to an increase in the species spectrum of streptomycetes, a change in the frequency of occurrence and relative abundance of individual sections and series, and a change in dominant forms. The results of this study attest to the possibility of using microbiological indicators as biomarkers of the state of soil organic matter.

*Keywords:* mineralization and pedotrophicity coefficients, organic carbon, actinomycetes, species composition, complex structure