

МИКРОБИОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ КАК ПОКАЗАТЕЛЬ АГРОГЕННОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ СОЛОНЦА СРЕДНЕГО КОРМОВЫМИ СЕВОБОРОТАМИ

¹Л.Н. Коробова, доктор биологических наук, профессор

²В.С. Риксен, соискатель, младший научный сотрудник

²Т.Г. Ломова, кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник

¹Новосибирский государственный аграрный университет, Новосибирск, Россия

²Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий РАН, р.п. Краснообск Новосибирской обл., Россия

E-mail: riclog@mail.ru

Ключевые слова: микрофлора почвы, бактерии, биоразнообразие, 16S рРНК, солонец средний, фитомелиорация, донник желтый, кострец безостый.

Реферат. Обширные территории Западной Сибири (около 40 %) засолены. На таких землях в основном выращивают многолетние травы – фитомелиоранты. В статье представлены результаты четырехлетнего изучения растительно-микробных взаимодействий в солонце среднем средненатриевом под кормовыми севооборотами с донником желтым и кострцом безостым. Исследования проведены в Барабинской низменности, где севообороты с применением послышной обработки почвы возделывались на стационаре СибНИИ кормов в течение 33 лет. В шестипольном севообороте с донником в первом поле высевался донник сорта Альшеевский с покровной культурой – суданской травой сорта Новосибирская 84, второе поле было занято донником, третье – овсом сорта Краснообский, после чего все повторялось. В севообороте с кострцом в первом поле высевалось просо Кормовое 45, во втором поле – кострец безостый сорта СибНИИСХоз-189 и просо, далее 4 года рос кострец. В результате обработок почвы и длительного воздействия трав-фитомелиорантов в слое 0–20 см солонца среднего изменилось биоразнообразие бактерий, в 1,9–2,3 раза усилилась нитрификационная активность почвы (в первую очередь, повлиявшая на продуктивность возделываемых в севооборотах трав), и под донником активизировался процесс микробиологического гумусонакопления. С помощью метагеномного анализа 16S рРНК выявлены 4 таксономические группы бактерий (филы), достоверно отличающиеся от целинной почвы. В обоих севооборотах в солонце среднем под влиянием агробиологической мелиорации возросла доля бактерий филы фирмикутов – минерализаторов сложных азотсодержащих веществ и продуцентов стимуляторов роста растений, а также бета- и дельта-протеобактерий, функционально связанных с улучшением почвенного плодородия. Под кострцом достоверно снизилось представительство *Chloroflexi* – индикаторов плотности почвы.

MICROBIOLOGICAL PARAMETERS AS AN INDICATOR OF ACROGENIC TRANSFORMATION OF MEDIUM SOLONETZ BY FORAGE CROP ROTATIONS

¹L.N. Korobova, Doctor of Biological Sciences, Professor

²B.S. Ricksen, Co-applicant, Junior Researcher

²T.G. Lomova, PhD in Agricultural Sciences, Leading Researcher

¹Novosibirsk State Agrarian University, Novosibirsk, Russia

²Siberian Federal Research Center for Agrobiotechnologies, Russian Academy of Sciences, Krasnoobsk, Russia

E-mail: riclog@mail.ru

Keywords: soil microflora, bacteria, biodiversity, 16S rRNA, medium solonetz, phytomelioration, sweet yellow clover, awnless brome.

Abstract. Vast territories of Western Siberia (about 40%) are saline. On such lands, perennial grasses - phytomeliorants are mainly grown. The article presents the results of a four-year study of plant-microbial interactions in medium-sodium solonetz under fodder crop rotations with sweet yellow clover and awnless brome. The studies were conducted in the Baraba lowland, where crop rotations using layer-by-layer tillage were cultivated at the SSRIF (Siberian Scientific Research Institute of Feed) station for 33 years. In a six-field crop rotation with sweet clover in the first field, sweet clover of the Alsheevsky variety was sown with a cover crop – Sudan grass of the Novosibirskaya 84 variety; the second field was occupied by sweet clover; the third field was planted with Krasnoobsk oats. After that, everything was repeated all over again. In the crop rotation with rump, millet

Kormovoe 45 was buried in the first field; in the second field, an awnless brome cultivar of the Siberian Scientific Research Institute of Agriculture -189 and millet were planted. Then the rump grew for four years. As a result of tillage and long-term exposure to phytomeliiorant herbs in the 0–20 cm layer of medium solonetz, the biodiversity of bacteria has changed, the nitrification activity of the soil has increased by 1.9–2.3 times (primarily affecting the productivity of grasses cultivated in crop rotations). Under the sweet clover, the process of microbiological humus accumulation was activated. Using metagenomic analysis of 16S rRNA, four taxonomic groups of bacteria (phyla) were identified, significantly different from the virgin soil. In both crop rotations in the average solonetz, under the influence of agrobiological reclamation, the proportion of bacteria of the phylum firmicutes, mineralises of complex nitrogen-containing substances and producers of plant growth stimulants, as well as beta- and delta-proteobacteria, functionally associated with improving soil fertility, increased. Under the rump, the representation of Chloroflexi, indicators of soil density, significantly decreased.

Солонцовые почвы широко распространены во всем мире. По данным ФАО, их площадь оценивается в 800 млн га [1]. Солонцы характеризуются преобладанием в составе поглощённых оснований катионов натрия и магния. Вследствие этого, а также из-за плохих физических свойств и повышенной щелочности они малопродуктивны [2]. В Барабе с естественных сенокосов на них получают до 5 ц/га сена низкого качества, и такие почвы используют в первую очередь под кормовые угодья [3].

Культивирование подобранных растительных сообществ улучшает физико-химические свойства солонцов [4, 5], активизирует агрономически полезные процессы [6], способствует лучшему воспроизводству почвенного плодородия и повышает устойчивость агроэкосистем.

Среди фитомелиорантов возделываются соле- и солонцеустойчивые сельскохозяйственные культуры и травы, но подбор растений должен учитывать состояние и характеристики конкретных почв. На солонцах отмечена положительная роль бобовых и злаковых фитомелиорантов [7, 8 и др.]. В Барабе наиболее урожайной культурой является донник. Отмечается, что в севооборотах с ним и с многолетними травами хорошо накапливаются корневые остатки, представляющие основу для протекания процесса гумусообразования и способствующие постепенному рассолению солонцов [3].

Индикатором биокосных изменений в почвах является состояние микрофлоры, в агропочвоведении, прежде всего, агрономически полезных физиологических групп. Инструментами их изучения являются классический метод культивирования микроорганизмов на питательных средах и высокопродуктивный метод секвенирования 16S рРНК [9, 10 и др.]. Фитомелиоративные эффекты сеяных растительных травяных сообществ в отношении микроорганизмов почвы изучены мало. Известны работы Л.Н. Пуртовой с соавторами [11, 12], касающиеся агрогенных почв

Приморья, и публикации сибирских ученых, рассматривающие влияние 20-летнего возделывания севооборотов на состояние функциональных групп микроорганизмов в солонцах Барабы [6 и др.]. Современные геномные подходы к изучению микрофлоры в почвах Барабы стали использоваться только в последние три года, и эти работы в основном касаются солонца мелкого [13–15].

Цель данных исследований – выявить, как изменились за 33 года в солонце среднем под влиянием кормовых севооборотов с донником и кострцом биоразнообразие микрофлоры и растительно-микробные эффекты в отношении биологической активности.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования проводились на солонцовом стационаре СибНИИ кормов СФНЦА РАН, который расположен в Барабинской низменности Новосибирской области (координаты: 55,389° с.ш., 78,927° в.д.). Объект исследований – солонец луговой гидроморфный [16], по глубине залегания горизонта В средний, по содержанию обменного натрия в ППК средненатриевый, по структуре столбчатый, в водной вытяжке которого преобладают карбонатные (содовый тип) и сульфатные соли. Изучены варианты: 1) целина; 2) донник второго года жизни (в шестипольном севообороте: донник с покровной культурой суданской травой – донник второго года жизни – овес на зерносеяжке – донник с суданской травой – донник – овес на зерносеяжке); 3) кострец безостый (в шестипольном севообороте: просо – просо и многолетние травы (кострец) – многолетние травы 4 года).

Обработка почвы под севооборотом: после каждой ротации БДТ-3,0 в два следа и ФБН-1,5 в один след на глубину 8–10 см, последующее рыхление на глубину 30–35 см. Почвенные образцы для анализа функциональных групп

микроорганизмов отбирались в первых числах августа (после первого укоса) в 2016, 2018, 2019 и 2020 гг. из слоя 0–20 см (на целине 0–15 см). Погодные условия в годы исследований существенно различались. Так, 2016 г., согласно гидротермическому коэффициенту Селянинова, относился к увлажненным и теплым, 2018 г. – к увлажненным и холодным, 2019 и 2020 гг. были засушливыми и теплыми. Функциональные группы микробов, усваивающих органический и минеральный азот, выделяли на твердых питательных средах МПА и КАА, нитрификаторы и денитрификаторы – на жидких средах Виноградского и Березовой [9].

Используя выявленное обилие бактерий на МПА и КАА, рассчитали коэффициент потенциальной микробиологической трансформации органики в запасы гумуса: $\Pi_m = \frac{(МПА+КАА)}{x(МПА/КАА)}$ и $K_{минерализации} = \frac{КАА}{МПА}$.

Таксономическую принадлежность бактерий выявили в 2020 г. методом высокопроизводительного секвенирования последовательностей участка V3-V4 гена 16S рРНК. Анализ был выполнен в ЦКП «Геномика» ИХБФМ СО РАН (г. Новосибирск). Тотальная ДНК из образцов выделена с помощью набора DNeasy PowerSoil Kit (Qiagen). Пробы секвенировали на приборе MiSeq (Illumina, США), последовательности ОТЕ отнесены к таксонам с помощью SINTAX [17].

Математическая обработка данных проведена с помощью пакетов программ Excel (стандартное отклонение) и Minitab (метод главных компонент). Статистическая значимость различий в представительстве таксонов по вариантам доказана с помощью U-критерия Манна-Уитни.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Солонец средний гидроморфный столбчатый среденатриевый сформировался в Барабе в условиях залегания грунтовых вод на уровне 2–3 м. В его водной вытяжке преобладают карбонатные и сульфатные соли (содово-сульфатный тип засоления), а глубина вскипания карбонатов от HCl составляет 34 см. Солонец имеет тяжелосуглинистый гранулометрический состав и четкую дифференциацию почвенного профиля на генетические горизонты A, B₁, B₂, BC и C. Мощность горизонта A солонца

среднего достигает 16 см, солонцового горизонта B1 – 17 см, а подсолонцового B2 – 19 см.

Горизонты BC и C (идентифицирован до 150 см) характеризуются мощностью 53 и 47 см.

pH водной вытяжки в слоях 0–10, 10–20, 20–30 и 30–40 см составляет 7,6; 7,6; 7,9 и 8,5 соответственно. Гумуса в слое почвы 0–40 см в солонце среднем содержится 6,3 %, но вследствие неблагоприятных физико-химических свойств продуктивность естественных сенокосов и пастбищ здесь низкая: не более 5 ц сена с 1 га [3].

Из всех преобладающих видов солонцов в Барабе (это корковые, мелкие и средние) солонец средний отличается более благоприятными условиями для развития почвенной микрофлоры. Поэтому фитомелиоративное воздействие кормовых севооборотов на численность микроорганизмов, отвечающих за обеспечение растений минеральным азотом, здесь, в отличие от солонца мелкого [14], оказалось в основном умеренно выраженным (рис. 1, в среднем за 4 года). Умеренное положительное воздействие севооборота с донником и слабое – севооборота с кострцом обнаружено для бактерий-аммонификаторов, минерализующих белковые соединения, а также для денитрификаторов, отвечающих за потери газообразного азота из почвы. Сильное агрогенное воздействие севооборотов установлено для группы автотрофных нитрификаторов. Возделывание в севообороте донника увеличивало обилие почвенных аммонийоксилирующих бактерий в 1,9 раза, многолетнего кострца – в 2,3 раза. Это облигатные аэробы, не нуждающиеся в факторах роста органической природы, но зато сильно зависимые от аэрации и влажности почвы. Нитрификация относится к аэробным процессам, в то как денитрификация – к анаэробным. При этом парциальное давление кислорода связано с переувлажнением почвы [18], что не характерно для трансформированного солонца среднего и показательно для целины.

Полученные данные хорошо согласуются с изменением продуктивности кормовых трав на стационаре. Степень связи (близости) урожайности зеленой массы с микробиологическими показателями в слое 0–20 см (в целине 0–15 см), общим содержанием солей и погодными условиями представлена на рис. 2 в виде дендограммы кластерного анализа.

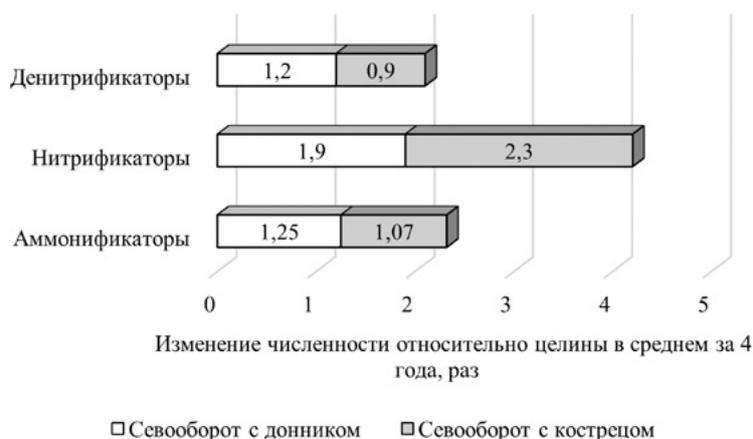


Рис. 1. Изменение численности микроорганизмов круговорота азота в трансформированном фитомелиорацией солонце среднем, слой 0–20 см

Fig. 1. Changes in the number of microorganisms of the nitrogen cycle in the middle solonetz transformed by phytomelioration, layer 0–20 cm

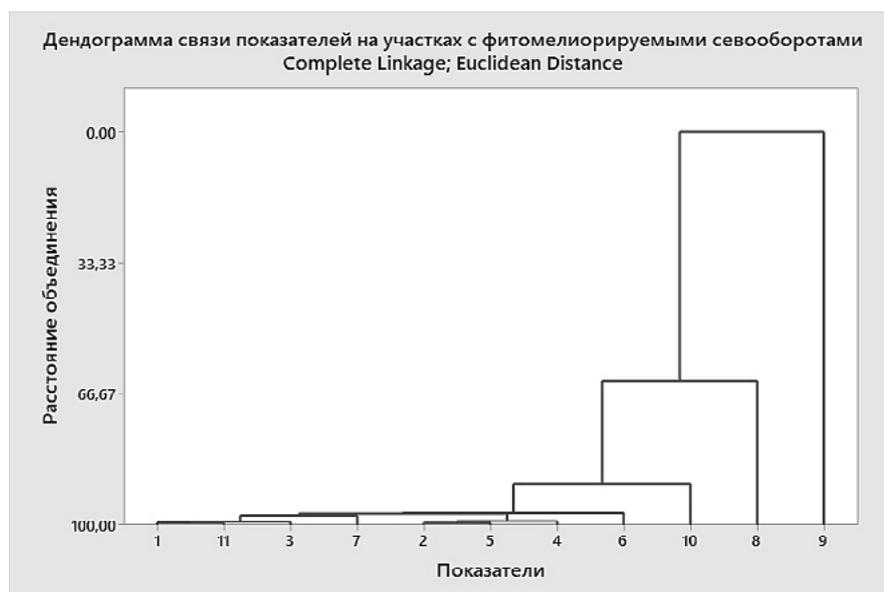


Рис. 2. Дендрограмма связей урожайности зеленой массы с микрофлорой целинного и трансформированного севооборотами солонца среднего, агрометеорологическими условиями и засоленностью почвы:

1 – аммонификаторы; 2 – иммобилизаторы аммонийного азота; 3 – автотрофные нитрификаторы; 4 – суммарная численность эвтрофных бактерий; 5 – олигонитрофилы; 6 – денитрификаторы; 7 – свободноживущие азотфиксаторы; 8 – Ес (электропроводность почвенного раствора); 9 – сумма температур за вегетацию; 10 – сумма осадков за вегетацию; 11 – урожайность зеленой массы

Fig. 2. Dendrogram of the relationship between the yield of green mass and the microflora of virgin and medium solonetz transformed by crop rotation, agrometeorological conditions and soil salinity:

1 – ammonifiers; 2 – ammonium nitrogen immobilisers; 3 – autotrophic nitrifiers; 4 – total number of eutrophic bacteria; 5 – oligonitrophils; 6 – denitrifiers; 7 – free-living nitrogen fixers; 8 – Ec (electrical conductivity of the soil solution); 9 – the sum of temperatures for the growing season; 10 – the amount of precipitation during the growing season; 11 – yield of green mass

Выявлено, что увеличение урожайности трав было тесно связано, прежде всего, с деятельностью почвенной микрофлоры. Сходство, близкое к 100 %, оказалось у растительной биомассы с бактериями – аммонификаторами, нитрификаторами и азотфиксаторами (98,6–99,7 %). При этом первые две группы микроорганизмов объединились с продуктивностью в главную часть первого кластера. Чуть меньшее, но сильное влияние на урожайность оказали микроорганизмы, усваивающие аммонийный азот (иммобилизаторы NH_4 , или амилолитики), суммарная численность эвтрофных микробов, а также обилие группы олигонитрофилов (расстояние объединения у них уменьшилось на 1–1,5 %). Значимым для прироста урожайности было сокращение эмиссии закиси азота в атмосферу, обусловленное деятельностью денитрификаторов. Чуть слабее урожайность была связана с влагообеспеченностью вегетации, на уровне 66,3 % – с засоленностью почвы и слабо с теплообеспеченностью сезона. Таким образом, кластерный анализ, проведенный на основе полученных нами агрономически важных данных, классифицировал микробиологические характеристики трансформированных фитомелиорацией солонцов как главные для

продуктивности растений и формирования почвенного плодородия.

Показателем оптимизации потенциального почвенного плодородия принято считать увеличение запасов органического вещества в почве (гумусообразование), оптимизации эффективного плодородия – скорость минерализации органических остатков. Оба процесса связаны с деятельностью почвенной микрофлоры, а их уровень отражают Π_m – коэффициент потенциальной микробиологической трансформации органики в запасы гумуса и $K_{\text{минерализации}}$ – активность микробного разложения негумифицированных органических веществ (мертвой биомассы растительного, животного и микробного происхождения).

Установлено, что в длительно фитомелиорируемых солонцах скорость микробного разложения органики в сравнении с исходной целинной почвой к августу несколько снижена, а скорость микробиологического гумусообразования повышена (рис. 3). При этом физиолого-биохимические процессы в растениях в кормовых севооборотах идут более синхронно с микробиологической минерализацией, чем в целине, и высвобождающийся минеральный азот реализуется в повышенной урожайности кормовых трав.

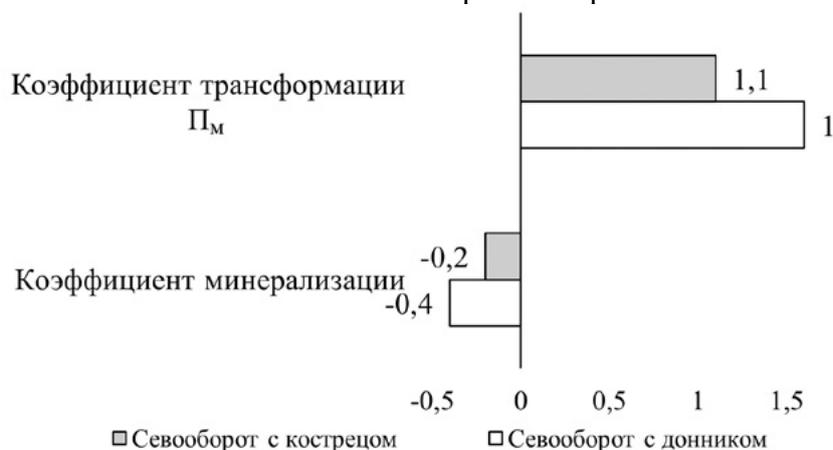


Рис. 3. Активность микробного сообщества солонца среднего на фоне фитомелиорации травами (отклонение от целины в разы, слой 0–20 см)

Fig. 3. Activity of the microbial community of the medium solonetz against the background of phytomelioration by grasses (deviation from virgin soil by several times, layer 0–20 cm)

В дополнение к функциональным отличиям микробного сообщества в агрогенно преобразованном солонце нами было изучено биоразнообразие бактерий и архей и с помощью метагеномного анализа выявлены таксономические группы, достоверно отличающиеся от целинной почвы. Одна из них – фила Proteobacteria, большинство представителей

которой относится к копиотрофам и участвует в почве в разложении легкодоступного органического вещества [19]. У этого типа бактерий обнаружено математически доказанное возрастание представительства под влиянием агрофитомелиорации, особенно с участием донника (таблица).

Представительство фил микроорганизмов солонца среднего, измененных агрофитомелиорацией, %
Representation of microbial phyla of medium solonetz modified by agrophytomelioration, %

Филы бактерий	Целина	Севооборот с донником	Севооборот с кострцом
Proteobacteria	13,80±0,80	18,80±0,60	15,00±0,70
Gemmatimonadetes	4,40±0,50	4,90±0,40	3,40±0,40
Chloroflexi	1,20±0,10	1,08±0,20	0,75±0,20
Firmicutes	0,08±0,02	0,30±0,02	0,50±0,05

Различия фил под севооборотах преимущественно обусловлены изменениями в численности классов бета- и дельта-протеобактерий (рис. 4). Это ризосферные микроорганизмы, от обилия которых значительно зависит успешность прохождения круговорота

веществ. К Betaproteobacteria причисляют сапротрофы и хемолитоавтотрофы, в частности, Nitrosomonadaceae, осуществляющие первую стадию нитрификации, и тионовые бактерии, окисляющие восстановленные соединения серы [20]

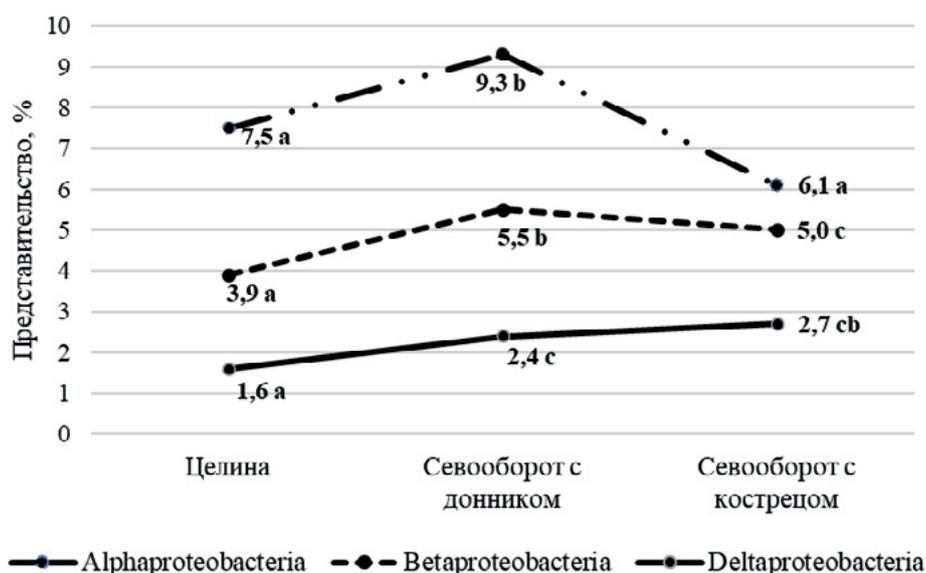


Рис. 4. Процентное представительство классов Proteobacteria в агрогенно трансформированном солонце среднем (разными буквами обозначены средние значения вариантов, существенно различающиеся между собой при $p < 0,05$)

Fig. 4. Percentage representation of Proteobacteria classes in acrogenic transformed medium solonetz (Different letters indicate the mean values of the variants, which differ significantly from each other at $p < 0.05$)

Представители Deltaproteobacteria гидролизуют органические субстраты за счет активного выделения ферментов протеаз и целлюлаз и возвращают минеральный азот и углерод в питание растений. Под севооборотах агрономически важных представителей этого класса выделялось больше в 1,5–1,7 раза, бета-протеобактерий – в 1,3–1,4 раза. Альфа-протеобактерии, связанные с симбиотической азотфиксацией, в фитомелиорируемом солонце были многочисленнее примерно на 20 % только под севооборотом с донником.

Возрастание в фитомелиорируемом солонце выявлено также для бактерий типа

Firmicutes. Это почвенные сапрофиты, включающие семейство бацилл – один из главных минерализаторов азотсодержащих веществ и продуцентов стимуляторов роста растений. Их численность под севооборотом с донником возросла в 3,8 раза, под севооборотом с многолетними травами – в 6,3 раза по сравнению с солонцом целины.

Противоположное изменение относительно целины выявлено в Барабе для бактерий фил Chloroflexi и Gemmatimonadetes, но только под кострцом. Про Chloroflexi известно, что роды этого типа более обильны в уплотненных почвах [21]. Представительство

Gemmatimonadetes в микробном сообществе всегда выше в условиях недостатка влаги [22].

Анализ зависимости между микробными таксонами, приведенными в таблице, и данными химической диагностики целинного и фитомелиорируемого солонца выявил тесную, статистически значимую отрицательную корреляцию ионов Cl⁻ с содержанием Firmicutes ($-0,819$) и Proteobacteria ($-0,765$) и положительную корреляцию средней силы с Chloroflexi ($0,62$). От количества обменного Na⁺ в почве зависели филы Firmicutes и Chloroflexi. Для Firmicutes зависимость была сильной и обратной с $r = -0,913$, для Chloroflexi – сильной и прямой с $r = 0,758$.

На Gemmatimonadetes приведенные химические показатели не повлияли.

ВЫВОДЫ

1. За 33 года возделывания севооборота с донником и севооборота с коострецом на исследуемом солонце среднем произошли существенные изменения в группе автотрофных нитрификаторов. В среднем за 4 года исследований их обилие в сравнении с целиной возросло в 1,9 и 2,3 раза. Для бактерий-аммонификаторов и денитрификаторов изменения в численности были менее выражены.

2. Развитие трех эколого-трофических групп почвенных микробов: аммонификаторов, нитрификаторов и азотфиксаторов – в целом обусловило увеличение урожайности зеленой массы кормовых трав. Степень их связи с продуктивностью кластерный анализ интерпретировал как близкую к 98–99 %. Слабее, на уровне 89 % сходства, урожайность трав была связана с влагообеспеченностью вегетации, на уровне 66,3 % – с засоленностью почвы и слабо связана с теплообеспеченностью сезона.

3. В длительно фитомелиорируемом солонце среднем к августу скорость микробного разложения органики в сравнении с исходной целинной почвой несколько снижена, а скорость микробиологического гумусообразования повышена, особенно под севооборотом с донником.

4. В трансформированной севооборотами почве выявлены 4 таксономические группы бактерий (филы), достоверно отличающиеся от целины. Здесь возросла доля филы фирмикутов-минерализаторов сложных азотсодержащих веществ и продуцентов стимуляторов роста растений. Представителей филы Proteobacteria-класса Deltaproteobacteria выделялось больше в 1,5–1,7, бета-протеобактерий – в 1,3–1,4 раза. Оба класса связаны с улучшением почвенного плодородия. Под коострецом отмечено снижение представительства Chloroflexi – индикаторов плотности почвы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Prokaryotic community assembly after 40 years of soda solonetz restoration by natural grassland and reclaimed farmland* / W. Gao, J. Xu, J. Zhao [et al.] // *European Journal of Soil Biology*. – 2020. – Vol. 100. – P. 103213. – <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2020.103213>.
2. Семендяева Н.В. Свойства солонцов Западной Сибири и теоретические основы химической мелиорации. – Новосибирск: СО РАСХН, 2002. – 160 с.
3. Константинов М.Д., Ломова Т.Г., Кухарь М.А. Фитомелиоративные луговые севообороты на солонцовых почвах Западной Сибири. – Новосибирск: СО РАСХН, 2011. – 104 с.
4. Семендяева Н.В., Ломова Т.Г., Утенков Г.Л. Научное обеспечение сельскохозяйственного освоения солонцовых почв юга Западной Сибири за период с 1969 по 2014 г. // *Вестник НГАУ (Новосибирский государственный аграрный университет)*. – 2015. – № 1. – С. 7–22.
5. Оценка фитомелиоративной эффективности *Kochia scoraria* (L.) Schrad / К.Е. Денисов, П.В. Тарасенко, И.С. Полетаев [и др.] // *Аграрный научный журнал*. – 2019. – № 12. – С. 15–18.
6. Ломова Т.Г., Коробова Л.Н. Фитомелиоративное окультуривание солонцов Барабы и его влияние на биологическую активность почвы // *Сибирский вестник сельскохозяйственной науки*. – 2015. – № 1 (242). – С. 12–18.
7. Курсакова В.С., Трофимов И.Т. Многолетние травы на засоленных почвах и их мелиорация. – Барнаул, 2004. – С. 30–48.
8. *Plant compartment and biogeography affect microbiome composition in cultivated and native Agave species* / D. Coleman-Derr, D. Desgarnes, C. Fonseca-Garcia [et al.] // *New Phytol.* – 2016. – Vol. 209. – P. 798–811. – <https://doi.org/10.1111/nph.13697>.
9. Сэги Й. Методы почвенной микробиологии. – М.: Колос, 1983. – 295 с.

10. *Wellington E. M. H., Berry A., Krsek M.* Resolving functional diversity in relation to microbial community structure in soil: exploiting genomics and stable isotope probing // *Current opinion in microbiology*. – 2003. – Vol. 6, N 3. – P. 295–301. – [https://doi.org/10.1016/S1369-5274\(03\)00066-3](https://doi.org/10.1016/S1369-5274(03)00066-3).
11. *Пуртова Л.Н., Киселева И.В.* Влияние фитомелиорации на показатели плодородия и интегральное отражение агрогенных почв Приморья // *Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук*. – 2019. – № 1 (203). – С. 51–57. – DOI: 10.25808/08697698.2019.203.1.006.
12. *Пуртова Л.Н., Киселева И.В., Щанова Л.Н.* Влияние фитомелиорации на процессы гумусоаккумуляции и микрофлору агрогенных почв Приморья. – Владивосток, 2021. – 109 с.
13. *Riksen V.S., Korobova L.N.* Functional and taxonomic changes in the domain Bacteria in response to phytomelioration of saline soils // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – Dushanbe: IOP Publishing Ltd, 2022. – Vol. 1010. – P. 012046. – DOI: 10.1088/1755-1315/1010/1/012046.
14. *Korobova L.N., Riksen V.S., Lomova T.G.* Biodiversity of shallow solonchaks bacteria, occupied longly with crop rotation with *Bromus inermis* (Poaceae) // *Journal of Agriculture and Environment*. – 2022. – N 2 (22). – <https://doi.org/10.23649/jae.2022.2.22.12>.
15. *Riksen V.S., Korobova L.N.* Biodiversity of the microbiome as an indicator of phytomeliorative soil transformation // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – Dushanbe: IOP Publishing Ltd, 2023. – Vol. 1154 (1). – P. 012017. – DOI: 10.1088/1755-1315/1154/1/012017.
16. *World reference base for soil resources 2006.* IUSS Working Group. – *World Soil Resources Reports*. – Rome, 2006. – N 103. – 145 p.
17. *Edgar R.C.* SINTAX: a simple non-Bayesian taxonomy classifier for 16S and ITS sequences // *Biorxiv*. – 2016. – С. 074161. – <https://doi.org/10.1101/074161>.
18. *Braker G., Conrad R.* Diversity, structure, and size of N₂O-producing microbial communities in soils—what matters for their functioning? // *Advances in applied microbiology*. – 2011. – Vol. 75. – P. 33–70. – <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-387046-9.00002-5>.
19. *Юриенас Д.А., Каширская Н.Н.* Обзор основных таксономических групп микроорганизмов в почвах зонального ряда по данным метагеномного анализа и флуоресцентной гибридизации in situ // *Успехи современной биологии*. – 2022. – Т. 142, № 6. – С. 578–590. – DOI: 10.31857/S0042132422060102.
20. *Negative to positive shifts in diversity effects on soil nitrogen over time / X. Chen, H.Y. Chen, E.B. Searle [et al.]* // *Nature Sustainability*. – 2021. – Vol. 4, N 3. – P. 225–232. – <https://doi.org/10.1038/s41893-020-00641-y>.
21. *Limited resilience of the soil microbiome to mechanical compaction within four growing seasons of agricultural management / M. Longepierre, F. Widmer, T. Keller [et al.]* // *ISME Communications*. – 2021. – Vol. 1, N 1. – P. 44. – <https://doi.org/10.1038/s43705-021-00046-8>.
22. *Global Biogeography and Quantitative Season Dynamics of Gemmatimonadetes in Soil / J. De Bruyn, L. Nixon, M. Fawaz [et al.]* // *Appl Environ. Microbiol.* – 2011. – Vol. 77 (17). – P. 6295–6300. – <https://doi.org/10.1128/AEM.05005-11>.

REFERENCES

1. Gao W., Xu J., Zhao J., Zhang H., Ni Y., Zhao B., Tebbe C., Zhang J., Jia Z., Prokaryotic community assembly after 40 years of soda solonchak restoration by natural grassland and reclaimed farmland, *European Journal of Soil Biology*, 2020, Vol. 100, pp. 103213, <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2020.103213>.
2. Semendyaeva N.V., *Svoistva solontsov Zapadnoi Sibiri i teoreticheskie osnovy khimicheskoi melioratsii* (Properties of solonchaks in Western Siberia and the theoretical foundations of chemical reclamation), Novosibirsk: SO RASKhN, 2002, 160 p.
3. Konstantinov M.D., Lomova T.G., Kukhar' M.A., *Fitomeliorativnye lugovye sevooboroty na solontsovykh pochvakh Zapadnoi Sibiri* (Phytomeliorative meadow crop rotations on solonchak soils of Western Siberia), Novosibirsk: SO RASKhN, 2011, 104 p.
4. Semendyaeva N.V., Lomova T.G., Utenkov G.L., *Vestnik NGAU*, 2015, No. 1, pp. 7–22. (In Russ.)

5. Denisov K.E., Tarasenko P.V., Poletaev I.S., Zuev V.V., *Agrarnyi nauchnyi zhurnal*, 2019, No. 12, pp. 15–18. (In Russ.)
6. Lomova T.G., Korobova L.N., *Sibirskii vestnik sel'skokhozyaistvennoi nauki*, 2015, No. 1 (242), pp. 12–18. (In Russ.)
7. Kursakova V.S., Trofimov I.T., *Mnogoletnie travy na zasolennykh pochvakh i ikh melioratsiya* (Perennial grasses on saline soils and their melioration), Barnaul, 2004, pp. 30–48.
8. Coleman-Derr D., Desgarenes D., Fonseca-Garcia C., Gross S., Clingenpeel S., Woyke T., North G., Visel A., Partida-Martinez L.P., Tringe S.G., Plant compartment and biogeography affect microbiome composition in cultivated and native *Agave* species, *New Phytol.*, 2016, Vol. 209, pp. 798–811.
9. Segi I., *Metody pochvennoi mikrobiologii* (Soil microbiology methods), Moscow: Kolos, 1983, 295 p.
10. Wellington E.M.H., Berry A., Krsek M., Resolving functional diversity in relation to microbial community structure in soil: exploiting genomics and stable isotope probing, *Current opinion in microbiology*, 2003, Vol. 6, No. 3, pp. 295–301, <https://doi.org/10.1111/nph.13697>.
11. Purtova L.N., Kiseleva I.V., *Vestnik Dal'nevostochnogo otdeleniya Rossiiskoi akademii nauk*, 2019, No. 1 (203), pp. 51–57. (In Russ.)
12. Purtova L.N., Kiseleva I.V., Shchapova L.N., *Vliyanie fitomelioratsii na protsessy gumusonakopleniya i mikrofloru agrogennykh pochv Primor'ya* (Influence of Phytomelioration on the Processes of Humus Accumulation and Microflora of Agrogenic Soils in Primorye), Vladivostok, 2021, 109 p.
13. Riksen V.S., Korobova L.N., Functional and taxonomic changes in the domain Bacteria in response to phytomelioration of saline soils, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Dushanbe: IOP Publishing Ltd, 2022, Vol. 1010, pp. 012046, DOI: 10.1088/1755-1315/1010/1/012046.
14. Korobova L.N., Riksen V.S., Lomova T.G., Biodiversity of shallow solonets bacterias, occupied longly with crop rotation with *Bromus inermis* (Poaceae), *Journal of Agriculture and Environment*, 2022, No. 2 (22), <https://doi.org/10.23649/jae.2022.2.22.12>.
15. Riksen V.S., Korobova L.N., Biodiversity of the microbiome as an indicator of phytomeliorative soil transformation, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Dushanbe: IOP Publishing Ltd, 2023, Vol. 1154 (1), pp. 012017, DOI: 10.1088/1755-1315/1154/1/012017.
16. World reference base for soil resources 2006, IUSS Working Group, World Soil Resources Reports, No. 103, Rome, 2006, 145 p.
17. Edgar R.C., SINTAX: a simple non-Bayesian taxonomy classifier for 16S and ITS sequences, *Biorxiv*, 2016, pp. 074161, <https://doi.org/10.1101/074161>.
18. Braker G., Conrad R., Diversity, structure, and size of N₂O-producing microbial communities in soils—what matters for their functioning? *Advances in applied microbiology*, 2011, Vol. 75, pp. 33–70, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-387046-9.00002-5>.
19. Yurshenas D.A., Kashirskaya N.N., *Uspekhi sovremennoi biologii*, 2022, Vol. 142, No. 6, pp. 578–590. (In Russ.)
20. Chen X., Chen H. Y., Searle E.B., Chen C., Reich P.B., Negative to positive shifts in diversity effects on soil nitrogen over time, *Nature Sustainability*, 2021, Vol. 4, No. 3, pp. 225–232, <https://doi.org/10.1038/s41893-020-00641-y>.
21. Longepierre M., Widmer F., Keller T., Weisskopf P., Colombi T., Six J., Hartmann M., Limited resilience of the soil microbiome to mechanical compaction within four growing seasons of agricultural management, *ISME Communications*, 2021, Vol. 1, No. 1, pp. 44, <https://doi.org/10.1038/s43705-021-00046-8>.
22. De Bruyn J., Nixon L., Fawaz M., Johnson M., Radosevich M., Global Biogeography and Quantitative Season Dynamics of Gemmatimonadetes in Soil, *Appl Environ. Microbiol.*, 2011, Vol. 77 (17), pp. 6295–6300, <https://doi.org/10.1128/AEM.05005-11>.