

Влияние севооборота с донником на биологические и физико-химические свойства подсолонцового горизонта солонца мелкого

В. С. РИКСЕН¹, Л. Н. КОРОБОВА², Т. Г. ЛОМОВА¹

¹Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий Российской академии наук, пос. Краснообск, Новосибирский р-н, Новосибирская обл., 630501, Российская Федерация

²Новосибирский государственный аграрный университет, ул. Добролюбова, 160, Новосибирск, 630039, Российская Федерация

Резюме. Донник желтый успешно возделывают на засоленных почвах. Эта культура оказывает фитомелиоративное воздействие на почву. Цель исследования – изучить влияние севооборота с донником на изменение солевого режима и микробиоту солонца мелкого средненатриевого. Работу выполняли в Новосибирской области в 2000, 2010, 2016–2020 гг. в кормовом севообороте солонцового стационара СибНИИ кормов: донник с суданской травой – донник второго года жизни – овес на зерносеяж. В слоях 0...20 и 20...40 см агрофитомелиорированной почвы были определены и сопоставлены со слоями 0...15 и 15...40 см целины содержание солей, pH, биологическая активность и разнообразие бактерий. Их таксономическую принадлежность выявляли анализом генов 16S rPHK, численность микробов круговорота азота определяли на питательных средах. Длительное выращивание трав привело к рассолению солонца. Содержание SO_4^{2-} в составе водной вытяжки в слое почвы 0...20 см снизилось в 1,4 раза, в слое 20...40 см – в 2,7 раза. Содержание обменного натрия уменьшилось по слоям в 5,1 и 4,6 раза до соответственно 4,2 и 8,5 % от ЕКО. Солонец мелкий стал остаточным-натриевым с pH близким к нейтральному в слое 0...20 см и слабощелочным в подсолонцовом горизонте. В слое 20...40 см почвы в 1,7 раза увеличилась численность бактерий – минерализаторов белковых соединений, в 2,9 раза снизилась олиготрофность и в 2,1 раза усилилась потенциальная микробиологическая трансформация растительных остатков в гумус. Почвенный микробиом подсолонцового горизонта стал более разнообразным и выровненным. В нем в 2,6 раза увеличилась численность протеобактерий и веррукомикробий, играющих значительную роль в круговоротах углерода и азота, особенно родов, развивающихся при значениях pH меньше 7,0 и плохо переносящих условия засоления.

Ключевые слова: донник желтый (*Melilotus officinalis*), солонец мелкий, фитомелиорация, микробиологическая активность, 16S rPHK, обменный натрий, солевой состав водной вытяжки.

Сведения об авторах: В. С. Риксен, младший научный сотрудник (e-mail: Riclog@mail.ru); Л. Н. Коробова, доктор биологических наук, профессор; Т. Г. Ломова, кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник.

Для цитирования: Риксен В. С., Коробова Л. Н., Ломова Т. Г. Влияние севооборота с донником на биологические и физико-химические свойства подсолонцового горизонта солонца мелкого // Достижения науки и техники АПК. 2024. Т. 38. № 1. С. 4–9. doi: 10.53859/02352451_2024_38_1_4

The influence of crop rotation with sweet clover on the biological and physicochemical properties of the subsalonetz horizon of fine solonetz

V. S. Riksen¹, L. N. Korobova², T. G. Lomova¹

¹Siberian Federal Research Centre of Agrobiotechnologies of the Russian Academy of Sciences, pos. Krasnoobsk, Novosibirsk r-n, Novosibirskaya obl., 630501, Russian Federation

²Novosibirsk State Agrarian University, ul. Dobrolyubova, 160, Novosibirsk, 630039, Russian Federation

Abstract. Field melilot is successfully cultivated on saline soils. This culture has a phytomeliorative effect on the soil. The purpose of the research is to study the effect of crop rotation with sweet clover on changes in the salt regime and microbiota of fine medium sodium solonetz. The work was carried out in the Novosibirsk region in 2000, 2010, 2016–2020 in the forage crop rotation of the solonetz station Siberian research institute of feed: sweet clover with Sudanese grass – sweet clover of the second year of life – oats for grain haylage. In layers of 0–20 and 20–40 cm of agrophytomeliorated soil, salt content, pH, biological activity and diversity of bacteria were determined and compared with layers of 0–15 and 15–40 cm of virgin soil. Their taxonomic affiliation was determined by analysis of 16S rRNA genes, and the number of nitrogen cycle microbes was determined on nutrient media. Long-term cultivation of herbs led to desalinisation of the solonetz. The content of SO_4^{2-} in the water extract in the soil layer of 0–20 cm decreased by 1.4 times, in the layer of 20–40 cm – by 2.7 times. The content of exchangeable sodium decreased in layers by 5.1 and 4.6 times to 4.2 and 8.5% of the CFU, respectively. The fine solonetz became residual sodium with a pH close to neutral in the 0–20 cm layer and slightly alkaline in the sub-salonetz horizon. In a layer of 20–40 cm of soil, the number of bacteria – mineralizers of protein compounds increased 1.7 times, oligotrophy decreased 2.9 times, and the potential microbiological transformation of plant residues into humus increased 2.1 times. The soil microbiome of the subsalonetz horizon became more diverse and levelled. The number of proteobacteria and verrucomicrobia, which play a significant role in carbon and nitrogen cycles, especially genera that develop at pH values less than 7.0 and do not tolerate salinity conditions, increased 2.6 times.

Keywords: yellow sweet clover (*Melilotus officinalis*); fine solonetz; phytomelioration; microbiological activity; 16S rRNA; exchangeable sodium; salt composition of aqueous extract.

Author Details: V. S. Riksen, junior research fellow (e-mail: Riclog@mail.ru); L. N. Korobova, D. Sc. (Biol.), prof.; T. G. Lomova, Cand. Sc. (Agr.), leading research fellow.

For citation: Riksen VS, Korobova LN, Lomova TG [The influence of crop rotation with sweet clover on the biological and physicochemical properties of the subsalonetz horizon of fine solonetz]. Dostizheniya nauki i tekhniki APK. 2024;38(1):4–9. Russian. doi: 10.53859/02352451_2024_38_1_4

О культивировании солонцов связано с изменением их свойств с использованием фосфогипса (гипса) или длительной фитомелиорации. Эти приемы удаляют натрий из солонца и трансформируют его биологическую составляющую [1, 2]. Длительное использование трав как фитомелиорантов экономически выгоднее, чем внесение фосфогипса. Используют их преимущественно в кормовых фитомелиоративных

севооборотах, где высевает засухо-соле-солонцеустойчивые однолетние и многолетние травы. Сеяные травы извлекают из почвы и концентрируют в корнях и надземной части кальций, что приводит к постепенному рассолению и рассолонцеванию солонца [3], а также изменению активности и направленности микробиологических процессов. Для солонцов Барабинской равнины это показано в основном для слоя 0...20 см [4, 5].

Доказано, что наиболее урожайной культурой в Барабе выступает донник, который на второй год жизни на солонце мелком формирует 2,43...3,88 т/га сена, тогда как наиболее урожайная из люцерн – лишь 1,22...1,51 т/га [1]. Донник имеет глубокую корневую систему, что способствует подкислению солонца не только в верхнем слое, но и в горизонте В2 и может влиять на его биологические свойства.

Цель исследований – изучить изменение численности микроорганизмов, участвующих в почвенных превращениях азота, показателей альфа-разнообразия микробного сообщества в слое 20...40 см солонца мелкого под действием севооборота с донником и сопоставить их с солевым составом трансформированной травами почвы.

Условия, материалы и методы. Работу выполняли в Чановском районе Новосибирской области на солонцовом стационаре СибНИИ кормов с географическими координатами: 55,389° с.ш., 78,927° в.д. Природно-климатическая зона – лесостепь Центрально-Барабинской равнины.

Объектом исследования был солонец луговой гидроморфный, по глубине залегания горизонта В мелкий, средненатриевый (с содержанием обменного натрия в солонцовом и подсолонцовом горизонтах до 25 %), столбчатый с карбонатными и сульфатными солями в водной вытяжке [3]. Изучали солонец мелкий целины и солонец, трансформированный в течение 33-х лет севооборотом с донником. Схема опыта предусматривала изучение следующих вариантов: целина и донник желтый второго года жизни в шестипольном севообороте: суданская трава (покровная культура) с подсевом донника желтого – донник желтый второго года жизни – овес на зерносеяж. Далее чередование культур в севообороте повторялось. Растительность на целине представлена полынно-разнотравной ассоциацией с полынью солончаковатой, морковником, кермеком Гмелина, подорожником солончаковым. Характер растительности за годы существования стационарного опыта не изменился [3].

Опыт заложен СибНИИ кормов в 1987 г. с четырьмя повторениями и рандомизированным размещением варианте. Размер делянок – 200 м². Обработка почвы включала фрезерование на глубину 8...10 см послойно (или дискование тяжелыми боронами) раз за ротацию и безотвальное рыхление орудием со стойками СибИМЭ на глубину 30...35 см.

Почвенные образцы из слоев 0...20 и 20...40 см (на целине 0...15 и 15...40 см) для определения содержания солей, pH и учета микрофлоры отбирали буром в 2016, 2018, 2019 и 2020 гг. в первых числах августа (после первого укоса). Погодные условия в годы исследований существенно различались. Согласно гидротермическому коэффициенту Селянинова, 2016 г. относился к увлажненным и теплым (ГТК = 1,01), 2018 г. – к увлажненным и холодным (ГТК = 1,87), 2019 и 2020 гг. были засушливыми и теплыми (ГТК = 0,74 и 0,65). Для учета численности микроорганизмов из 6 индивидуальных проб с варианта составляли смешанный образец и выделяли аммонификаторов на мясо-пептонном агаре (МПА), бактерии, усваивающие минеральный азот, на крахмало-аммиачном агаре (КАА), нитрификаторов и денитрификаторов на жидких средах Виноградского и Березовой, азотфиксаторов на среде Эшби и олигонитрофилов на голодном агаре (ГА) [6].

Используя численность бактерий на МПА и КАА, рассчитывали коэффициент потенциальной микробиологической трансформации органического вещества в запасы гумуса $\Pi_m = (\text{МПА} + \text{КАА}) \times (\text{МПА} / \text{КАА})$ [7] и коэффициент минерализации ($K_{\text{мин}}$) = КАА / МПА. Используя соотношение численности олигонитрофильных микробов на ГА и эвтрофных на МПА, выявляли коэффициент олиготрофности почвы.

Метагеномный анализ микробиома (и его альфа-разнообразия) выполняли в 2020 г., используя метод высокопроизводительного секвенирования последовательностей участка V3-V4 гена 16S рРНК. Анализ проводили в ЦКП «Геномика» ИХБФМ СО РАН (г. Новосибирск). Тотальную ДНК из образцов выделяли с использованием набора DNeasy PowerSoil Kit (Qiagen) в соответствии с инструкцией производителя. Для механического разрушения образца использовали TissueLyser II (Qiagen) 10 мин при 30 Герц или SuperFastPrep-2 40 сек. на максимальной скорости (MP-Biomedicals). Качество ДНК оценивали посредством электрофореза в 1 %-ном агарозном геле, количество – на Qubit (Life Technologies) и на Nanodrop (Thermo Fisher Scientific). Регион V3-V4 гена 16S рРНК был амплифицирован с использованием праймеров 343F (5'-CTCCTACGGGRRSGCAG-CAG-3') и 806R (5'-GGACTACNVGGGTWTCTAAT-3'), содержащих адаптерные последовательности (Illumina), линкер и баркод (Fadrosh, et al., 2014). Амплификацию проводили в 50 мкл реакционной смеси, содержащей 0,7 U Phusion Hot Start II High-Fidelity и 1 × Phusion GC buffer (Thermo Fisher Scientific), по 0,2 мкМ прямого и обратного праймеров, 10 нг ДНК, 2,3 мМ MgCl₂ (Sigma-Aldrich) и 0,2 мМ dNTP (Life Technologies). Условия термоциклирования: первый шаг – денатурация 98 °C – 1 мин., далее 30 циклов: 98 °C – 15 сек., 62 °C – 15 сек., 72 °C – 15 сек., последний шаг: 72 °C – 10 мин. Ампликоны смешивали по 200 нг каждый и чистили в 1 % агарозном геле с использованием набора MinElute Gel Extraction Kit (Qiagen). Секвенирование проводили на секвенаторе MiSeq (Illumina), используя набор Reagent Kit v3 (2 × 300, Illumina).

Полученные парные последовательности анализировали посредством UPARSE скриптов с использованием Usearch v11.0.667. Биоинформатическая обработка включала перекрывание парных ридов, фильтрацию по качеству и длине, учет одинаковых последовательностей, отбрасывание синглетонов, удаление химер и получение OTU с использованием алгоритма кластеризации UPARSE. Таксономическую принадлежность последовательностей OTU определяли посредством SINTAX с использованием 16S RDP training set v16 в качестве референсной базы. Альфа-разнообразие анализировали Usearch v11.0.667. Подробно используемая методика метагеномного анализа описана [8].

Статистическую обработку данных выполняли в программах Excel (стандартное отклонение для численности таксономических групп и коэффициент вариации для представительства бактериальных филумов) и SNEDECOR (дисперсионный анализ численности микроорганизмов, высеваемых на питательных средах).

Содержание ионов в водной вытяжке (соотношение «почва: вода» 1:5) и величину pH определяли по общепринятым методикам, обменный Na – по ГОСТ 26950-86, Ca и Mg – по ГОСТ 26487-85.

Результаты и обсуждение. Изучаемый солонец сформировался в условиях залегания грунтовых вод на уровне 2...3 м; гранулометрический состав почвообразующих пород преимущественно тяжело-суглинистый и глинистый с повышенным содержанием илистых частиц; глубина вскипания карбонатов от HCl – 41 см.

Солонец мелкий отличается четкой дифференциацией почвенного профиля на генетические горизонты А, В₁, В₂, ВС и С. Верхний гумусово-элювиальный горизонт А (надсолонцовый) имеет мощность 7 см, темную окраску, слабо уплотнен, комковато-зернисто-пылеватый [3]. Содержание гумуса в нем – 7,6 %; валового азота – 0,210...0,864 %; подвижного (по Мачигину) фосфора – 36,7...43,5 мг/кг почвы; калия – 204...216 мг/кг почвы. Солонцовый горизонт В₁ 13 см, буровато-коричневого цвета. Структура его столбчатая, содержание натрия варьирует от 6,6 до 57,38 %. Подсолонцовый горизонт В₂ с мощностью 19 см имеет неоднородный окрас и большое количество водорастворимых солей. Горизонты ВС и С (идентифицирован до 150 см) характеризуются мощностью 55 и 56 см соответственно. Солонец мелкий в природном состоянии характеризуется высокой плотностью сложения до глубины 50 см (от 1,24 см³ в верхнем слое до 1,4...1,5 см³ в последующих слоях).

В составе водной вытяжки исследуемого солонца мелкого преобладают анионы HCO₃⁻ и SO₄²⁻, что указывает на смешанный тип засоления, в катионном составе преобладает общее количество натрия. Карбонаты на целине обнаруживаются с 40 см [1]. Солевой режим солонцов, касающийся водорастворимых солей, связан с изменением погодных условий и их промываемостью в верхней толще почвы. Целинный солонец Барабы в период существования стационара тоже претерпел такие изменения (табл. 1).

В 2000 г. первая половина вегетации отличалась высокой влагообеспеченностью. В мае осадков выпало 295 % от нормы, в июне – 157 %. В результате промывки дождевой водой содержание хлоридов, кальция, натрия в слое 0...40 см солонца оказалось ниже, а магния значительно ниже, чем в засушливом 2020 г. 2010 г. был умеренно влажным с суммой осадков за вегетацию 176 мм (с мая по август) при среднемноголетней норме 169,4 мм. В этот год в целинном солонце было отмечено повышенное содержание магния и сниженное хлоридов и кальция относительно 2000 г.

Что касается концентрации в солонце целины токсичных гидрокарбонат- и карбонат-ионов, то за годы существования стационара в целине происходило их постепенное уменьшение по отношению к исходному 1987 г. (рис. 1). Содержание гидрокарбонатов за 33 года (к 2020 г.) снизилось в 1,6 раза. Концентрация сульфат-ионов в целине по годам варьировала без определенной закономерности.

Сельскохозяйственное использование солонца мелкого для долгосрочного выращивания донника

Таблица 1. Динамика солевого состава водной вытяжки в целинном и трансформированном донниковым севооборотом солонце мелком, мг-экв/100 г

Вариант	Глубина взятия образца, см	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺
2000 г. – начало 3-й ротации							
Целина	0...15	1,05	0,26	1,26	0,48	0,12	2,09
	15...40	2,00	0,46	6,35	0,72	0,32	8,10
Севооборот с донником	0...20	0,97	0,11*	0,41*	0,63	0,32*	0,55*
	20...40	1,16*	0,16*	0,58*	0,45*	0,42	1,05*
2010 г. – окончание 4-й ротации							
Целина	0...15	1,06	0,14	2,82	0,35	0,95	2,72
	15...40	1,40	0,12	6,06	0,50	0,90	7,17
Севооборот с донником	0...20	1,20	0,12	1,41*	0,40	0,40*	2,04*
	20...40	1,04	0,12	2,24*	0,50	0,60*	2,29*
2020 г. – окончание 6-й ротации							
Целина	0...15	0,90	0,51	2,59	0,85	1,55	4,10
	15...40	1,20	0,50	4,00	0,80	1,70	6,60
Севооборот с донником	0...20	0,92	0,46	1,91	0,60	1,00	1,69*
	20...40	0,84	0,48	1,50*	0,70	0,90*	1,22*

* разница между средними значениями варианта с донником и целиной достоверна (p<0,05).

в севообороте повлияло на солесодержание гораздо сильнее, чем природная цикличность погодных условий. Согласно нашему исследованию, влияние севооборота оказалось гораздо сильнее в подсолонцовом горизонте. Так, в слое 0...20 см при изменении влагообеспеченности по годам содержание водорастворимого натрия под севооборотом уменьшалось на 25...74 %, в то время как естественное варьирование Na⁺ в целине составило 34...49 %. В подсолонцовом горизонте (20...40 см) агробиологическая мелиорация снизила концентрацию натрия в почве на 68...87 %, а естественное варьирование этого катиона в целине составило 8...18 %.

Концентрация сульфат-ионов по слоям снижалась аналогичным образом. В слое 0...20 см агрогенно трансформированной почвы на 26...67 %, а в слое 20...40 см на 63...71 %. В целине – соответственно на 8...51 % и 37...48 %.

Изменение содержания гидрокарбонат-ионов под воздействием севооборота с донником относительно целины было незначительным. В обоих слоях целинной и трансформированной почвы оно укладывалось в пределы изменчивости от 1 до 14 % в слое 0...20 см и от 14 до 42 % в слое 20...40 см.

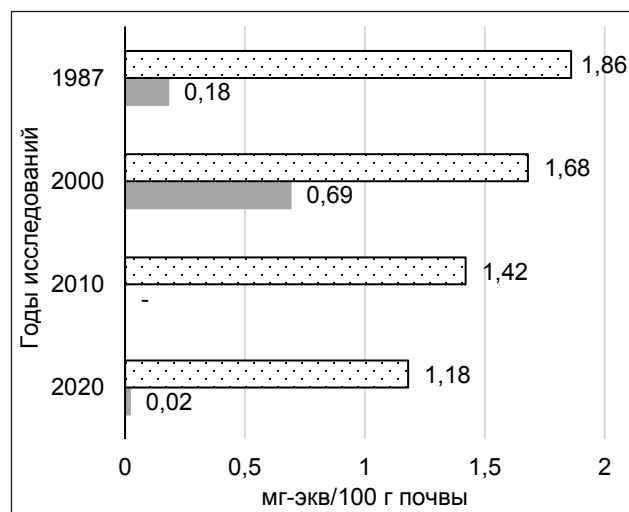


Рис. 1. Изменение содержания гидрокарбонат- и карбонат-ионов в слое 0...40 см целинного солонца мелкого за период существования солонцового стационара: ▨ – HCO₃⁻, ■ – SO₄²⁻.

Таблица 2. Реакция среды (рН), содержание обменного натрия и гумуса в целинном и трансформированном донниковым севооборотом солонце мелком

Вариант	Глубина взятия образца, см	рН	Обменный Na ⁺		Гумус, %
			ммоль-экв/100 г почвы	% от ЕКО	
2000 г.					
Целина	0...15	7,9	3,61	11,56	4,6
	15...40	9,0	9,29	40,79	
Севооборот с донником	0...20	7,1	1,39*	3,56	5,9
	20...40	8,4	2,05*	8,52	
2020 г.					
Целина	0...15	7,9	8,1	24,11	5,1
	15...40	8,5	15,52	30,72	
Севооборот с донником	0...20	7,1*	1,60*	4,18	8,3*
	20...40	7,4*	3,35*	8,47	

* разница между средними значениями варианта с донником и целиной достоверна ($p < 0,05$).

Считается, что уменьшение агрофизиологической солонцеватости связано со снижением высокой щелочности почвы, а агрофизической солонцеватости – с уменьшением поглощенного натрия. Влияние донникового севооборота на оба эти показателя в подсолонцовом горизонте оказалось существенным (табл. 2). Щелочность горизонта в солонце мелком при закладке солонцового стационара в 1987 г. достигала 9,0 ед. рН. Природное варьирование уменьшалось ее незначительно, до 8,5 ед., а агрогенное воздействие за 33 года существования севооборота на

Таблица 3. Влияние кормового севооборота с донником на микроорганизмы, участвующие в превращениях азота в слое солонца мелкого 20...40 см (среднее за 2016, 2018–2020 гг.)

Эколого-трофическая группа	Целина	Севооборот с донником
Аммонификаторы (усваивающие органический азот), млн КОЕ в 1 г абс. сух. почвы	12,3	21,2*
Бактерии, усваивающие минеральный азот, млн КОЕ в 1 г абс. сух. почвы	41,5	42,2
Азотфиксаторы, % обрастания комочков почвы	25,9	29,1
Нитрификаторы, тыс. в 1 г абс. сух. почвы	0,1	0,2
Денитрификаторы, млн в 1 г абс. сух. почвы	16,5	13,9

*разница между средними значениями варианта с донником и целиной достоверна ($p = 0,05$).

1,5 единицы, то есть до 7,4 ед. В другом, изученном нами слое, 0...15 см уровень рН солонца мелкого в 1987 г. характеризовался значением 7,9 (и оно сохранилось в целине и через 33 года). Агрогенное воздействие кормового севооборота снизило уровень рН в слое 0...20 см на 0,8 ед., до 7,1.

Вовлечение солонца мелкого в сельскохозяйственный оборот привело к значительному снижению содержания Na^+ в ППК. В слое 0...15 см целины обменного натрия в годы исследования содержалось 3,61...8,1 ммоль-экв/100 г почвы. От емкости катионного обмена (ЕКО) это составляло 11,6...24,1 % (в Барабе ЕКО характеризуется как высокая и достигает 33...50 ммоль-экв/100 г почвы [9]). В агрогеннотрансформированном солонце концентрация обменного натрия упала до 1,4...1,6 ммоль-экв/100 г почвы.

В нижнем изученном слое (подсолонцовом горизонте) целины содержание обменного натрия варьировало от 9,3 до 15,5 ммоль-экв, или 30,7 и 40,8 % от ЕКО. После влияния кормового севооборота оно уменьшилось до 2,1...3,4 ммоль-экв (8,5 % от ЕКО).

Изменение рН и солевого режима в солонце мелком под воздействием севооборота с донником привело к развитию специфичного прокариотического сообщества с функциональными свойствами

ми и биоразнообразием, характерными для малозасоленных почв. В подсолонцовом горизонте суммарная численность 6 изученных групп микроорганизмов под севооборотом с донником увеличилась до 275,2 млн КОЕ против 217,7 млн в целине (средние данные за 4 года исследований). В преобразованном солонце в 1,7 раза, в сравнении с целиной, повысилось обилие аммонификаторов (табл. 3) и усилилась

трансформация растительных остатков в гумус, что характеризует коэффициент микробиологической трансформации органического вещества P_m (рис. 2). Согласно подсчетам, предложенным В. Д. Мухой [7], потенциальное гумусонакопление, отражаемое P_m , в почве этого варианта в 2,1 раза превосходило целину. Это подтверждается определенным по Тюрину содержанием органического вещества почвы. Оно выросло за 20 лет в слое 0...40 см солонца под кормовым севооборотом с 5,9 % до 8,3 % (на 2,4 %), в то время как в солонце целины это произошло только на 0,5 % (см. рис. 1). Потенциальному гумусонакоплению способствовало то, что донник имеет очень глубокую корневую систему и оставляет на глубине 20...40 см большую массу растительных остатков.

В целине замедление микробной трансформации органических остатков в гумусовые соединения почвы сопровождалось усилением альтерна-

тивного процесса: разложения органических веществ, что отражает коэффициент минерализации (см. рис. 2). В целинном солонце разложение шло в 3,5 раза активнее, чем под культурами севооборота. Коэффициент олиготрофности, как индикатор-

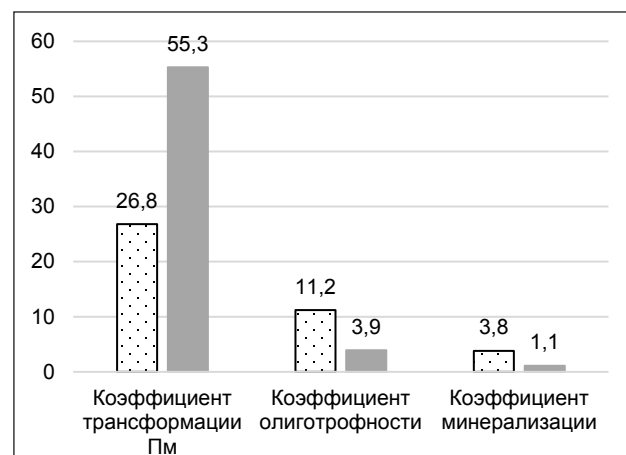


Рис. 2. Активность микробиологических процессов в круговороте азота в слое 20...40 см солонца мелкого на фоне фитомелиорации (среднее за 2016, 2018–2020 гг.): ▨ – целина, ■ – севооборот с донником.

ный показатель малого количества азота в почве, под кормовым севооборотом оказался меньше, чем в целине в 2,9 раза. Все это свидетельствует о повышении плодородия трансформированной донниковым севооборотом солонцевой почвы.

33-летняя фитомелиорация солонца кормовым севооборотом с донником изменила также биоразнообразие почвенных бактерий. Это проявилось в увеличении разнообразия мелких таксонов, начиная с порядков – Order (табл. 4). Так, разнообразие микроорганизмов под донником представляли 92 порядка (в целине – 84), 154 семейства (против 138 в целине), 238 родов бактерий и архей (в целине – 194) и 1839 OTUS (против 991 в целине).

В наиболее крупном таксоне (филумы=типы) максимальное представительство в подсолонцовом

Таблица 4. Таксономическое представительство в микробиомах целинного солонца мелкого и фитомелиорированного севооборотом с донником (2020 г.)

Таксон	Целина	Севооборот с донником
OTUS	991±50	1839±92
Genus	194±10	238±12
Family	138±7	154±8
Order	84±4	92±5
Class	55±3	54±3
Phylum	23±1	22±1

горизонте как в целине, так и под севооборотом было у 10 групп. Это *Acidobacteria*, *Proteobacteria*, *Actinobacteria*, бактерии, выделенные как *unc_Bacteria*, *Verrucomicrobia*, *Gemmatimonadetes*, *Bacteroidetes*, *Chloroflexi*, *Armatimonadetes*, *CandidatedivisionWPS-2*. Но доминанты и содоминанты в сообществах оказались разными (табл. 5). В целине в слое 15...40 см самым распространенным филумом был *Actinobacteria* (44,5 % видов сообщества). На 2 месте находились ацидобактерии с долевым присутствием 25,2 %, 3 место занимали *unc_Bacteria* – 12,1 % сообщества. В подсолонцовом горизонте почвы под донниковым севооборотом тройку лидеров возглавила фила *Proteobacteria*, представители которой связаны с улучшением почвенного плодородия. Бактериальное сообщество здесь меньше варьировало, чем в целине, что иллюстрируют коэффициент вариации и индексы α -разнообразия. Индекс Бергера-Паркера, показывающий степень доминирования, в измененном солонце для бактерий уменьшился в 2,3 раза; индекс Chao 1, характеризующий общее количество

Таблица 5. Характеристика микробиома подсолонцового горизонта солонцов мелкого целинного и измененного донниковым севооборотом (2020 г.)

Показатель	Целина	Севооборот
Представительство доминирующих филумов, %		
Acidobacteria	25,2	19,8
Proteobacteria	9,4	24,9
Actinobacteria	44,5	24,7
unc_Bacteria	12,1	13,3
Verrucomicrobia	0,7	5,8
Gemmatimonadetes	4,2	6,1
Bacteroidetes	1,2	1,3
Others	2,7	4,1
Коэффициент вариации микробиома	1,1	0,7
Индексы разнообразия		
Бергера-Паркера	0,070±0,003	0,030±0,004
Chao1	1271,6±89,3	2500,0±135,7
Шеннона	7,5±0,2	8,4±0,3

таксонов в сообществе, стал больше в 2 раза, а индекс Шеннона, описывающий одновременно богатство и выравненность бактериального сообщества, увеличился на 10,7 %.

На основании этого можно считать, что микробное сообщество подсолонцового горизонта под влиянием севооборота стало сложнее, чем изучаемого горизонта целины.

Индикторами агрогенных изменений под донником кроме почвенных протеобактерий, возросших в трансформированном слое 20...40 см относительно целины в 2,6 раза, стала численность веррукомикробий, увеличившихся в 8,3 раза, и актинобактерий, доля которых, наоборот, сократилась в 1,8 раза. Среди последних сильнее всего (снижением численности более чем на порядок) отреагировали на изменение почвенных условий *Thermomonosporaceae* и *Streptomyces*. В литературе описано, что актинобактерии в большинстве своем предпочитают слабощелочную реакцию среды [10], в то время как доминирующие среди веррукомикробий *Spartobacteria*, наоборот, развиваются при меньшем pH [11] и имеют выраженную непереносимость солей [12]. Протеобактерии играют значительную роль в накоплении азота в почве и в связывании углерода [13]. Поэтому, основываясь на характеристике микробиома, без дополнительных химических анализов, можно считать, что длительное выращивание кормовых трав улучшило азотный обмен в подсолонцовом горизонте солонца мелкого Барабы и снизило величину pH и уровень засоления.

Н. В. Елизаров с соавторами [1], изучая химические свойства солонца мелкого Барабы под севооборотом с донником и кострцом безостым на том же стационаре, сделали вывод, что применение агробиологического метода обусловило их приближение в слое 0...40 см к значениям зональной лугово-черноземной слабосо-лонцеватой почвы.

Положительные изменения в микробиологической активности, связанные со снижением содержания в солонце мелком Барабы обменного натрия и анионов SO_4^{2-} и HCO_3^- , и выращивание кормовых трав способствовали существенному повышению почвенного плодородия. Это выразилось в накоплении нитратного азота в слое 0...40 см трансформированного солонца мелкого (с 10,1 до 16,6 мг/кг почвы) и в увеличении продуктивности культур в севообороте. Отзывчивость растений на эти изменения проявилась в многократно возросшем сборе сена с 1 га фитомелиорированной почвы. Сбор составил в годы исследования 1,92...2,07 т/га (при уровне влажности 17 %), в то время как на целинном участке солонца мелкого лишь 0,03...0,04 т/га.

Выводы. Длительное выращивание кормовых трав на солонце лугово-гидроморфном Барабы привело к его рассолению. Содержание SO_4^{2-} в составе водной вытяжки в слое почвы 0...20 см снизилось в 1,4 раза, в слое 20...40 см – в 2,7 раза. Количество обменного натрия уменьшилось соответственно в 5,1 и 4,6 раза до 4,2 и 8,5 % от ЕКО. Солонец мелкий, трансформированный агрофитомелиоративным воздействием, стал остаточнo-натриевым.

Величина pH в верхнем слое агроизмененного солонца приблизилась к нейтральной, в подсолонцовом горизонте через 33 года агрофитомелиорации стала соответствовать слабощелочной.

В результате трансформации физико-химических свойств в подсолонцовом горизонте солонца мелкого произошли существенные изменения его биологических свойств. Возросла численность бактерий-аммонификаторов, олиготрофность почвы (индикаторный показатель малого количества азота) снизилась в 2,9 раза, в сравнении с целиной, усилилась потенциальная микробиологическая трансформация растительных остатков в гумус.

Почвенный микробиом подсолонцового горизонта под влиянием севооборота с донником стал более раз-

нообразным и выровненным. В нем в 2,6 раза и более увеличилась численность протеобактерий и веррукомикробий, играющих значительную роль в круговоротах углерода и азота, особенно родов, развивающихся при значениях pH меньше 7,0 и плохо переносящих условия засоления.

Выявленные изменения в биологических свойствах и физико-химических характеристиках солонца мелкого под влиянием 5 ротаций севооборота с донником сопровождались накоплением в почве нитратного азота и многократным увеличением сбора сена.

Литература

1. Действие агробиологической мелиорации на солевой профиль солонцов Восточной Барабы / Н. В. Елизаров, Т. Г. Ломова, М. Т. Устинов и др. // Вестник НГАУ (Новосибирский государственный аграрный университет). 2019. № 1 (50). С. 18–25. doi: 10.31677/2072-6724-2019-50-1-18-25.
2. Длительность действия химической мелиорации на свойства солонцов Барабинской равнины: монография / Н. В. Семендяева, Н. В. Елизаров, Л. П. Галеева и др.; под общ. ред. Н. В. Семендяевой. Новосибирск: Золотой колос, 2017. С. 34.
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. 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.
5. Коробова Л. Н., Риксен В. С., Ломова Т. Г. Микробиологические параметры как показатель агрогенной трансформации солонца среднего кормовыми севооборотами // Вестник НГАУ (Новосибирский государственный аграрный университет). 2023. № 2 (67). С. 51–59. doi: 10.31677/2072-6724-2023-67-2-51-59.
6. Сзэи И. Методы почвенной микробиологии. М.: Колос, 1983. 295 с.
7. Муха В. Д. О показателях, отражающих интенсивность и направленность почвенных процессов. Харьков: Харьковский СХИ, 1980. Т. 273. С. 13–16.
8. Undisturbed soil pedon under birch forest: Characterization of microbiome in genetic horizons / N. B. Naumova, I. P. Belanov, T. Y. Alikina, et al. // Soil Systems. 2021. Vol. 5. No. 1. P. 1–17. URL: <https://www.mdpi.com/2571-8789/5/1/14> (дата обращения: 12.11.2023). doi: 10.3390/soilsystems5010014.
9. Insights on the effects of heat pretreatment, pH, and calcium salts on isolation of rare Actinobacteria from karstic caves / B. Z. Fang, N. Salam, M. X. Han, et al. // Frontiers in Microbiology. 2017. Vol. 8. Article 1535. URL: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmicb.2017.01535/full> (дата обращения: 12.11.2023). doi: 10.3389/fmicb.2017.01535.
10. Verrucomicrobial elevational distribution was strongly influenced by soil pH and carbon/nitrogen ratio / C. Shen, Y. Ge, T. Yang, et al. // Journal of Soils and Sediments. 2017. Vol. 17. P. 2449–2456. doi: 10.1007/s11368-017-1680-x.
11. Do biofilm communities respond to the chemical signatures of fracking? A test involving streams in North-central Arkansas / W. H. Johnson, M. R. Douglas, J. A. Lewis, et al. // BMC microbiology. 2017. Vol. 17. P. 1–12. URL: <https://bmcmicrobiol.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12866-017-0926-5> (дата обращения: 12.11.2023). doi: 10.1186/s12866-017-0926-5.
12. Successional trajectory of bacterial communities in soil are shaped by plant-driven changes during secondary succession / M. Krishna, S. Gupta, M. Delgado-Baquerizo, et al. // Scientific reports. 2020. No. 10. P. 1–10. URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-020-66638-x> (дата обращения: 12.11.2023). doi: 10.1038/s41598-020-66638-x.

References

1. Elizarov NV, Lomova TG, Ustinov MT, et al. [The effect of agrobiological reclamation on the salt profile of solonchets of Eastern Baraba]. Vestnik NGAU. 2019;(1):18-25. Russian. doi: 10.31677/2072-6724-2019-50-1-18-25.
2. Semendyaeva NV, Elizarov NV, Galeeva LP, et al. Dlitel'nost' deistviya khimicheskoi melioratsii na svoistva solontsov Barabinskoi ravniny [The duration of the effect of chemical reclamation on the properties of solonchets of the Baraba Plain]. Novosibirsk (Russia): Zolotoy Kolos; 2017. P. 34. Russian.
3. Konstantinov MD, Lomova TG, Kukhar' MA. Fitomeliiorativnye lugovye sevooboroty na solontsovykh pochvakh Zapadnoi Sibiri [Phytomeliiorative meadow crop rotations on solonchets soils of Western Siberia]. Novosibirsk (Russia): SO RASKhN; 2011. 104 p. Russian.
4. Lomova TG, Korobova LN. [Phytomeliiorative cultivation of Baraba solonchets and its influence on the biological activity of the soil]. Sibirskij vestnik sel'skhozajstvennoj nauki. 2015;(1):12-8. Russian.
5. Korobova LN, Riksen VS, Lomova TG. [Microbiological parameters as an indicator of agrogenic transformation of medium solonchets by forage crop rotations]. Vestnik NGAU. 2023;(2):51-9. Russian. doi: 10.31677/2072-6724-2023-67-2-51-59.
6. Segi J. Metody pochvennoi mikrobiologii [Methods of soil microbiology]. Moscow: Kolos; 1983. 295 p. Russian.
7. Mukha VD. O pokazatelyakh, otrazhayushchikh intensivnost' i napravlennost' pochvennykh protsessov [On indicators reflecting the intensity and direction of soil processes]. Khar'kov (Ukraine): Har'kovskij SKhI; 1980. vol. 273, p. 13-6. Russian.
8. Naumova NB, Belanov IP, Alikina TY, et al. Undisturbed soil pedon under birch forest: Characterization of microbiome in genetic horizons. Soil Systems [Internet]. 2021 [cited 2023 Nov 12];5(1):1-17. Available from: <https://www.mdpi.com/2571-8789/5/1/14>. doi: 10.3390/soilsystems5010014.
9. Fang BZ, Salam N, Han MX, et al. Insights on the effects of heat pretreatment, pH, and calcium salts on isolation of rare Actinobacteria from karstic caves. Frontiers in Microbiology [Internet]. 2017 [cited 2023 Nov 12];8: Article 1535. Available from: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmicb.2017.01535/full>. doi: 10.3389/fmicb.2017.01535.
10. Shen C, Ge Y, Yang T, et al. Verrucomicrobial elevational distribution was strongly influenced by soil pH and carbon/nitrogen ratio. Journal of Soils and Sediments. 2017;17:2449-56. doi: 10.1007/s11368-017-1680-x.
11. Johnson WH, Douglas MR, Lewis JA, et al. Do biofilm communities respond to the chemical signatures of fracking? A test involving streams in North-central Arkansas. BMC microbiology [Internet]. 2017 [cited 2023 Nov 12];17:1-12. Available from: <https://bmcmicrobiol.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12866-017-0926-5>. doi: 10.1186/s12866-017-0926-5.
12. Krishna M, Gupta S, Delgado-Baquerizo M, et al. Successional trajectory of bacterial communities in soil are shaped by plant-driven changes during secondary succession. Scientific reports [Internet]. 2020 [cited 2023 Nov 12];10:1-10. Available from: <https://www.nature.com/articles/s41598-020-66638-x>. doi: 10.1038/s41598-020-66638-x.