

РИКСЕН ВЕРА СЕРГЕЕВНА

**АГРОГЕННАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ МИКРОБИОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
ФИТОМЕЛИОРИРОВАННЫХ СОЛОНЦОВ БАРАБЫ**

Специальность 4.1.3. – Агрохимия, агропочвоведение, защита и
карантин растений

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата сельскохозяйственных наук

Работа выполнена на кафедре почвоведения, агрохимии и земледелия федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Новосибирский государственный аграрный университет» (НГАУ) в 2016 и 2018-2020 гг.

Научный руководитель:

Коробова Лариса Николаевна

доктор биологических наук, с.н.с., профессор кафедры почвоведения, агрохимии и земледелия Института фундаментальных и прикладных агробиотехнологий ФГБОУ ВО Новосибирский ГАУ.

Официальные оппоненты:

Якутин Михаил Владимирович

доктор биологических наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории биогеоценологии ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН.

Шулико Наталья Николаевна кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник лаборатории микробиологии ФГБУН «Омский аграрный научный центр».

Ведущая организация:

ФГБНУ ФИЦ «Почвенный институт им. В.В. Докучаева».

Защита диссертации состоится «02» июля 2024 года в 10:00 час. на заседании диссертационного совета 35.2.025.02, созданного на базе ФГБОУ ВО Новосибирский ГАУ по адресу: 630039, г. Новосибирск, ул. Добролюбова, 160, зал заседания ученого совета, тел. (383) 267-05-10, e-mail: d_sovet@nsau.edu.ru

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО Новосибирский НГАУ и на сайте <http://www.nsau.edu.ru>.

Автореферат разослан «_____» _____ 2024 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

Т. В. Гаврилец

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы обусловлена обширностью территории Западной Сибири, занятой солонцами и их комплексами. В Барабинской равнине они представляют до 50 % земельного фонда. Продуктивность растений в таких условиях ограничивают щелочная реакция среды, накопление солей, большая плотность и малая водопроницаемость почвы (Семендяева, 2002). Поэтому полноценное сельскохозяйственное использование солонцов связано с гипсованием (что затратно) или мелиорацией кормовыми травами (Константинов, 2000; Курсакова, Трофимов, 2004; Семендяева, Добротворская, 2005 и др.). На солонцах Барабы в кормовых севооборотах возделывают солотолерантные кострец безостый и донник желтый. Фитомелиорация оптимизирует физико-химические свойства солонцов, увеличивает содержание органического вещества и дает возможность получать прибыль в животноводстве.

Сведений об изменении pH и солевого состава солонцов при таком использовании в литературе к настоящему времени накоплено достаточно, но крайне мало изучено функционирование микробиоты. Благодаря микробиологической деятельности в почве накапливается органическое вещество, растения снабжаются азотом и другими элементами питания (Мишустин, 1972; Звягинцев, 1995; Ding et al., 2019; и др). Микроорганизмы отнесены к основным показателям здоровья почвы и как индикаторы почвенных условий быстро реагируют на долгосрочное возделывание кормовых трав (Ломова, Коробова, 2015; Семенов и др., 2019; Leff et al., 2015; Wu et al., 2020 и др.).

Цель исследования – изучение влияния длительных кормовых севооборотов и последующего залужения злаково-бобовой травосмесью на микробиомы солонцов черноземно-луговых Барабы и установление связи выявленных изменений с физико-химическими характеристиками почвы и урожайностью сена.

Задачи исследования

1. Изучить влияние длительных кормовых севооборотов с донником и кострцом на изменение солевого состава и величины pH солонцов черноземно-луговых мелких и средних.
2. Определить отличия в биоразнообразии и активности микробных сообществ фитомелиорированных и природных солонцов, установить индикаторы солевого состава, щелочного pH, влажности почвы.
3. Оценить влияние постсевооборотного залужения солонцов на их физико-химические и биологические свойства.
4. Установить корреляционные зависимости между микробиологическими показателями и физико-химическими свойствами преобразованных фитомелиорацией солонцов и их связь с урожайностью трав.

Положения, выносимые на защиту

1. Длительное использование солонцов черноземно-луговых в севооборотах с донником и кострцом улучшает их физико-химические и биологические свойства, снижая величину pH, содержание натрия, олиготрофность по азоту, усложняя сообщество микроорганизмов и усиливая микробиологическое гумусонакопление.
2. Постсевооборотное залужение солонцов люцерно-кострецовой травосмесью приводит к постепенному повышению степени засоления почвы и упрощению структуры микробиома.
3. Индикаторами изменения солевого состава и величины pH в прокариотном сообществе солонцов являются бактерии *Gp1*, *Gp7*, *Gp3* и *Blastocatellia* из филума *Acidobacteria* и солотолерантный род *Gaiella* из класса *Thermoleophilia*. Солечувствительные *Spartobacteria* могут быть дополнительным экологическим индикатором повышения степени засоления почвы.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Тематика диссертации соответствует направлению Агропочвоведение и областям исследований: 2.9. ...Агропочвенная зоология, микробиология и метагеномика; 2.10. Агроэкологическое значение органического и минерального вещества почв при сельскохозяйственном использовании; 2.11. Агрохимические и экологические основы управления почвенным плодородием и оптимизации его параметров; 2.16. Исследование микробиологических процессов в почвах и механизмов взаимодействия микроорганизмов с растениями.

Научная новизна работы. Впервые изучен тренд солевого состава (обменного и водорастворимого натрия, гидрокарбонат- и сульфат ионов, ЕС), величины pH и микробиологических процессов в агрогенно преобразованных кормовыми севооборотами с донником и кострцом солонцах черноземно-луговых мелком и среднем.

Впервые проведен метагеномный анализ прокариотных сообществ фитомелиорированных солонцов и выявлены их отличия от целины в представительстве протеобактерий, связанных с улучшением почвенного плодородия, родов *Acidobacteria Gp1*, *Gp7*, *Gp3*, связанных с регуляцией pH, *Gemmatimonadetes* как индикатора сухости, а также солеустойчивых и солечувствительных бактерий. Впервые изучены микробиологические свойства и микробиом солонцов черноземно-луговых после их постсевооборотного залужения люцерно-кострецовой травосмесью и отмечена роль залужения в накоплении солей в почве. Установлены корреляционные связи агрономически важной микрофлоры и микробных индикаторов засоления с физико-химическими свойствами фитомелиорированных солонцов и урожайностью кормовых трав, как интегральным показателем плодородия почв.

Теоретическая и практическая значимость работы. Результаты работы позволяют расширить знания в области агропочвоведения азональных почв и определить практические перспективы использования мелиоративных кормовых севооборотов для радикального улучшения солонцов.

Проведенные исследования пополняют объем знаний о биоразнообразии и микробиологической активности солонцов Барабы. Они расширяют понимание роли агрофитомелиорации, а также донника и кострца как фитомелиорантов в преобразовании засоленных почв, особенно в свете экономического предпочтения перед дорогостоящей химической мелиорацией. Данные о залуженных солонцах дают новые знания о продолжительности постмелиоративных изменений при отсутствии механической обработки почвы.

Работа актуальна для возврата в сельскохозяйственное использование залежных солонцов (или вторично засоленных почв) и важна для оптимизации сельскохозяйственного использования солонцов в Новосибирской области. Результаты исследований могут быть использованы в учебном процессе для всех 3 циклов высшего образования по направлениям подготовки Агрономия и Агрохимия и агропочвоведение.

Методология и методы диссертационного исследования. Методология основана на анализе отечественной и зарубежной научной литературы. Программа и методика исследований включала проведение полевых наблюдений, дополненных лабораторными экспериментами, статистическую обработку данных, анализ и интерпретацию полученных результатов. При изучении физико-химических характеристик и микрофлоры солонцов использовались общепринятые и современные методы, в том числе метагеномное секвенирование 16S рРНК.

Апробация работы. Диссертационная работа выполнена в рамках научного проекта № 20-34-90096 «Биоразнообразие солонцов, трансформированных длительной фитомелиорацией» при финансовой поддержке РФФИ. Основные положения диссертации доложены на международных (Иркутск, 2021; Барнаул, 2022; Новосибирск, 2022; Курск, 2023), всероссийской (Новосибирск, 2022), и региональной (Новосибирск, 2021) научно-практических конференциях, а также представлены в 2020-2023 гг. методической комиссии агрономического факультета и ученому совету ФГБОУ ВО Новосибирский ГАУ.

Публикации. Основные положения диссертации опубликованы в 16 научных работах, в том числе 7 работ в журналах, рекомендованных ВАК РФ, и 3 в изданиях, входящих в международную базу Scopus.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения, выводов, рекомендаций производству, списка литературы из 165 наименований, в том числе 59 иностранных работ. Работа изложена на 147 страницах машинописного текста, содержит 30 рисунков, 43 таблицы.

Личный вклад соискателя. Вклад автора в получение и обобщение результатов составляет 75-85 %. Автор принимал участие в анализе литературных источников по теме диссертационного исследования, постановке цели и задач исследования, проведении

экспериментов, статистической обработке, анализе и систематизации полученных результатов, обобщении данных и формулировании выводов, а также в написании научных статей.

Благодарности. Соискатель выражает искреннюю благодарность научному руководителю – доктору биол. наук Л.Н. Коробовой за консультации и всестороннюю поддержку на всех этапах исследований и подготовки диссертации и кандидату с.-х. наук Т.Г. Ломовой за предоставленную возможность проведения полевых исследований на солонцовом стационаре и помощь в сопоставлении полученных результатов с содержанием в почве водорастворимых солей, гумуса, величиной pH и урожайностью кормовых трав.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Состояние изученности вопроса

В главе представлен анализ литературных сведений по физико-химическим и биологическим свойствам солонцов. Показаны особенности генезиса, состава солей, микробиологических характеристик солонцов Барабы, современные подходы к анализу микробиома, а также возможности фитомелиорации как приема улучшения свойств засоленных почв и повышения урожайности кормовых трав.

Глава 2. Условия, объекты и методы исследований

Исследования проводили в Барабинской равнине на стационаре СФНЦА РАН (СибНИИКормов) в Чановском районе Новосибирской области в 2016 г. и с 2018 по 2020 гг. Географические координаты стационара: 55,389° с.ш., 78,927° в.д. Лабораторные анализы выполняли в Новосибирском ГАУ.

Объекты исследований – солонцы черноземно-луговые мелкие и средние средненатриевые столбчатые с содово-сульфатным типом засоления и их микрофлора. Изучаемые солонцы гидроморфные, уровень залегания грунтовых вод колеблется от 410 см до 200–300 см, гранулометрический состав тяжелосуглинистый. Вскипание карбонатов от HCl у солонцов мелких наблюдается с глубины 41 см, у средних с 34 см. Почвообразующими породами являются палево-светло-бурые опесчаненные карбонатные незасоленные средние суглинки, в которых преобладает фракция мелкого песка и очень низкое содержание пылеватых фракций (Елизаров, Ломова и др., 2019). Мощность гумусово-элювиального горизонта А в солонце мелком до 10 см, в солонце среднем до 16 см (ЗапСибГипрозем, 1980; Реестр, 2009). Содержание гумуса в надсолонцовых горизонтах в год закладки стационара составляло 5,8 % и 6,5 %. Мощность солонцового горизонта В₁ в солонце мелком 13–14 см, в солонце среднем около 17 см, подсолонцового горизонта В₂ 21 и 19 см. Горизонты ВС и С (идентифицирован до 150 см) в солонце мелком имеют мощность 55 и 56 см, в солонце среднем 53 и 45 см.

В 1987 г. на солонцах были заложены севообороты, два из которых изучались в данной работе: - севооборот № 2: суданская трава (покровная культура) с подсевом донника желтого – донник второго года жизни – овес на зерносеяж; далее чередование культур повторяется; - севооборот № 7: просо – просо с подсевом костреца безостого – костреца в течение 4 лет.

Размещение вариантов в севооборотах рандомизированное, площадь делянок 200 м², повторность 4-х кратная. В период ротации почва обрабатывалась ПН-4-35 со стойками СибИМЭ на глубину 20–25 см, после ротации на глубину 30–35 см. На участках с многолетними травами применялись БДТ-3,0 в 2 следа и ФБН-1,5 в 1 след на глубину 8–10 см с последующим рыхлением ПН-4-35 со стойками СибИМЭ. Для закрытия влаги использовались бороны БЗТС-1,0. Посев костреца весной боронили БИГ-3,0 в 2 следа, посев донника 2-го года жизни – в 2–3 следа.

Через 20 лет после открытия стационара часть севооборотной площади была залужена травосмесью костреца безостого и люцерны синегибридной. К первому году наших исследований (2016 г.) травосмесь росла на участках 9 лет, у севооборотов шел конец 5 ротации. В 2018–2020 году срок залужения составил 11–13 лет, у севооборотов началась 6 ротация.

На солонцах изучены варианты: 1) целина; 2) донник второго года жизни (поле 2 в севообороте № 2); 3) костреца безостый 4-го года жизни в севообороте № 7; 4) залужение после

севооборота с донником – участок 1; 5) залужение после севооборота с кострцом – участок 2.

Почвенные образцы из слоев 0-20 и 20-40 см (на целине 0-15 и 15-40 см) для определения содержания солей, величины pH и учета микрофлоры отбирали в первых числах августа (после 1 укоса). Отбор проводили буром на нечетных повторениях по диагональной трансекте, после чего из 10 отобранных проб с варианта делали смешанный образец почвы. Для классических микробиологических и физико-химических исследований составляли 1 образец, для метагеномного анализа в 2020 г. четыре.

Показатели, изученные на стационаре:

- 1) физико-химические: ЕС (кондуктометрическим методом), содержание в водной вытяжке 6 ионов (по Аринушкиной), обменные катионы (ГОСТ 26487-85 и 26950-86), величина pH (потенциометрическим методом), гумус (ГОСТ 26213-91);
- 2) 7 эколого-трофических групп микроорганизмов (посев на питательные среды);
- 3) микробиом бактерий: таксономическая структура, обилие таксонов, α -разнообразие, индикаторные группы (метагеномный анализ);
- 4) урожайность сена.

Аммонификаторов выделяли 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, олиготрофилов на голодном агаре (ГА) (Сэги, 1983). Повторность посева 1 образца – трехкратная. Рассчитывали коэффициенты: 1) потенциальной микробиологической трансформации органического вещества в запасы гумуса $P_m = (МПА + КАА) \times (МПА / КАА)$ (Муха, 1980), 2) $K_{минерализации} = КАА / МПА$, 3) $K_{олиготрофности} = ГА / МПА$.

Таксономическую принадлежность бактерий выявляли на базе ИХБФМ РАН в ЦКП «Геномика» (г. Новосибирск) методом высокопроизводительного секвенирования последовательностей участка V3–V4 гена 16S рНК. Тотальная ДНК выделялась с помощью набора DNeasy PowerSoil Kit (Qiagen). Для механического разрушения образца использовался TissueLyser II (Qiagen) 10 мин при 30 Гц. Качество ДНК оценивалось с помощью электрофореза в 1%-м агарозном геле, количество ДНК – на Qubit (Life Technologies) и на Nanodrop (Thermo Fisher Scientific). Участок V3–V4 гена 16S рНК амплифицировался с помощью праймеров 343F (5'-CTCCTACGGRRSGCAGCAG-3') и 806R (5'-GGACTACN VGGGTWCTAAT-3'), содержащих адаптерные последовательности (Illumina), линкер и баркод. Таксономическая принадлежность последовательностей OTU определялась с помощью SINTAX с использованием 16S RDP training set v16 в качестве референсной базы.

Статистическая обработка данных выполнялась в программах Excel, STATISTICA 10 (стандартное отклонение для численности групп, индексов разнообразия и представительства таксонов), Minitab (кластерный анализ) и SNEDECOR (дисперсионный анализ урожайности сена и микроорганизмов на питательных средах). Значимость различий в представительстве отдельных таксонов доказывалась с помощью U-критерия Манна-Уитни. Анализ методом главных компонент (PCA) проводился с помощью scikit-learn в python3; α -разнообразие бактерий анализировали Usearch v11.0.667.

Силу парных корреляций между параметрами солевого состава, микробиологическими показателями и урожайностью сена оценивали по шкале Чеддока.

Глава 3. Фитомелиоративное влияние длительных кормовых севооборотов на микробиологическое состояние солонца черноземно-лугового мелкого

3.1. Физико-химические свойства агроизмененной почвы

На солонцах урожайность растений лимитируется высоким содержанием обменного натрия и токсичных солей и высокой щелочностью почвенного раствора. Использование фитомелиоративных севооборотов на солонце мелком в течение 30-33-х лет привело к значительному изменению этих показателей, особенно в подсолонцовом горизонте (табл. 1).

Величина ЕС (характеризующая общее содержание солей в почве) уменьшилась в слоях 0-20 и 20-40 см севооборота с донником относительно целины в 8,4 и в 8,5 раз, севооборота с

кострцом в 6,4 и 9,8 раз. Концентрация сульфат ионов по слоям в годы исследований – на 26-67 и 35-95 %. Количество водорастворимого натрия в слоях почвы снижалось под севооборотами на 25-75 % и 58-87 %, в целине из-за изменения глубины залегания грунтовых вод и количества атмосферных осадков на 34-49 и 8-18 %. Содержание гидрокарбонат-ионов под воздействием севооборотов менялось незначительно, за исключением 2020 года в севообороте с кострцом.

Таблица 1 – Величина рН, ЕС и содержание обменного натрия и солей водной вытяжки в целинном и трансформированном кормовыми севооборотами солонце мелком (2018-2020 г.)

Вариант	Глубина взятия образца, см	рН	Обменный Na^+		ЕС, мкСм/ см	Соли водной вытяжки, мг-экв/100 г почвы		
			ммоль/100 г почвы	% от ЕКО		HCO_3^-	SO_4^{2-}	Na^+
Целина	0-15	7,9	8,1	24,1	868,1	0,9	2,6	4,1
	15-40	8,5	15,5	30,7	1103,5	1,2	4,0	6,6
Севооборот с донником	0-20	7,1	1,6*	4,2	103,6*	0,9	1,9	1,7*
	20-40	7,4*	3,4*	8,5	112,4*	0,8	1,5*	1,2*
Севооборот с кострцом	0-20	7,3	0,9*	2,7	101,7*	0,4*	1,3*	1,1*
	20-40	7,6	2,5*	5,6	172,7*	0,8	2,7*	2,8*

* – Разница между средними значениями опытных вариантов и целиной достоверна ($p < 0,05$).

Количество обменного натрия в результате фитомелиоративного действия севооборотов снизилось относительно целины в верхнем слое на 6,5-7,2 ммоль/ 100 г почвы или 19,9-21,4 % от ЕКО, в нижнем слое на 12,1-13 ммоль или на 22,2-25,1 % от ЕКО. Такие изменения связаны со способностью донника и кострца концентрировать в фитомассе кальций, который при разложении растительных остатков возвращается в почву. Кальций вытесняет из почвенно-поглощающего комплекса натрий и способствует улучшению физико-химических свойств солонцов (Новикова, 1973; Константинов, 2000 и др.). По содержанию обменного натрия фитомелиорированный солонец мелкий к шестой ротации севооборотов перешел в слое 0-20 см в остаточно-натриевый, в слое 20-40 см в мало и остаточно-натриевый.

Агрогенное воздействие кормовых севооборотов снизило величину рН солонца мелкого и увеличило гумусированность. Величина рН изменилась в слое 0-20 см на 0,6-0,8 ед. (до слабощелочной реакции), в слое 20-40 см на 1,5 единицы. Содержание гумуса в слое 0-20 см в период с 2000 по 2020 гг. увеличилось под обоими севооборотами на 1,2 %, в целине на 0,1 %. За первые 3 ротации севооборотов (с 1987 по 2005 гг.) на стационаре оно возросло на 13,6-16,1 % (Кашеваров, Данилов, 2006).

Таким образом, за 33 года использования фитомелиоративных севооборотов физико-химические свойства солонца мелкого существенно изменились. Тип засоления солонца черноземно-лугового мелкого остался смешанным, а степень засоления уменьшилась. Солонец черноземно-луговой мелкий средnezасоленный под севооборотами трансформировался в слабозасоленную почву с остаточным содержанием натрия.

3.2. Биоразнообразие бактерий и его связь с физико-химическими свойствами почвы

Одновременно использование кормовых севооборотов изменило в солонце мелком число геномных последовательностей (ОТЕ) и видовое разнообразие бактерий и архей. Это проявилось сильнее под севооборотом с донником, где число видов относительно целины увеличилось в слое 0-20 см в 1,5 раза, в слое 20-40 см в 2 раза. Под севооборотом с кострцом видов стало больше на 30 %. Совокупный материал 16S рПНК (ОТЕ) в среднем по слоям был представлен под кострцом на уровне целины – 20739 / 0,5 г почвы, под севооборотом с донником возрос на 2474.

Чувствительными к снижению величины pH и содержания солей в почве были 5 филумов (типов) бактерий: *Acidobacteria*, *Proteobacteria*, *Actinobacteria*, *Verrucomicrobia* и *Gemmatimonadetes*. Под донником доля ацидобактерий возросла до 30,3 %, и они стали основным доминирующим типом (рис. 1), сократилась в 2,2 и 1,8 раза (по слоям) доля актинобактерий, что связано с уменьшением биомассы трудно разлагаемых остатков, увеличилась численность почвенных протеобактерий, отвечающих за улучшение азотного обмена, особенно в слое 20-40 см (на 164,9%). Многочисленнее в 2 и 8,3 раз стали *Verrucomicrobia* – тип, сильно реагирующий на увеличение органического вещества почвы.

Похожие изменения отмечены в микробиоме солонца мелкого, трансформированного кострецовым севооборотом. Вследствие влияния самой культуры и обработки почвы здесь, вероятно, частично иссушился верхний слой солонца, о чем свидетельствует возросшая на 41,4 % численность гемматимонадет (DeBruyn et al., 2011).

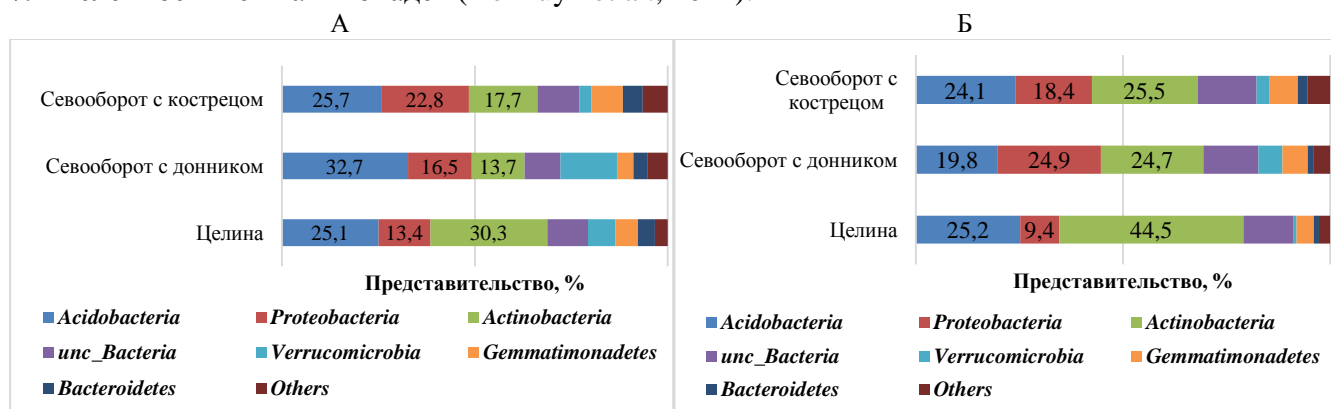


Рисунок 1 – Состав доминирующих филумов в микробиоме целинного и мелиорированного севооборотами солонца мелкого Барабы

Примечание. А - слой почвы 0-15 см для целины и 0-20 см для севооборотов, Б - 15-40 и 20-40 см.

В доминирующем филуме *Acidobacteria* положительно отреагировали численностью на снижение величины pH и содержания солей роды *Gp1*, *Gp3*, *Gp7* (рис. 2), в *Verrucomicrobia* – род *Spartobacteria genera incertae sedis*. Совокупно *Gp1+Gp3+Gp7* возросли под донником в верхнем слое почвы в 2,8 раза, в нижнем в 9,8 раз, под кострецом в 3,8 и 8,3 раз. Род *Spartobacteria* увеличил представительство в подсолонцовом горизонте севооборотов в 10,4 и 6,2 раза. Среди актинобактерий на изменение почвенных условий отреагировал снижением численности в 1,9 и 2,2 раза класс *Thermoleophilia* (включающий солелюбивый род *Gaiella*).

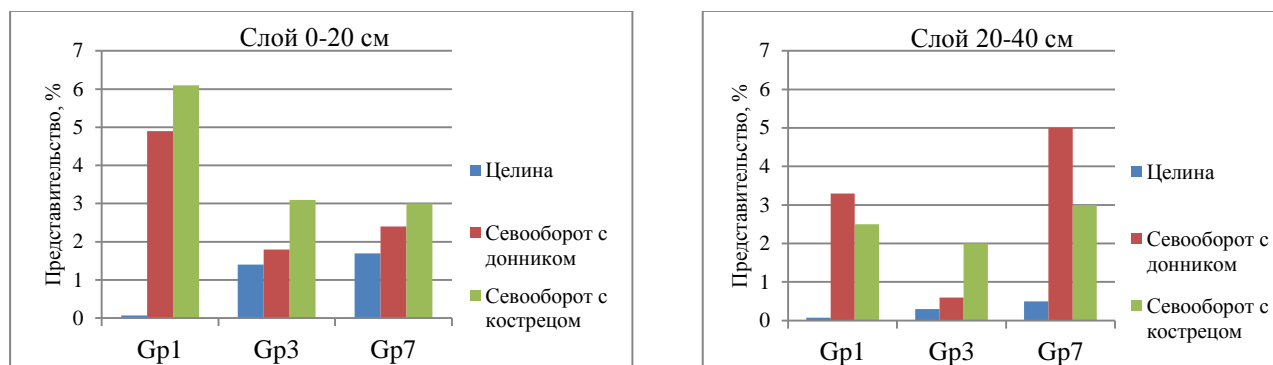


Рисунок 2 – Влияние севооборотов с травами на роды класса *Acidobacteria* в солонце мелком с известной способностью отражать изменения величины pH

В сообществе почвенных бактерий под севооборотами изменились показатели α -разнообразия (табл. 2). Здесь в сравнении с целинным солонцом снизился индекс Бергера-Паркера, отражающий степень доминирования (в 1,3 и 2,3 раза в слоях почвы), возрос индекс Chao1, характеризующий богатство таксонов в сообществе (в 1,5 и 1,9 раза под донником и в 1,2

и 1,5 раз под кострецом) и на 9% и 17% увеличился индекс Шеннона, описывающий наряду с видовым богатством выравненность сообщества. На основании этого можно считать, что сообщество прокариот, сформированное в солонце мелком длительным возделыванием фитомелиорантов, стало сложнее, чем в целинном солонце мелком.

Таблица 2 – Характеристика бактериального сообщества фитомелиорированного севооборотами солонца мелкого через индексы разнообразия

Индексы разнообразия	Слой почвы, см	Целина**	Севооборот с донником	Севооборот с кострецом
Индекс Бергера - Паркера	0-20	0,04	0,03	0,03
	20-40	0,07	0,03*	0,03*
Индекс Chao1	0-20	2360,4	3600,2*	2734,8
	20-40	1271,6	2500,0*	1874,5*
Индекс Шеннона	0-20	5,8	6,3*	6,3*
	20-40	7,5	8,4*	8,8*

* – Разница между средними значениями опытных вариантов и целиной достоверна

** – В целине образцы отбирались из слоев 0-15 и 15-40 см.

3.3. Численность и функциональная активность микрофлоры круговорота азота

Традиционно в классических микробиологических исследованиях об изменениях в агропочвах судят по численности и функциональной активности агрономически полезных микроорганизмов. Итогом длительной фитомелиорации солонца мелкого Барабы стало повышение относительно целины КОЕ копиотрофных бактерий (живущих в богатых питанием средах) и автотрофных нитрификаторов. Аммонификаторов стало больше в севообороте с донником в 1,7 раза в слое почвы 20-40 см, в севообороте с кострецом в верхнем слое. Численность нитрификаторов под донником увеличилась по слоям в 3 и 2 раза, под кострецом в 2 и 1,3 раз. В модельном опыте, в условиях контролируемой влажности 60 % ПВ и температуры 22 °С, обилие нитрификаторов в нижнем слое под кострецом возрастало до 60 раз. В нативной почве севооборота в 1,4 раза лучше развивались свободноживущие азотфиксаторы. Согласно кластерному анализу, с тремя приведенными группами микроорганизмов была очень тесно связана евклидовыми расстояниями (со сходством 99,7-98,3 %) урожайность сена на стационаре.

Коэффициент олиготрофности почвы, характеризующий уровень обеднения ее азотом, под севооборотами к моменту наших исследований уменьшился в слое 0-20 см в 1,5 и 1,9 раза и в 2,9 раза в нижнем слое под донником (рис. 3).

В фитомелиорированном солонце мелком усилилась в сравнении с целиной трансформация растительных остатков в гумус, что показал коэффициент микробиологической трансформации органического вещества Пм. Донник сильнее способствовал гумусообразованию в слое почвы 20-40 см, кострецовый севооборот в слое 0-20 см. Значение коэффициента Пм в слоях фитомелиорированного солонца было выше, чем в целине в 2 раза. Корреляция содержания гумуса в почве с полученными значениями Пм была высокой с коэффициентом $r=0,757\pm 0,12$.

Закономерно, что накопление гумуса должно было привести к снижению скорости минерализации органических остатков. Под севооборотом с донником $K_{\text{минерализации}}$ существенно снизился в слое 20-40 см (на 71%), под севооборотом с кострецом в слое 0-20 см (на 31,3 %).

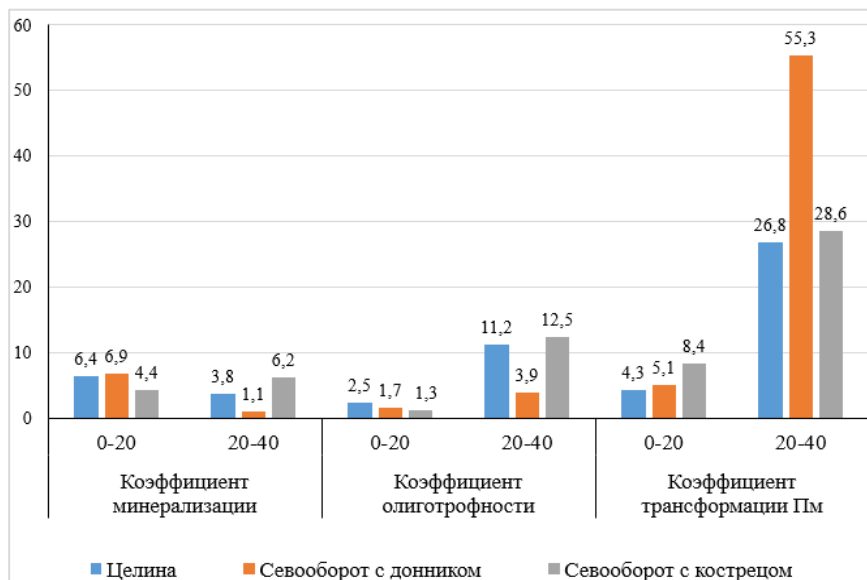


Рисунок 3 – Активность микробиологических процессов в солонце мелком на фоне агрофитомелиорации (среднее за 2018-2020 гг.)

ГЛАВА 4. Трансформация биологических и физико-химических свойств солонца черноземно-лугового среднего кормовыми севооборотами

4.1. Изменение физико-химических свойств

В солонце среднем тоже выявилось улучшение физико-химических свойств под действием агрофитомелиорации кормовыми севооборотами. Но здесь сельскохозяйственное использование снижало содержание гидрокарбонат-ионов. В слое почвы 0-20 см это происходило в 2,2-2,4 раза, в слое 20-40 см в 4,9 и 4,3 раза. Тенденция более значительных изменений в нижнем слое мелиорированной почвы сохранилась и для остальных водорастворимых солей. Концентрация сульфат-ионов в слое 20-40 см фитомелиорированного солонца под донником уменьшалась в 1,7 раза, под кострцом в 2,3 раза, водорастворимого натрия соответственно в 1,7 и 2,2 раза. В верхнем слое почвы снижение их количеств было в пределах природного варьирования в целине или составляло 1,2-1,4 раза.

Концентрация обменного натрия в агрогенно трансформированном солонце всегда существенно отличалось от целиного. Она снижалась по слоям в севообороте с донником в 2,4 и 3,4 раза, в севообороте с кострцом в 2,1 и 1,6 раз. После 33-х летнего влияния кормовых севооборотов содержание обменного натрия в нижнем слое стало соответствовать 5,4 и 11,5 % от ЕКО, в целине составляло 17,7 %.

Таблица 3 – Величина pH, ЕС и содержание обменного натрия и солей водной вытяжки в целинном и трансформированном кормовыми севооборотами солонце среднем (2018-2020 г.)

Вариант	Глубина взятия образца, см	pH	Обменный Na ⁺		ЕС, мкСм/см	Соли водной вытяжки, мг-экв/100 г почвы		
			ммоль / 100 г почвы	% от ЕКО		HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺
Целина	0-15	7,6	4,7	12,2	650,4	0,9	1,3	0,8
	15-40	8,2	7,8	17,7	973,2	1,4	2,7	3,4
Севооборот с донником	0-20	7,1	2,0*	5,3	132,4*	0,4*	1,0	0,7
	20-40	7,4	2,3*	5,4	207,0*	0,3*	1,5*	1,9*
Севооборот с кострцом	0-20	7,1	2,3*	6,0	108,5*	0,4*	0,8	0,6
	20-40	7,2	4,8*	11,5	124,0*	0,3*	1,2*	1,2*

* – Разница между средними значениями опытных вариантов и целиной достоверна (p<0,05).

За годы существования севооборотов снизилась щелочность солонца среднего. В год закладки стационара в верхнем слое исходной почвы величина pH составляла 8,0 единиц, в нижнем слое 8,4. Под возделываемыми травами снижалась по слоям в зависимости от года на 0,5-1,4 и 0,8-1,8 единиц. Содержание органического вещества в солонце кормовых севооборотов выросло. В слое 0-20 см в донниковом севообороте за 20 лет на 1,6 %, в кострецовом на 0,7 %. В солонце целины содержание гумуса увеличился на 0,3 %.

Таким образом, под действием агрофитомелиорации кормовыми севооборотами в солонце среднем произошло существенное улучшение физико-химических свойств. Солонец черноземно-луговой средний средnezасоленный в севообороте с донником трансформировался в слабозасоленную почву с остаточным содержанием натрия, под кострецовым севооборотом в малонатриевый солонец.

4.2. Изменения в метагеноме бактериального сообщества

За годы мелиорации кормовыми севооборотами в верхнем слое солонца среднего стало на четверть больше видов микроорганизмов (OTUS), а представительство более крупных таксонов в обоих слоях осталось на уровне целины. Наиболее многочисленными филумами в почве были *Acidobacteria*, *Proteobacteria*, *Actinobacteria*, чувствительными к фитомелиорации *Proteobacteria*, *Actinobacteria*, *Verrucomicrobia*. Фила *Acidobacteria* занимала в слое 0-15 см целинного солонца 42,3 %, под кормовым севооборотом с донником 33 % (рисунок 4) и тесно коррелировала с величиной pH с $r=0,708\pm 0,14$. В филе под севооборотами возросло представительство индикаторных родов *Gp1* (в 4 раза в слое 0-20 см), *Gp7* (в 2,5 и 4,5 раза в нижнем слое) и чуть меньше *Gp3*, отрицательно реагирующих на увеличение pH (Jones et al., 2009; Lin et al., 2020).

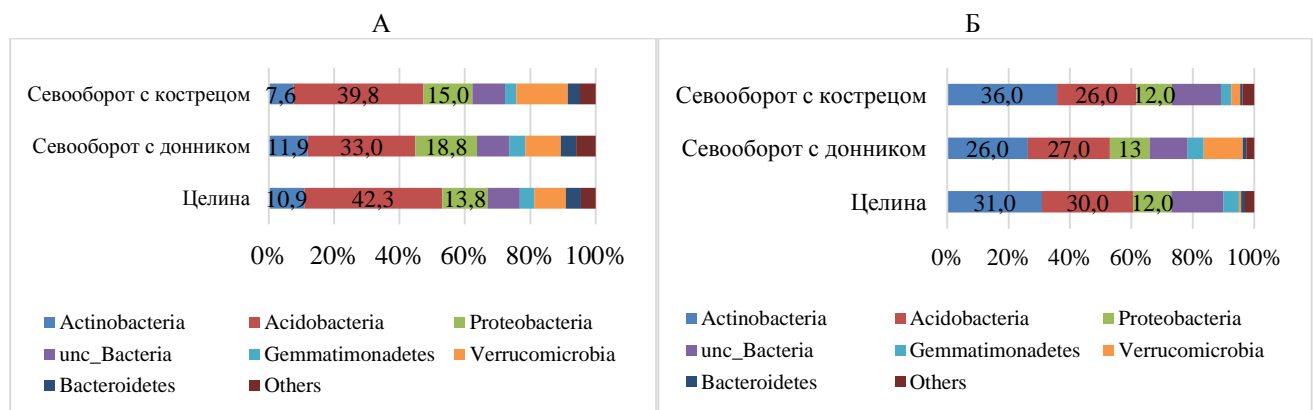


Рисунок 4 – Изменение состава и доли доминирующих филумов бактерий солонца среднего в фитомелиоративных севооборотах

Примечание. А - слой почвы 0-15 см для целины и 0-20 см для севооборотов, Б - 15-40 и 20-40 см соответственно.

В филе *Proteobacteria* в 1,5-1,7 раза превосходил целину класс *Deltaproteobacteria* (возвращающий минеральный азот и углерод в питание растений), в 1,3-1,4 класс бета-протеобактерий. Это нитрификаторы *Nitrosomonadaceae*, тионовые бактерии, окисляющие восстановленные соединения серы, порядок *Burkholderiales*, участвующий в фиксации азота и подавлении грибных инфекций. Под севооборотом с донником последних было по слоям почвы в 2,3 и 3 раза больше, чем в целине. В нижнем слое донникового севооборота до 18,6 раз возросли веррукомикробии. В литературе их обилие отмечено в луговых почвах восстановленных пастбищ с увеличенным в 3 раза содержанием органического вещества (Brewer et al., 2016). Для севооборота с кострецом увеличение филы отмечено в обоих слоях почвы (в 1,6 и 4,1 раза).

В филе *Actinobacteria* на рассоление почвы уменьшением численности в 2,2 раза под севооборотом с донником отреагировал класс *Thermoleophila*, включающий чувствительный к наличию натрия род *Gaiella*. У средне представленной в солонце среднем филы *Bacteroidetes*

классом, реагирующим на засоление, считается *Cytophagia* (Szymańska et al., 2018). Его уменьшение в донниковом севообороте произошло в 2 и 2,5 раза, в костречевом в 4 и 5 раз.

Среди второстепенных филумов бактерий в фитомелиорированном солонце менялась доля *Chloroflexi* и *Firmicutes*. Численность фирмикут под севооборотом с донником увеличилась в 3,8 раза, под костречом в 6,3 раза. Это сапрофиты, включающие семейство бацилл – минерализаторов азотсодержащих веществ и продуцентов стимуляторов роста растений. Снижение относительно целины установлено в Барабе для *Chloroflexi*. Роды этого типа бактерий обильнее в уплотненных почвах (Longepierre et al., 2021).

В таблице 4 приведены данные по реакции бактерий на фитомелиоративное изменение физико-химических свойств обоих рассмотренных видов черноземно-луговых солонцов Барабы. Установлено, что в солонце среднем Барабы четыре индикатора тесно связаны со всеми физико-химическими свойствами. Это фила *Firmicutes*, классы *Cytophagia* из *Bacteroidetes* и *Thermoleophilia* из актинобактерий, а также комплекс родов *Gp1+Gp3+Gp7*.

В солонце мелком, отличающимся более высокими концентрациями солей и щелочностью, корреляционные зависимости индикаторов были другими. *Firmicutes* и *Chloroflexi* слабо коррелировали с каждым из 5 показателей таблицы 4. *Spartobacteria* оказалась связанной в умеренной степени только с концентрацией гидрокарбонат-ионов, *Cytophagia* – с величиной pH. Таким образом, универсальными индикаторами, чувствительно характеризующими изменения солевого состава и величины pH солонцов, в Барабе стали бактерии *Thermoleophilia*, в основном представленные родом *Gaiella*, и комплекс родов *Gp1+Gp3+Gp7* из филы *Acidobacteria*. Остальные бактерии, описанные нами в главах 3 и 4 как биоиндикаторы трансформации физико-химических свойств солонцов, могут характеризовать величину только отдельных параметров.

Таблица 4 – Сила парных корреляций между биоиндикаторами засоления и физико-химическими свойствами солонцов, слой 0-20 см

Филы, классы, роды	Показатели водной вытяжки			pH	Na ⁺ обменный
	Na ⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻		
Солонец мелкий					
<i>Actinobacteria</i>			0,761±0,12	0,999±0,001	0,950±0,03
<i>Proteobacteria</i>	-0,870±0,07	-0,936±0,04	0,906±0,05		-0,806±0,10
<i>Gemmatimonadetes</i>		-0,930±0,04	-0,555±0,19		
<i>Firmicutes</i>		0,527±0,21		-0,693±0,15	
<i>Chloroflexi</i>	-0,818±0,10	-0,966±0,02	-0,942±0,03	-0,491±0,22	-0,744±0,13
<i>Thermoleophilia</i>	0,954±0,03		0,839±0,09	0,990±0,01	0,983±0,08
<i>Spartobacteria</i>	-0,986±0,01	-0,851±0,08	-0,999±0,001	-0,958±0,02	-0,647±0,17
<i>Cytophagia</i>		-0,527±0,21		0,700±0,15	
Σ <i>Gp1</i> + <i>Gp3</i> + <i>Gp7</i>	-0,978±0,01	-0,742±0,01	0,999±0,001	-0,833±0,09	-0,966±0,03
Солонец средний					
<i>Actinobacteria</i>	0,565±0,19		0,686±0,15		
<i>Proteobacteria</i>		-0,734±0,13		-0,686±0,15	-0,755±0,12
<i>Gemmatimonadetes</i>			0,603±0,18		
<i>Firmicutes</i>	-0,999±0,001	-0,936±0,04	-0,986±0,01	-0,958±0,04	-0,925±0,04
<i>Chloroflexi</i>	0,885±0,06	0,656±0,17	0,946±0,04	0,706±0,15	0,632±0,17
<i>Thermoleophilia</i>	0,927±0,04	0,727±0,13	0,974±0,01	0,773±0,12	0,706±0,15
<i>Spartobacteria</i>	-0,802±0,10	-0,531±0,21	-0,885±0,06	-0,589±0,19	-0,505±0,22
<i>Cytophagia</i>	0,999±0,001	0,920±0,04	0,992±0,004	0,945±0,04	0,908±0,05
Σ <i>Gp1</i> + <i>Gp3</i> + <i>Gp7</i>	-0,936±0,04	-0,999±0,001	-0,869±0,07	-0,998±0,001	- 0,999±0,001

Условные обозначения:

Высокая (сильная) корреляция, с 0,7<r<1,0	Средняя корреляция, с 0,5<r<0,7	Слабая корреляция r<0,5
---	---------------------------------	-------------------------

Метагеном солонца среднего под воздействием севооборотов претерпел изменение и в видовой структуре, что отражают индексы α -разнообразия. Общее количество таксонов бактерий и архей, отражаемое индексом Chao 1 под донником, в сравнении с целиной увеличилось на 22,1%, под кострцом на 9,2%. Отличался характер доминирования в сообществе бактерий: под севооборотами в слое 0-20 см индекс Бергера-Паркера был меньше целины в 1,5-2 раза.

В целом сообщество прокариот в солонце среднем под действием фитомелиоративных севооборотов с донником и кострцом усложнилось и изменилось в сторону преобладания протеобактерий, определяющих улучшение пищевого режима, увеличения индикаторных групп веррукомикробий и бактериоидетов, не переносящих высокий уровень засоления, а также снижения представительства ацидобактерий, указывающих на щелочность и засоление почвы.

4.3. Микробиологическая активность почвы

На агрофитомелиоративное изменение солонца среднего в слое 0-20 см отреагировало 6 эколого-трофических групп микроорганизмов. В севообороте с донником в 2,4 раза в среднем увеличилась численность нитрификаторов, на 28 % аммонифицирующих бактерий (табл. 5). В севообороте с кострцом их увеличение составило 1,9 раз и 12%. Малочисленнее, чем в целине стали бактерии, усваивающие минеральный азот, олигонитрофилы и денитрификаторы. Обилие денитрификаторов, переводящих нитратный азот в газообразное состояние и обуславливающих его потери из почвы уменьшилось под донником в среднем в 1,9 раза, под кострцом в 3,6 раз.

Таблица 5 – Активность микробиологических процессов в слое 0-20 см фитомелиорированного солонца среднего (среднее за 4 года исследований)

Показатели	Целина	Севооборот с донником	Севооборот с кострцом
Аммонификаторы, млн.	8,5	11,8*	9,7
Нитрификаторы, тыс.	0,8	1,9*	1,5*
Денитрификаторы, млн.	76,8	40,1*	21,4*
$K_{\text{минерализации}}$	7,8	2,3*	4,3*
$K_{\text{олиготрофности}}$	6,1	2,1*	4,3*
P_m – коэффициент потенциальной микробиологической трансформации органического вещества	9,7	16,9*	11,9

* – Разница между средними значениями опытных вариантов и целиной достоверна ($p < 0,05$).

Интенсивность микробиологической минерализации органического вещества в севооборотах относительно целины снизилась, а потенциальная микробиологическая трансформация растительных остатков в органическое вещество почвы усилилась (коэффициент P_m в таблице 5). В среднем возрастание P_m под донником относительно целины произошло в 1,7 раз, под кострцом в 1,2 раза.

В течение всех лет исследований не только верхний, но и нижний слой фитомелиорированного солонца среднего был заселен олигонитрифийными микроорганизмами слабее целинного, что нашло отражение в значениях коэффициента олиготрофности. Его снижение под севооборотом с донником в слое 0-20 см составило 2,9 раза, под севооборотом с кострцом 2 раза. В слое 20-40 см отличия в олиготрофности были сильнее: $K_{\text{олиготрофности}}$ снизился в 5,3 и 2,6 раз.

Высвобождающийся в минерализационных процессах азот реализовался в повышенной урожайности кормовых трав, что подтверждают данные таблицы 6, предоставленные СФНЦА РАН. Величина урожайности совместно с уменьшением денитрификационных потерь азота в слое 0-20 см и снижением олиготрофности обоих слоев почвы доказывает улучшение азотного обмена в фитомелиорированном солонце черноземно-луговом среднем.

Таблица 6 – Урожайность сена в кормовых севооборотах солонцового стационара в Барабе в годы проведения исследований, ц/га (данные к.с.-х.н. Т.Г. Ломовой)

Годы	Солонец мелкий			Солонец средний		
	Целина	Севооборот с донником	Севооборот с кострцом	Целина	Севооборот с донником	Севооборот с кострцом
2016	0,3	20,0*	20,1*	0,6	22,0*	23,3*
2018	0,4	20,4*	24,3*	0,8	23,2*	24,2*
2019	0,4	19,5*	18,0*	0,7	22,7*	24,8*
2020	0,3	19,2*	18,8*	0,8	25,6*	25,2*

* – Разница между средними значениями опытных вариантов и целиной достоверна ($p < 0,05$).

ГЛАВА 5. Реакция микробного сообщества на постсевооборотное залужение солонцов

5.1. Влияние залужения на свойства солонца черноземно-лугового мелкого

5.1.1. Изменение степени и химизма засоления и величины рН

Особый интерес и практическое значение для Барабы имеет долговечность (устойчивость) измененных севооборотами свойств солонцов. Выяснить этот вопрос стало возможным на части стационара СибНИИКормов, которую через 20 лет применения кормовых севооборотов засеяли травосмесью кострца и люцерны (участки залужения).

После прекращения послонной обработки солонца мелкого содержание солей в нем под сеянными травами стало меняться (табл. 7). Через 11-13 лет залужения в слое почвы 20-40 см в Барабе выявилось небольшое возрастание содержания обменного натрия и величины ЕС. По ЕС залуженный участок 1 стал отличаться от севооборота с донником в среднем за 3 года исследований на 111 мкСм/см, участок 2 от севооборота с кострцом на 119,7 мкСм/см. В процентном отношении прирост содержания солей в нижнем слое участков залужения составил 10,5 и 11 %. Количество обменного натрия относительно севооборотов увеличилось на 0,4 ммоль / 100 г почвы и 2,7 ммоль (+52 %).

В слое 0-20 см залуженного солонца мелкого увеличение ЕС было в пределах 4,8-5 %, содержание обменного натрия возрастало на последствии кострцового севооборота (+1,6 ммоль / 100 г почвы). Относительно целины его количество на залужении оставалось ниже: на участке 1 в среднем по слоям в 4,4 раза, на участке 2 в 3,1 раза.

Таблица 7 – Изменение физико-химических и биологических свойств залуженного солонца мелкого

Вариант залужения	Глубина взятия образца, см	Изменение за 11-13 лет относительно почвы севооборота							
		рН, ед.	обменный Na^+ , ммоль / 100 г почвы	ЕС, мкСм/см	таксоны бактерий, шт.				
					class	order	family	genus	OTUS (виды)
Участок 1	0-20	+0,3	+0,03	+41,5	-4	-11	-16	-39	-477
	20-40	+0,3	+0,4	+111,0	-3	-6	-9	-20	-306
Участок 2	0-20	+0,3	+1,6	+44,1	-1	-6	-7	-6	-356
	20-40	+0,3	+2,7	+119,7	-1	-1	+4	+13	+127

Примечание. Участок 1- последствие севооборота с донником, участок 2- последствие севооборота с кострцом.

Параллельно с небольшим накоплением водорастворимых солей и обменного натрия на залужении началось изменение кислотно-щелочных свойств солонца мелкого. Относительно севооборотов величина рН увеличилась на 0,3 ед., относительно целины оставалась ниже. Исходя из приведенных данных, можно считать, что фитомелиоративный эффект высеянной

бобово-злаковой травосмеси ниже, чем у севооборотов, сочетающих послойные обработки почвы с действием фитомелиорантов.

5.1.2. Влияние на микробиологические характеристики почвы

В микробиоме фитомелиорированного солонца мелкого отсутствие послойных механических обработок почвы снизило разнообразие таксонов (табл. 7). В слое 0-20 см уменьшение установлено для всех таксонов участков 1 и 2, в слое 20-40 см не касается филумов участка 1, на участке 2 семейств, родов и видов.

Доминировали на залужении ацидобактерии с представительством 34-37%. Филадельфия актинобактерий после прекращения обработок почвы смещается в группу среднего обилия к *Proteobacteria*, *unc_Bacteria*, *Verrucomicrobia*. Минорное представительство выявлено у *Gemmatimonadetes* (2,5-3,1 % под участками залужения) и *Bacteroidetes* – 4,1 %. В целине минорных филумов было 3 со средним обилием 2 %. Между собой участки залужения отличались по представительству *Bacteroidetes*, *Verrucomicrobia* (в 1,5 раза, что обусловлено спецификой и изначальным преобладанием количества остатков под донниковым севооборотом), а также класса *Betaproteobacteria*.

Класс *Thermoleophilia* в слое 0-20 см залуженных участков продолжал развиваться в меньшем в 3,4 и 2,9 раз представительстве, чем в целине. Чувствительными к увеличению pH и начавшемуся накоплению солей в залуженной почве стали *Gp1*, *Gp 3*, *Gp 7*. Сила их корреляций с величиной pH и содержанием обменного натрия на залужении ослабла (рис. 5).

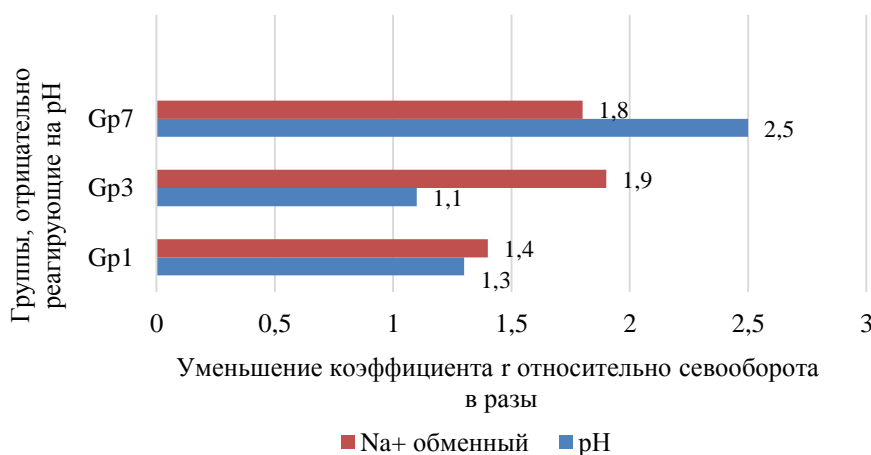


Рисунок 5 – Снижение тесноты корреляции в слоях 0-20 и 20-40 см залуженного солонца мелкого у групп ацидобактерий с pH и обменным Na+

Бактериальное сообщество верхнего слоя почвы после залужения становится менее разнообразным, чем под севооборотами. Индекс Chao 1 уменьшается на участке 1 на 16,5 %, на участке 2 на 10,9 %. Участок 1 по значениям индекса Бергера-Паркера, отражающим доминирование в сообществе, приближается к целине.

Активность микробиологических процессов участков залужения продолжает отличаться от целины, особенно в последствии севооборота с донником. $K_{\text{минерализации}}$ ниже целины в среднем в 1,5 раза, потенциальное микробиологическое гумусонакопление P_m выше в 2,4 раза, лучше питательный режим по азоту со сниженным в 2,3 и 2,2 раза в слоях почвы $K_{\text{олиготрофности}}$.

При этом по сравнению с севооборотами за 11-13 лет залужения в верхнем слое солонца мелкого становится больше в 1,5 и 2,2 раза олигонитрофильных организмов на участках 1 и 2, ослабляется микробиологическое гумусообразование, а в слоях 0-20 и 20-40 см обнаруживается в 2,2 и 1,4 раза больше свободноживущих азотфиксаторов. Их деятельность вместе с симбиотическими азотфиксаторами обеспечивает высокое содержание азота в почве и урожайность трав до 20,1-22,3 ц/га.

5.2. Биокосные изменения при залужении солонца черноземно-лугового среднего

5.2.1. Физико-химические свойства почвы под сеяным лугом

В солонце среднем на фоне 11-13-летнего постсевооборотного залужения статистически доказанное накопление солей в 2018-2020 гг. отмечено в слое почвы 20-40 см участка 2. Величина ЕС относительно севооборота выросла здесь в годы исследования в среднем на 24,9 %. В верхнем слое участков 1 и 2 увеличение было небольшим, до 6,4 и 9,3 %. Содержание обменного натрия под травами снизилось в слоях почвы на 1,6-1,8 ммоль и 1,7 и 4,2 ммоль/100 г почвы. Процент обменного натрия от ЕКО составлял 0,9-1,5%. SO_4^{2-} и водорастворимый Na^+ не накапливались, а гидрокарбонатов стало больше. В нижнем слое участков 1 и 2 – в 3 и 2,6 раза, в верхнем слое в 1,6 раза в последствии севооборота с донником.

В сравнении с целиной количество HCO_3^- на участке залужения 1 в почве было ниже в 1,6 раз, сульфат ионов в 2,6 и 3,5 раза, натрия водорастворимого в 1,2 и 1,9 раз. На участке 2 (после кострецового севооборота), концентрация HCO_3^- была меньше целины по слоям в 2 и 1,6 раза, сульфатов в нижнем слое в 2,4 раза, водорастворимого натрия в 2,4 и 8,6 раз. От целины количество обменного натрия на участках 1 и 2 отличалось на одну и ту же величину: в слое 0-20 см в 10,5 раз, в слое 20-40 см в 13 раз.

Величина pH залуженного участка 2 относительно севооборота с кострецом увеличилась в обоих слоях на 0,3 единицы, на участке 1 соответствовала солонцу в севообороте. Относительно значений целины величина pH залуженных участков осталась ниже.

Таким образом, в солонце черноземно-луговом среднем, залуженном после севооборотов с донником и кострецом, содержание обменного натрия и его процент от ЕКО соответствовали остаточно-натриевому солонцу. Но при этом в сравнении с севооборотами отмечалось увеличение содержания солей в водной вытяжке, особенно на участке 2 с последствием кострецового севооборота.

5.2.2. Изменения в микробном сообществе

Отсутствие механического разрушения солонцового горизонта нашло отражение в представительстве 5 филумов и 6 классов бактерий. Наибольший отклик на залужение выявлен у классов ацидобактерий из филы *Acidobacteria* и спартобактерий из *Verrucomicrobia*. Представительство филума *Acidobacteria* в солонце молодого луга по сравнению с севооборотом с донником увеличилось в 1,5 раза и оказалось достаточно близким к целине. В сравнении с кострецовым севооборотом представительство филума выросло на 13 %.

Увеличение численности *Spartobacteria*, не переносящих соль, произошло под молодым лугом в 3,2–3,6 раза, что свидетельствует о некоторой солонцеватости залуженной почвы относительно кормовых севооборотов. В 1,6 раз обильнее на участке 1 и в 2,4 раза на участке 2 стали бактерии *Cytophagia*, тесно связанные с катионами почвы и уровнем содержания в ней солей (Szymańska et al., 2018).

На участках залужения в 2,1 и 4,5 раза выросло представительство солелюбивого рода *Gaiella* из класса *Thermoleophilia*, в 2 и 3,9 раз *Microclunatus* из класса *Actinobacteria*, относящегося к порядку *Propionibacteriales*, предпочитающему анаэробные условия жизни. В 2 раза увеличилась численность гемматимонад, мало выделяющихся из увлажненных мест.

Таким образом, судя по представительству микробиома и индикаторным таксонам, постсевооборотное залужение солонца среднего травосмесью костреца и люцерны несколько снизило фитомелиоративное воздействие севооборотов на почву.

Постсевооборотное залужение солонца среднего способствовало увеличению олиготрофности почвы и минерализации органических веществ. Верхний слой среднего солонца в сеяном лугу был в 1,7 и 2,6 раза обильнее заселен олиготрофными по азоту микробами. В слое почвы 20–40 см изменения проявлялись сильнее. Разница в $K_{\text{олиготрофности}}$ между залуженным участком 1 и севооборотом с донником достигла 3,1 раза, в $K_{\text{минерализации}}$ 3,2 раза. Между залуженным участком 2 и кострецовым севооборотом отличия составили 4,1 и 5,8 раз. Микробиологическое гумусонакопление Пм на участке 1 в слоях почвы было одинаковым, на участке залужения 2 в нижнем слое слабее в 2,4 раза, чем в севообороте с кострецом.

ВЫВОДЫ

1. Длительное, более 30-ти лет, мелиоративное воздействие кормовых севооборотов на солонцы черноземно-луговые мелкие и средние Барабы проявляется в их рассолении и расщелачивании, особенно в слое почвы 20-40 см. В водной вытяжке снижается содержание водорастворимого натрия, гидрокарбонат- и сульфатионов, величина pH уменьшается на 0,5-1,1 единиц, количество обменного натрия в 2,1-8,6 раз. Сильнее агрофитомелиорация меняет физико-химические свойства солонца мелкого.

2. Фитомелиорация солонцов кормовыми севооборотами сопровождается повышением потенциального микробиологического гумусонакопления, увеличением в слое 0-20 см численности аммонификаторов, в 2-3 раза автотрофных нитрификаторов, а также снижением олиготрофности обоих изученных слоев почвы, что свидетельствует об улучшении азотного обмена в них. В солонце мелком в пополнении азота в почве определенную роль играют свободноживущие азотфиксаторы, в солонце среднем – сниженная численность денитрификаторов. Все микробиологические показатели, согласно кластерному анализу, значимы для увеличения урожайности трав.

3. Таксономическая структура бактерий и архей, выявленная метагеномным анализом, в измененных севооборотах солонцов становится сложнее и перестраивается, при этом в солонце мелком, согласно индексам α -разнообразия, эти изменения меньше, чем в среднем. По сравнению с целиной здесь в 2 раза сокращается представительство актинобактерий и увеличивается *Proteobacteria* и *Verrucomicrobia*, связанных с накоплением азота и органического вещества почвы, а также *Gemmatimonadetes* как индикатора сухости.

4. Сообщество прокариот в солонце среднем под действием севооборотов с донником и кострцом меняется в сторону возрастания классов бета- и дельта-протеобактерий, функционально связанных с улучшением пищевого режима, и филы фирмикутов – минерализаторов азотсодержащих веществ и продуцентов стимуляторов роста растений. Под кострцом достоверно снижается представительство *Chloroflexi* – индикаторов уплотнения почвы.

5. Постсевооборотное залужение солонцов в течение 11-13 лет люцерно-кострцовой травосмесью приводит к началу накопления солей. В слое 20-40 см увеличивается ЕС, содержание HCO_3^- и SO_4^{2-} . Эти изменения больше характерны для солонцов мелкого и среднего, залуженных после севооборота с кострцом, чем после донникового севооборота.

6. Питательный режим залуженных солонцов в сравнении с целиной остается улучшенным. Но прослеживается тенденция увеличения олиготрофности почвы по азоту и минерализационной активности в сравнении с фитомелиоративными севооборотами и уменьшения потенциального микробиологического гумусонакопления, особенно в слое 20-40 см на участке, ранее занятом севооборотом с кострцом. В солонце мелком участка, залуженного после севооборота с донником, микробиологическое гумусонакопление в слое 0-20 см повышенное.

7. В залуженных солонцах черноземно-луговых мелких и средних микробиом бактерий становится менее представительным, что в основном обусловлено повышением содержания солей в почве. В слое 0-20 см солонцов снижается разнообразие всех таксонов, кроме филлумов, меняется численность родов и классов бактерий – индикаторов засоления и щелочности почвы.

8. Индикаторами изменения солевого состава и величины pH почвы в ходе агрофитомелиорации солонцов стали бактерии родов Gp1, Gp7, Gp3 и *Blastocatellia* из филы *Acidobacteria*, солетолерантный род *Gaiella* из класса *Thermoleophilia*. Они тесно коррелировали с показателем ЕС, содержанием в водной вытяжке ионов натрия и сульфат-ионов и величиной pH, за исключением Gp7, связанной с кислотно-щелочными условиями в умеренной степени. Солечувствительный род *Spartobacteria* из филы *Verrucomicrobia* может быть дополнительным экологическим индикатором повышения степени засоления почвы.

Рекомендации производству и перспективы использования работы

Высокоэффективным приемом улучшения физико-химических свойств солонцов мелких и средних, азотного фонда и микробиологического гумосонакопления является использование фитомелиоративных севооборотов. В Барабинской равнине длительное возделывание в севооборотах донника и костреца безостого на солонцах черноземно-луговых позволяет за счет измененного почвенного плодородия на порядок и более повысить урожайность кормовых трав.

Постсевооборотное залужение сохраняет положительные изменения в фитомелиорированных солонцах не менее 10 лет.

Агрофитомелиорация перспективна на солонцах залежей, возвращаемых в сельскохозяйственный оборот.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. **Риксен В. С.**, Коробова Л. Н., Ломова Т. Г. Изменение микробиома мелкого солонца под действием длительного возделывания донника // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. – 2021. – №. 10. – С. 54-58. DOI 10.37882/2223-2966.2021.10.20.

2. Коробова Л. Н., **Риксен В. С.** Залужение как экологический фактор трансформации солонца и его микрофлоры // Принципы экологии. – 2022. – №. 2 (44). – С. 58-67. DOI 10.15393/j1.art.2022.12483.

3. 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. – С. 51-59. DOI 10.31677/2072-6724-2023-67-2-51-59.

4. Коробова Л. Н., **Риксен В. С.**, Батурина О. А. Микробиоценоз солонца как индикатор изменения среды при замене кормовых севооборотов сеяным лугом // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. – 2023. – Т. 53. – №. 8. – С. 5-14. DOI 10.26898/0370-8799-2023-8-1.

5. **Риксен В. С.**, Коробова Л. Н., Ломова Т. Г. Изменчивость бактериального сообщества солонца среднего в ответ на окультуривание фитомелиорацией // Journal of Agriculture and Environment. – 2020. – №. 2 (22). DOI 10.23649/jae.2022.2.22.13.

6. 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. – 2020. – №. 2 (22). DOI 10.23649/jae.2022.2.22.12.

7. **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.

Публикации в изданиях, входящих в базу Scopus:

1. **Riksen V. S.**, Korobova L. N. Biodiversity of the microbiome as an indicator of phytomeliorative soil transformation // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – IOP Publishing, 2023. – Т. 1154. – №. 1. – С. 012017. DOI 10.1088/1755-1315/1154/1/012017.

2. **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. – IOP Publishing, 2022. – Т. 1010. – №. 1. – С. 012046. DOI 10.1088/1755-1315/1010/1/012046.

3. Korobova L., **Riksen V.** Bioindication of desalination in grassed soil by microbiome diversity // E3S Web of Conferences. – EDP Sciences, 2023. – Т. 411. – С. 02067. DOI 10.1051/e3sconf/202341102067.

Публикации в других научных изданиях:

1. **Риксен В. С.**, Коробова Л. Н., Толстихина Д. В. Микробиологическое состояние солонца мелкого при возделывании трав - фитомелиорантов // Актуальные проблемы агропромышленного комплекса: сборник трудов научно-практической конференции

преподавателей, аспирантов, магистрантов и студентов Новосибирского ГАУ, Новосибирск, 20 октября 2021 года. – Новосибирск: Издательский центр НГАУ «Золотой колос», 2021. – С. 192-195.

2. **Риксен В. С.**, Коробова Л. Н. Биоразнообразие бактерий солонца мелкого через 30 лет фитомелиорации донником // Актуальные вопросы агропромышленного комплекса России и За рубежом : материалы всероссийской (национальной) научно-практической конференции с международным участием, посвящённой 85-летию со дня рождения Заслуженного работника высшей школы РФ, профессора, доктора сельскохозяйственных наук Хуснидинова Шарифзяна Кадировича, Иркутск – Молодёжный: Иркутский государственный аграрный университет им. А.А. Ежевского, 2021. – С. 129-134.

3. **Риксен В. С.**, Коробова Л. Н. Изменение биологических свойств солонца мелкого под действием длительного возделывания донника / В. С. Риксен, // Аграрная наука - сельскому хозяйству: Сборник материалов XVII Международной научно-практической конференции. В 2-х книгах, Барнаул, 09–10 февраля 2022 года. Том Книга 1. – Барнаул: Алтайский государственный аграрный университет, 2022. – С. 413-415.

4. **Риксен В. С.**, Коробова Л. Н. Изменения таксономической структуры прокариотного сообщества фитомелиорированного солонца среднего // Современная интегрированная защита растений: Сборник трудов Всероссийской научно-практической конференции Сибирской научной школы по защите растений, Новосибирск, 22 апреля 2022 года. – Новосибирск: Издательский центр Новосибирского государственного аграрного университета "Золотой колос", 2022. – С. 82-85.

5. **Риксен В. С.**, Коробова Л. Н., Ломова Т. Г. Прокариотное сообщество фитомелиорированного солонца мелкого // Теория и практика современной аграрной науки: Сборник V национальной (всероссийской) научной конференции с международным участием, Новосибирск, 28 февраля 2022 года. – Новосибирск: Издательский центр Новосибирского государственного аграрного университета "Золотой колос", 2022. – С. 439-443.

6. **Риксен В. С.** Почвенно-экологические Отличия в солонцах Барабы // Актуальные проблемы почвоведения, экологии и земледелия: Сборник докладов XVIII Международной научно-практической конференции Курского отделения МОО "Общество почвоведов имени В.В. Докучаева", Курск, 26–28 апреля 2023 года. – Курск: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение "Курский федеральный аграрный научный центр", 2023. – С. 253-257.