



ПОЧВЕННЫЙ И РИЗОСФЕРНЫЙ БАКТЕРИОБИОМ ПШЕНИЦЫ ПРИ КОМБИНИРОВАНИИ ГУМАТОВ И ЗОЛЫ УНОСА

© 2023 Н. Б. Наумова ¹, И. П. Беланов ¹, О. А. Савенков ¹, М. В. Степанова ¹,
Г. В. Щемелева ¹, О. А. Батурина ², М. Р. Кабилов ²

¹ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, проспект Академика Лаврентьева, 8/2, г. Новосибирск, 630090, Россия. E-mail: naumova@issa-siberia.ru

²ФГБУН Институт химической биологии и фундаментальной медицины СО РАН, пр. Академика Лаврентьева, 8, Новосибирск, 630090, Россия; E-mail: baturina@niboch.nsc.ru, kabilov@niboch.nsc.ru

Цель исследования. Изучение влияния обработки низкой дозой гумата калия на фоне внесения золы уноса (ЗУ), образующейся после сжигания каменного угля на ТЭЦ, на разнообразие почвенного бактериобиома и развитие корней пшеницы.

Место и время проведения. Микрополевой опыт был проведен в 2022 году в г. Новосибирск (Россия) на агросерой почве по рендомизированной схеме в трёхкратной повторности.

Методы. В исследовании использовали стандартные методы анализа основных почвенных свойств. Оценку структуры и биоразнообразия почвенного бактериобиома проводили с помощью метабаркодирования по гену 16S rPHK (район V3-V4).

Основные результаты. Выявлено большое разнообразие бактерий: в среднем 2472 и 2330 операционных таксономических единицы (ОТЕ) в валовой и ризосферной почве, соответственно. Всего в работе обнаружено 9120 ОТЕ, относящихся к 929 родам, 438 семействам, 416 порядкам, 104 классам и 37 типам. Четверть ОТЕ относились к типу Proteobacteria; на втором месте по богатству ОТЕ был тип Actinobacteria (10%); далее типы Firmicutes, Bacteroidetes и Acidobacteria (каждый по 8% от общего числа ОТЕ). По относительному обилию последовательностей лидерами были Actinobacteria (38–41%), Proteobacteria (25–28%) и Acidobacteria (10–13%). Обработка гуматом калия без ЗУ никак не повлияла на относительное обилие доминирующих родов в валовой почве, но повысила почти в 2 раза обилие Sphingomonas в варианте с внесением ЗУ. В ризосферной почве внесение гумата без ЗУ заметно (в 1,8 раза) повысило относительное обилие последовательностей рода Nocardioides, а на фоне ЗУ повысило относительное обилие Sphingomonas и снизило обилие Spartobacteria_gis.

Заключение. Обработка гуматом калия в низкой дозе вызвала небольшие, положительные изменения в составе почвенного бактериобиома даже на фоне огромного биоразнообразия, присущего практически любой почве, в том числе и использованной в этой работе. Воздействие обработки экзогенным гуматом включает сложный комплекс разнообразных механизмов; для понимания влияния обработки низкими дозами гуматов на почву, растения и микроорганизмы необходимы детальные физиолого-биохимические исследования и мета-анализ имеющихся в литературе данных.

Ключевые слова: биоразнообразие; почвенные бактерии; ризосфера; корни пшеницы.

Цитирование: Наумова Н.Б., Беланов И.П., Савенков О.А., Степанова М.В., Щемелева Г.В., Батурина О.А., Кабилов М.Р. Почвенный и ризосферный бактериобиом пшеницы при комбинировании гуматов и золы уноса // Почвы и окружающая среда. 2023. Том 6. № 3. e218. DOI: [10.31251/pos.v6i3.218](https://doi.org/10.31251/pos.v6i3.218).

ВВЕДЕНИЕ

Препараты гуминовых и фульвовых кислот применяют в медицине (van Rensburg, 2015; He et al., 2023), ветеринарии и животноводстве (Yöruk et al., 2004; Wang et al., 2022), растениеводстве и для ремедиации (Ondrasek et al., 2022) в качестве агента, стимулирующего физиолого-биохимические процессы живых организмов и, таким образом, улучшающего их здоровье, рост и развитие. Наряду с этим, в растениеводстве и рекультивации при внесении в соответствующих дозах гумат калия является дополнительным источником питательных элементов, улучшителем почвенных свойств и структуры (Burdick, 1965; Ouni et al., 2014; Zhilkibayev et al., 2022). Напомним, что гумат калия – это соль гуминовой кислоты, богатая карбоксильными и фенольными группами.

Много интересных исследований посвящено влиянию гуматов на количество и качество продукции сельскохозяйственных культур (Ullah et al., 2020; Abdelrasheed et al., 2021; Hegab et al., 2022) и использованию гуматов при восстановлении загрязненных/нарушенных земель (Zhuo et al., 2011; Whitton et al., 2023). В последнее время активно идет разработка комплексных биостимуляторов, в которых гуматы являются одним из компонентов (García-Sánchez et al., 2022). Используют гуматы и в качестве почвоулучшителей, как в составе органоминеральных комплексов (Panova et al., 2021), так и по отдельности (Hong et al., 2018). Однако конкретные механизмы действия гуматов часто не ясны, а данные о влиянии обработки гуматом противоречивы (Lyons, Genc, 2016). Основной причиной этого является, на наш взгляд, большой разброс в концентрации гуматов в коммерческих препаратах – от 5% (Relict..., 2023) до 26% (Kemgro Стор..., 2023), а также разброс в рекомендованных производителями и использованных в исследованиях разведениях и дозах. Иногда встречаются и некорректное указание дозы (Alharbi et al., 2022) или даже полное отсутствие упоминания о ней в опубликованных результатах исследований (Hegab et al., 2022b), что сильно затрудняет обобщение. В дополнение к этому, определенное значение имеет и сырье для производства гуматов, например, лигнин или леонардит бурых углей (Ertani et al., 2011); иногда же в экспериментах используют не коммерческие препараты гуминовых кислот, полученные из углей, а экстрагированные в лаборатории авторами работ из компостов (da Silva Lima et al., 2014). Некоторые производители рекомендуют столь низкие дозы гуматов (Lions, Genc, 2016; Relict..., 2023) при обработке семян или посевов, что одним из основных предполагаемых путей действия гуматов на урожай, если таковое обнаружено, может быть только их непосредственное, гормоно-подобное (Ertani et al., 2011) воздействие на физиолого-биохимические процессы растений и/или микроорганизмов, а также и некоторый сдвиг сообществ последних в сторону, более благоприятную для роста и развития растений. До сих пор мало информации о том, как гуматные препараты влияют на биоразнообразие и функционирование почвенного микробиома, поскольку такого рода работы начали активно проводить относительно недавно в связи с возросшей доступностью методов высокопроизводительного секвенирования. Так, выявлено изменение почвенного микробценоза при внесении гумата калия в почвосубстрат при выращивании женьшеня (Jin et al., 2022), при внесении в почву гибнущих пастбищ (Whitton et al., 2023). Сведения о влиянии очень низких доз гумата на микробиом практически отсутствуют.

Твердые отходы, так называемые золы уноса ТЭЦ, образующиеся при сжигании углей для выработки тепла и энергии, довольно давно используют в сельском хозяйстве, добавляя в почву агроэкосистем в качестве источника макро- и микроэлементов для улучшения роста и развития растений (Невенчанная, Гиндемит, 2018; Палеев, Худякова, 2021; Ansari et al., 2023), для корректировки почвенных свойств, например, pH (Шишелова, Самусева, 2004) и для рекультивации нарушенных экосистем (Петрова, Рудзиш, 2021). Стоит отметить, что зольный субстрат, насыщенный различными жидкими удобрениями, дает пролонгированный эффект, то есть вносимые мелиоранты закрепляются в почве на минеральной основе золы и не вымываются водами от полива и осадков долгое время. В связи с этим целью данной работы было изучение влияния обработки низкой дозой гумата калия (при внесении золы уноса и без) на разнообразие почвенного бактериобиома и развитие корней пшеницы путем метабаркодирования по генам 16S рРНК.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Схема микрополевого опыта. Микролевой опыт был заложен в июне 2022 г. по рендомизированной схеме на делянках площадью 1 м² в трёхкратной повторности. Почва опытной площадки представлена агросерой почвой, легкосуглинистой, с низким содержанием гумуса (2,5%) и слабощелочной реакцией почвенного раствора. Содержание биогенных элементов (NPK) по делянкам, хотя и было исходно распределено неравномерно, но находилось в пределах, обеспечивающих нормальный рост и развитие растений.

В качестве опытной была выбрана наиболее распространенная в регионе культура - яровая пшеница *Triticum aestivum* L. сорта Новосибирская 29. В качестве минеральной добавки использовали золу уноса (ЗУ), образующуюся после сжигания каменного угля на ТЭЦ-5 (Новосибирск). Эту добавку вносили в агросерую почву в дозе 2% в массовом соотношении (Bundesministerium..., 2011), что составляет 2,4 кг золы на одну опытную делянку, т.е. 1 м². В качестве органических удобрений использовали препарат на основе солей гуминовых и фульвовых кислот (Реликт Р, ООО НПП «Генезис», Новосибирск,

<https://relictorganics.com/relictp#rec249647986>). В вариантах ЗУ с внесением гумата, ЗУ замачивали в течение 24 часов перед внесением на делянки. Всего в опыте было 4 варианта: 1) без внесения каких-либо добавок, 2) только ЗУ, 3) ЗУ с гуматом и 4) только гумата. Делянки вариантов с обработкой ЗУ с гуматом и только гуматом периодически (один раз в месяц) опрыскивали раствором гумата в разведении 8 мл исходного коммерческого препарата на 2 литра воды в количестве 500 мл/м² на делянку, что составляло 0,12 г солей гуминовых кислот и 6 мг К на 1 м².

Отбор почвенных образцов и образцов фитомассы. Отбор образцов валовой почвы и почвы ризосферы растений пшеницы был проведен на стадии начала колошения растений. Растения выкапывали, корни осторожно встряхивали, после чего оставшуюся на корнях почву тщательно собирали в полиэтиленовые пакеты как почву ризосферы и сразу помещали в холодильник для хранения при –20 °С до выделения ДНК. Валовую почву собирали из слоя 0–10 см с каждой опытной делянки путем усреднения пяти индивидуальных почвенных монолитов.

Поскольку опыт закладывали и отбирали в сроки, не типичные для фенологии и агрономии пшеницы в регионе, то растения не осуществили полный цикл вегетации и опыт завершили на начальной стадии колошения. Корни растений отмывали от почвы водопроводной водой, после чего растения высушивали в сушильном шкафу с вентиляцией при температуре 40°С и взвешивали. Определяли общую массу корней на делянке и максимальную массу корней одного растения. Учитывали также всхожесть семян и число образовавшихся колосьев.

Анализ физико-химических свойств почвы. Определение содержания $C_{\text{орг}}$, подвижных форм питательных элементов ($N-NO_3^-$, P_2O_5 , K_2O) и pH (H_2O) проводили согласно общепринятым в почвоведении методам (Аринушкина, 1970). Гранулометрический состав анализировали пиррофосфатным методом (Качинский, 1958). При анализе отбирали фракции физического песка и физической глины, размером более 0,01 (до 1 мм) и менее 0,01 мм, соответственно.

Выделение валовой ДНК из образцов почвы. Валовую ДНК выделяли с помощью набора DNeasy PowerSoil Kit (Qiagen, Hilden, Germany) в соответствии с инструкцией производителя. Для механического разрушения образца использовали TissueLyser II (Qiagen, Hilden, Germany) 10 мин при 30 Герц. Качество ДНК оценивали с помощью электрофореза в 1%-ном агарозном геле, а количество – на флуориметре Qubit (Life Technologies, USA) и спектрофотометре Nanodrop (Thermo Fisher Scientific, USA).

Амплификация фрагментов генов 16S рРНК и секвенирование ампликонов. Регион V3-V4 гена 16S рРНК амплифицировали с помощью праймеров 343F (5'-CTCCTACGGRRSGCAGCAG-3') и 806R (5'-GGACTACNVGGGTWTCTAAT-3'), содержащих адаптерные последовательности (Illumina), линкер и баркод (Fadrosh et al., 2014). Амплификацию проводили в 50 мкл реакционной смеси в условиях, описанных ранее (Noskov et al., 2021). Ампликоны смешивали по 200 нг каждый и чистили в 1% агарозном геле с помощью набора MinElute Gel Extraction Kit (Qiagen, Hilden, Germany). Секвенирование проводили в ЦКП "Геномика" (ИХБФМ СО РАН) на секвенаторе MiSeq (Illumina, USA), используя набор Reagent Kit v3 (2x300, Illumina, USA).

Биоинформатический анализ. Полученные парные последовательности анализировали с помощью UPARSE скриптов (Edgar, 2013), используя Usearch v11.0.667 (Edgar, 2010). Биоинформатическая обработка включала перекрывание парных ридов, фильтрацию по качеству и длине, учет одинаковых последовательностей, отбрасывание синглетонов, удаление химер и получение операциональных таксономических единиц (OTE) с помощью алгоритма кластеризации UPARSE (Edgar, 2016a). Таксономическую принадлежность последовательностей (OTE) определяли с помощью SINTAX (Edgar, 2016b) с использованием 16S RDP training set v18 в качестве референсной базы (Wang et al., 2007). Таксономическую структуру полученного таким образом ансамбля последовательностей (бактериобиома) оценивали путем вычисления отношения числа таксон-специфичных последовательностей к общему числу последовательностей образца, выраженному в процентах. Индексы α -биоразнообразия разнообразия рассчитывали с помощью Usearch v11.0.667 (Edgar, 2010).

Статистический анализ. Описательную статистику, сравнение по вариантам обилия бактериальных таксонов и изученных свойств опытных ценозов пшеницы проводили с использованием дисперсионного анализа и анализа главных компонент с помощью статистического пакета Statistica v.13.3 (TIBCO Software Inc., USA). Индексы α -биоразнообразия рассчитывали с помощью пакета PAST (Hammer et al., 2001).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Общее таксономическое разнообразие. Всего в исследовании было выявлено 9120 ОТЕ бактерий, относящихся к 929 род-специфичным кластерам (из которых 715 идентифицированы), 438 семействам (354), 416 порядкам (380), 104 классам и 37 типам. Из всех выявленных ОТЕ 1449, т.е. 16% от общего числа ОТЕ, не были идентифицированы ниже уровня типа. Четверть числа ОТЕ (2251, 25%) относились к типу *Proteobacteria*; на втором месте по богатству ОТЕ был тип *Actinobacteria* с 949 ОТЕ (10%), и далее шли *Firmicutes*, *Bacteroidetes* и *Acidobacteria* (каждый по 8% от общего числа ОТЕ).

Что касается относительного обилия таксон-специфичных родов, то из всех 37 идентифицированных типов восемь были доминантными, т.е. со вкладом более $\geq 1\%$ в общее число нуклеотидных последовательностей: основными лидерами были *Actinobacteria* (38% в валовой и 41% в ризосферной почве), *Proteobacteria* (25% и 28%) и *Acidobacteria* (13% и 10%); вклад *Firmicutes*, *Bacteroidetes* и *Verrucomicrobia* в общее число последовательностей составил 3–6%. Таким образом, подавляющее большинство бактериальных типов, выявленных в работе, были минорными или редкими.

По относительному обилию родов на таксономическом уровне класса доминировали 15 классов, среди которых преобладали *Actinobacteria* (21% в валовой и 27% в ризосферной почве) и *Thermoleophilia* (8–10%) (оба относятся к типу *Actinobacteria*), затем шли *Alphaproteobacteria* (16–17%). Такое доминирование классов отразилось на уровне рода так, что среди девяти идентифицированных до рода преобладающих таксонов, семь (*Gaiella*, *Pseudarthrobacter*, *Nocardioides*, *Mycobacterium*, *Streptomyces*, *Micromonospora* и *Solirubrobacter*) относились к *Actinobacteria* и два рода (*Sphingomonas* и *Bradyrhizobium*) – к *Proteobacteria*.

Влияние добавок на бактериобиом валовой почвы. Обработка гуматом калия агросерой почвы без ЗУ никак не повлияла на относительное обилие доминирующих родов, но повысила почти в 2 раза обилие *Sphingomonas* в варианте с внесением ЗУ (Таблица 1). Среди остальных родов никаких других изменений под влиянием гумата не было выявлено во всех вариантах обработки.

Таблица 1

Относительное обилие доминантных родов бактерий (среднее $\pm$ стандартное отклонение) в валовой почве (%)

Род	Внесение/обработка ¹			
	нет	гумат	ЗУ	ЗУ/гумат
<i>Bacillus</i>	0,6 $\pm$ 0,1	0,4 $\pm$ 0,2	0,5 $\pm$ 0,2	0,4 $\pm$ 0,3
<i>Bradyrhizobium</i>	1,5 $\pm$ 0,8	1,8 $\pm$ 1,1	2,2 $\pm$ 0,7	1,0 $\pm$ 0,0
<i>Devosia</i>	0,3 $\pm$ 0,1	0,4 $\pm$ 0,1	0,4 $\pm$ 0,3	0,5 $\pm$ 0,1
<i>Gaiella</i>	4,2 $\pm$ 1,6	3,8 $\pm$ 1,3	4,5 $\pm$ 2,0	3,8 $\pm$ 0,5
un. * <i>Gp16</i>	4,3 $\pm$ 1,5	3,5 $\pm$ 0,9	3,4 $\pm$ 1,1	3,6 $\pm$ 1,3
un. <i>Gp6</i>	5,6 $\pm$ 2,6	4,9 $\pm$ 1,5	6,3 $\pm$ 3,1	3,6 $\pm$ 0,6
<i>Ilumatobacter</i>	0,7 $\pm$ 0,3	0,6 $\pm$ 0,1	0,7 $\pm$ 0,6	0,7 $\pm$ 0,2
<i>Massilia</i>	0,7 $\pm$ 0,6	1,1 $\pm$ 0,5	0,5 $\pm$ 0,2	0,6 $\pm$ 0,7
<i>Micromonospora</i>	0,9 $\pm$ 0,1	0,9 $\pm$,3	1,4 $\pm$ 1,1	1,1 $\pm$ 0,4
<i>Mycobacterium</i>	2,0 $\pm$ 1,3	2,4 $\pm$ 0,4	2,9 $\pm$ 1,3	2,0 $\pm$ 0,1
<i>Nocardioides</i>	2,2 $\pm$ 0,1	2,6 $\pm$ 1,5	1,9 $\pm$ 0,1	2,8 $\pm$ 0,2
<i>Pseudarthrobacter</i>	2,5 $\pm$ 1,3	3,0 $\pm$ 1,5	2,3 $\pm$ 1,1	6,0 $\pm$ 7,9
<i>Solirubrobacter</i>	4,5 $\pm$ 1,1	1,9 $\pm$ 1,1	1,7 $\pm$ 1,0	3,0 $\pm$ 1,2
<i>Spartobacteria_gis</i> **	2,1 $\pm$ 1,7	2,5 $\pm$ 2,5	2,9 $\pm$ 1,4	1,2 $\pm$ 0,7
<i>Sphingomonas</i>	2,1 $\pm$ 0,2 ab***	2,3 $\pm$ 0,7 ab	1,4 $\pm$ 0,2 a	2,7 $\pm$ 0,7 b
<i>Streptomyces</i>	1,8 $\pm$ 0,6	1,7 $\pm$ 0,2	1,8 $\pm$ 0,2	1,6 $\pm$ 0,6

Примечание.

1 – варианты опыта (здесь и далее в табл. 2–5): без внесения каких-либо добавок (**нет**) и с внесением только гумата (**гумат**), только золы уноса (**ЗУ**), золы уноса с гуматом (**ЗУ/гумат**). *Неклассифицированные до более низкого таксономического уровня. ***genera incertae sedis*. ***Различные буквы в строках означают, что разница статистически значима ($P \leq 0,05$, тест Фишера); отсутствие букв означает отсутствие статистически значимой разницы.

Влияние добавок на бактериобиом ризосферной почвы. Внесение гумата без ЗУ заметно (в 1,8 раза) увеличило относительное обилие последовательностей рода *Nocardioides* (табл. 2), а на фоне ЗУ повысило относительное обилие *Sphingomonas* и снизило обилие *Spartobacteria_gis*.

Таблица 2

Относительное обилие доминантных родов бактерий (среднее $\pm$ стандартное отклонение) в ризосферной почве (%)

Род	Внесение/обработка			
	нет	гумат	ЗУ	ЗУ+гумат
<i>Bacillus</i>	0,5 $\pm$ 0,1	0,6 $\pm$ 0,2	0,6 $\pm$ 0,3	0,6 $\pm$ 0,5
<i>Bradyrhizobium</i>	1,0 $\pm$ 0,5	0,9 $\pm$ 0,0	1,4 $\pm$ 0,9	0,9 $\pm$ 0,2
<i>Devosia</i>	1,3 $\pm$ 0,5	1,1 $\pm$ 0,5	0,8 $\pm$ 0,7	1,0 $\pm$ 0,1
<i>Gaiella</i>	2,7 $\pm$ 1,2	2,3 $\pm$ 0,7	3,0 $\pm$ 1,9	2,3 $\pm$ 0,6
un.* <i>Acidobacteria</i> _Gp16	3,2 $\pm$ 0,5	2,8 $\pm$ 0,8	3,6 $\pm$ 2,5	2,6 $\pm$ 0,7
un. <i>Acidobacteria</i> _Gp6	2,9 $\pm$ 0,3	2,4 $\pm$ 0,4	2,9 $\pm$ 1,7	2,9 $\pm$ 0,8
<i>Ilumatobacter</i>	0,3 $\pm$ 0,2	0,6 $\pm$ 0,1	0,3 $\pm$ 0,1	0,4 $\pm$ 0,1
<i>Massilia</i>	1,3 $\pm$ 0,4	1,5 $\pm$ 0,9	1,0 $\pm$ 0,9	1,4 $\pm$ 1,1
<i>Micromonospora</i>	0,9 $\pm$ 0,2	0,9 $\pm$ 0,4	0,8 $\pm$ 0,1	1,2 $\pm$ 0,4
<i>Mycobacterium</i>	1,7 $\pm$ 0,7	1,9 $\pm$ 0,2	2,2 $\pm$ 1,8	1,7 $\pm$ 0,3
<i>Nocardioideis</i>	2,8 $\pm$ 0,1 a***	5,0 $\pm$ 1,8 b	3,2 $\pm$ 1,2 ab	4,0 $\pm$ 0,5 ab
<i>Pseudarthrobacter</i>	5,6 $\pm$ 1,8	10,3 $\pm$ 3,7	5,9 $\pm$ 5,0	6,5 $\pm$ 3,9
<i>Solirubrobacter</i>	1,0 $\pm$ 0,2	1,1 $\pm$ 0,2	0,9 $\pm$ 0,6	1,2 $\pm$ 0,6
<i>Spartobacteria_gis**</i>	1,7 $\pm$ 1,5 ab	1,0 $\pm$ 0,4 a	3,7 $\pm$ 2,2 b	0,9 $\pm$ 0,3 a
<i>Sphingomonas</i>	2,2 $\pm$ 0,9 ab	2,7 $\pm$ 1,1 ab	1,7 $\pm$ 0,1 a	3,1 $\pm$ 0,4 b
<i>Streptomyces</i>	1,3 $\pm$ 0,2	1,5 $\pm$ 0,4	1,4 $\pm$ 0,8	1,3 $\pm$ 0,1

Примечание.

*Неклассифицированные до более низкого таксономического уровня. ** *genera incertae sedis*.

***Различные буквы в строках означают, что разница статистически значима ($P \leq 0,05$, тест Фишера); отсутствие букв означает отсутствие статистически значимой разницы.

Влияние добавок на α -биоразнообразие бактериобиома почвы. Как в валовой, так и в ризосферной почве индексы α -биоразнообразия бактериобиома, за исключением Chao-1, не продемонстрировали изменений в связи с внесением гумата, ЗУ или их совместного внесения (Таблица 3); индекс Chao-1, оценивающий потенциальное богатство ОТЕ, под влиянием гумата снизился в 1,2 раза.

Таблица 3

Индексы α -биоразнообразия бактериобиома (среднее $\pm$ стандартное отклонение) валовой и ризосферной почвы

Индекс	Внесение/обработка			
	нет	гумат	ЗУ	ЗУ+гумат
Валовая почва				
Богатство ОТЕ	2504 $\pm$ 202	2177 $\pm$ 541	2580 $\pm$ 87	2628 $\pm$ 181
Chao-1	3756 $\pm$ 241 b*	3168 $\pm$ 434 a	4009 $\pm$ 39 b	4096 $\pm$ 181 b
Симпсона	0,99 $\pm$ 0,00	0,99 $\pm$ 0,01	0,99 $\pm$ 0,01	0,99 $\pm$ 0,01
Шеннона	6,4 $\pm$ 0,2	6,4 $\pm$ 0,3	6,4 $\pm$ 0,4	6,8 $\pm$ 0,1
Выравненность	0,25 $\pm$ 0,03	0,28 $\pm$ 0,08	0,25 $\pm$ 0,08	0,33 $\pm$ 0,05
Равномерность	0,82 $\pm$ 0,01	0,83 $\pm$ 0,03	0,82 $\pm$ 0,04	0,86 $\pm$ 0,02
Доминирование	0,01 $\pm$ 0,00	0,01 $\pm$ 0,01	0,01 $\pm$ 0,01	0,00 $\pm$ 0,00
Бергера-Паркера	0,04 $\pm$ 0,02	0,07 $\pm$ 0,07	0,07 $\pm$ 0,07	0,03 $\pm$ 0,01
Ризосферная почва				
Богатство ОТЕ	2480 $\pm$ 266	2144 $\pm$ 194	2235 $\pm$ 404	2460 $\pm$ 143
Chao-1	3754 $\pm$ 387	3323 $\pm$ 310	3336 $\pm$ 306	3609 $\pm$ 185
Симпсона	0,99 $\pm$ 0,00	0,99 $\pm$ 0,00	0,98 $\pm$ 0,01	0,98 $\pm$ 0,03
Шеннона	6,5 $\pm$ 0,2 b ¹	6,5 $\pm$ 0,2 ab	6,2 $\pm$ 0,2 a	6,3 $\pm$ 0,5 b
Выравненность	0,28 $\pm$ 0,05	0,30 $\pm$ 0,05	0,23 $\pm$ 0,04	0,23 $\pm$ 0,10
Равномерность	0,84 $\pm$ 0,02	0,84 $\pm$ 0,02	0,81 $\pm$ 0,02	0,80 $\pm$ 0,06
Доминирование	0,01 $\pm$ 0,00	0,01 $\pm$ 0,00	0,02 $\pm$ 0,01	0,02 $\pm$ 0,03
Бергера-Паркера	0,05 $\pm$ 0,03	0,04 $\pm$ 0,01	0,11 $\pm$ 0,04	0,11 $\pm$ 0,10

Примечание.

*Различные буквы в строках означают, что разница статистически значима ($P \leq 0,05$, тест Фишера); отсутствие букв означает отсутствие статистически значимой разницы.

Влияние гумата и ЗУ на почвенные свойства и растения пшеницы. Единственным статистически подтвержденным изменением почвенных свойств в связи с внесением гумата оказалось заметное (в 1,7 раза) снижение содержания подвижного фосфора (Таблица 4).

Таблица 4

Физико-химические свойства почвы (среднее $\pm$ стандартное отклонение) после завершения опыта

Свойство	Внесение/обработка			
	нет	гумат	ЗУ	ЗУ+гумат
Валовая почва				
pH	7,1 $\pm$ 0,2	7,6 $\pm$ 0,6	7,7 $\pm$ 0,3	7,7 $\pm$ 0,6
C _{орг} , %	1,6 $\pm$ 0,1 b*	0,8 $\pm$ 0,5	1,1 $\pm$ 0,5	1,0 $\pm$ 0,8
P ₂ O ₅ , мг/кг	211 $\pm$ 68 b*	122 $\pm$ 52 a	109 $\pm$ 25 a	104 $\pm$ 43 a
N-NO ₃ , мг/кг	10,6 $\pm$ 3,5	9,5 $\pm$ 1,3	12,2 $\pm$ 4,2	9,7 $\pm$ 5,9
K ₂ O, мг/кг	184 $\pm$ 75	168 $\pm$ 84	159 $\pm$ 54	149 $\pm$ 80
Физическая глина, %	23,6 $\pm$ 2,1	20,7 $\pm$ 2,3	23,9 $\pm$ 1,6	24,3 $\pm$ 2,3
Физический песок, %	76,4 $\pm$ 2,1	79,3 $\pm$ 2,3	76,1 $\pm$ 1,5	75,7 $\pm$ 2,1

Примечание.

*Различные буквы в строках означают, что разница статистически значима ($P \leq 0,05$, тест Фишера); отсутствие букв означает отсутствие статистически значимой разницы.

Внесение гумата по-разному повлияло на рост и развитие растений пшеницы при внесении ЗУ и без такового: в последнем случае все показатели имели тенденцию к увеличению, а масса корней увеличилась в 2 раза (Таблица 5) по сравнению с контрольным вариантом, в то время как в вариантах с ЗУ по массе корней никаких различий не выявлено. Отметим, что при выделении главных компонент из всех переменных для образцов без ЗУ значения первой главной компоненты, отвечающей за 77% исходной дисперсии, различаются между вариантами с гуматом и без ($p=0,028$).

Таблица 5

Некоторые свойства агроценозов пшеницы (среднее $\pm$ стандартное отклонение) с разными вариантами добавок в почву

Свойство	Внесение/обработка			
	нет	гумат	ЗУ	ЗУ+гумат
Всхожесть, %	42 $\pm$ 7	83 $\pm$ 70	58 $\pm$ 30	88 $\pm$ 62
Колошение, %	7 $\pm$ 11	7 $\pm$ 12	3 $\pm$ 5	15 $\pm$ 21
Максимальная масса корней, г/растение	0,12 $\pm$ 0,05	0,29 $\pm$ 0,14	0,21 $\pm$ 0,12	0,15 $\pm$ 0,01
Масса корней 10 растений**	0,5 $\pm$ 0,1 a*	1,1 $\pm$ 0,3 b	0,9 $\pm$ 0,6 a	0,7 $\pm$ 0,1 a

Примечание.

*Различные буквы в строках означают, что разница статистически значима ($P \leq 0,05$, тест Фишера); отсутствие букв означает отсутствие статистически значимой разницы. **Отобранных методом случайной выборки.

ОБСУЖДЕНИЕ

Выявленное в данной работе доминирование типов *Actinobacteria*, *Proteobacteria* и *Acidobacteria* как по относительному обилию (в сумме почти три четверти от общего числа последовательностей), так и по богатству ОТЕ (в сумме более 40% богатства ОТЕ) типично для многих почв сельскохозяйственных и естественных экосистем (Praeg et al., 2020).

Бактериобиом валовой и ризосферной почвы при обработке гуматом без внесения золы уноса. Заметное повышение относительного обилия актиномицетов *Nocardioide*s в ризосферной почве без золы уноса не удивительно, так как этот род бактерий известен своим присутствием в почве агроценозов пшеницы (Ikunaga et al., 2011; Chen et al., 2022), в том числе и в ризосфере (Kaplan et al., 2019; Sulieman et al., 2022). При этом в нашем исследовании *Nocardioide*s являлись одним из главных доминантов в ризосферной почве, что согласуется с данными других авторов (Cordero et al., 2021). Установлена положительная связь между фитомассой пшеницы и обилием *Nocardioide*s (Chen et al., 2020). Эти актиномицеты могут трансформировать микотоксины, делая зерно безопасным для употребления людьми и животными (Ikunaga et al.,

2011). Таким образом, повышение относительного обилия этих актиномицетов при обработке гуматом можно рассматривать как положительное влияние этого препарата.

Тот факт, что обработка гуматом никак не повлияла на индексы α -биоразнообразия, согласуется с данными других авторов (Whitton et al., 2023). Отсутствие влияния гумата на эти интегральные индексы представляется вполне логичным в связи с низкой дозой гумата на фоне очень высокого биоразнообразия бактерий в почве. В целом значения таких индексов α -биоразнообразия, как Шеннона и Симпсона, в данном исследовании оказались довольно высоки и очень близки к значениям этих индексов в ненарушенной серой почве, изученной нами ранее (Naumova et al., 2021). Выявленное в валовой почве при обработке гуматом заметное снижение индекса Chao-1, оценивающего потенциальное богатство ОТЕ, интерпретировать трудно.

Бактериобиом валовой и ризосферной почвы при внесении гумата на фоне золы уноса. Заметное повышение относительного обилия последовательностей *Sphingomonas* (*Proteobacteria*) при обработке гуматом на фоне ЗУ можно рассматривать как положительный эффект, компенсирующий снижение обилия этих полезных членов бактериального ансамбля от внесения только ЗУ. Представителей этого рода бактерий обычно выявляют в почве пшеничных полей (Dong et al., 2017; Liu et al., 2019; Hou et al., 2022), в том числе ризосфере пшеницы (Xu et al., 2021; Zhang et al., 2023). Кроме того, они являются стимуляторами роста растений, поскольку могут фиксировать атмосферный азот (Gosal et al., 2011), снижать рост и развитие патогенов (Innerebner et al., 2011), повышать устойчивость растений к заболеваниям (Wen et al., 2023), переносить воздействие тяжелых металлов и обладают способностью к биодegradации органических загрязнителей (Xu et al., 2021).

Представителей класса *Spartobacteria* (*Verrucomicrobia*) обычно обнаруживают в почве самых различных экосистем (Sangwan et al., 2005; Praeg et al., 2020), как правило, на уровне умеренных доминантов, но иногда и на уровне основных (Bergmann et al., 2011). Выявленное в почве ризосферы на фоне ЗУ существенное снижение относительного обилия *Spartobacteria_gis* при обработке гуматом оказалось несколько неожиданным. Эти бактерии могут сохранять стабильное присутствие при внесении минеральных удобрений и навоза (Ding et al., 2016), что в какой-то степени связано с их олиготрофностью (неспособностью быстро реагировать на поступление легкодоступных источников углерода) и участием в разложении устойчивых фракций органического вещества в почве (Zhang et al., 2018). Поэтому и их кажущееся повышенное обилие на фоне только ЗУ (хоть и $p=0,11$ при сравнении с контролем) и снижение при комбинировании ЗУ и гумата интерпретировать трудно.

Влияние гумата на свойства почвы и растений. Снижение содержания подвижного фосфора в почве при внесении гумата без ЗУ, вероятнее всего, связано с повышением выноса фосфора, о чем свидетельствует увеличение фитомассы корней пшеницы при этой обработке. Отсутствие влияния применения гумата на другие почвенные свойства согласуется с результатами, полученными при выращивании пшеницы в открытом и защищенном грунте и лаборатории на разных почвах (Ceronio et al., 2022); при этом в работе не было выявлено никакого влияния на рост и развитие растений и урожай зерна пшеницы. Отсутствие влияния применения гумата на фоне ЗУ согласуется с результатами об отсутствии влияния на рост и развитие растений, полученными при воздействии такой же дозы гумата (1 мг на растение) при выращивании пшеницы в лабораторных условиях на песке (Feoktistova et al., 2023). В целом же, пониженное содержание подвижного фосфора при внесении ЗУ связано, скорее всего, с его закреплением ЗУ (Lee et al., 2007).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для тестирования влияния гуматов на почвенный бактериобиом, свойства почвы и продукции корней растений мы выбрали типичную для региона агросерую почву и очень низкую дозу гумата для обеспечения отсутствия его непосредственного влияния как удобрения и почвоулучшителя. Полученные результаты позволяют заключить, что обработка гуматом калия даже в такой дозе и за неполный срок вегетации растений вызвала определенные положительные изменения в составе бактериобиома как валовой, так и ризосферной почвы несмотря на огромное биоразнообразие, присущее практически любой почве, в том числе, и использованной в этой работе. Воздействие обработки экзогенным гуматом включает сложный комплекс разнообразных механизмов; для понимания влияния обработки низкими дозами гуматов на почву, растения и микроорганизмы необходимы детальные физиолого-биохимические исследования и мета-анализ имеющихся в литературе данных.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственных заданий ИПА СО РАН (№ 121031700309-1) и ИХБФМ СО РАН (№ 121031300042-1).

ЛИТЕРАТУРА

- Аринушкина Е.В. Руководство по химическому анализу почв. 2-е изд. Москва: Изд-во МГУ, 1970. 488 с.
- Качинский Н.А. Механический и микроагрегатный состав почвы, методы его изучения. Москва: АН СССР, 1958. 193 с.
- Невенчанная Н.М., Гиндемит А.М. Эффективность использования золошлаковых материалов при выращивании огурцов на лугово-чернозёмной почве // Достижения науки и техники АПК. 2018. Т. 32. № 10. С. 37–40. DOI: [10.24411/0235-2451-2018-11008](https://doi.org/10.24411/0235-2451-2018-11008).
- Палеев П.Л., Худякова Л.И. Использование золошлаковых отходов в сельском хозяйстве // XXI век. Техносферная безопасность. 2021. Т. 6. № 4. С. 348–356. DOI: [10.21285/2500-1582-2021-4-348-356](https://doi.org/10.21285/2500-1582-2021-4-348-356).
- Петрова Т.А., Рудзиш Э. Виды мелиорантов для рекультивации техногенно-нарушенных территорий горной промышленности // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2021. № 4. С. 100–112. DOI: [10.25018/0236_1493_2021_4_0_100](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_4_0_100).
- Шишелова Т.И., Самусева М.Н. Применение золы-уноса ТЭЦ ОАО «Иркутскэнерго» для химической мелиорации кислых почв // Успехи современного естествознания. 2004. № 12. С. 85–86. URL: <https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=13826> (дата обращения 18.09.2023).
- Abdelrasheed K.G., Mazrou Y., Omara A.E., Osman H.S., Nehela Y., Hafez E.M., Rady A.M.S., El-Moneim D.A., Alowaiesh B.F., Gawayed S.M. Soil Amendment Using Biochar and Application of K-Humate Enhance the Growth, Productivity, and Nutritional Value of Onion (*Allium cepa* L.) under Deficit Irrigation Conditions // Plants. 2021. Vol. 10. No. 12. A.2598. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants10122598>.
- Alharbi K., Rashwan E., Hafez E., Omara A.E., Mohamed H.H., Alshaal T. Potassium Humate and Plant Growth-Promoting Microbes Jointly Mitigate Water Deficit Stress in Soybean Cultivated in Salt-Affected Soil // Plants. 2022. Vol. 11. No. 22. A.3016. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants11223016>.
- Ansari M.S., Ahmad G., Khan A.A., Mohamed H.I. Coal fly ash application as an eco-friendly approach for modulating the growth, yield, and biochemical constituents of *Withania somnifera* L. plants. Environmental science and pollution research international. 2023. Vol. 30. No. 37. P. 87958–87980. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-023-28318-x>.
- Bergmann G.T., Bates S.T., Eilers K.G., Lauber C.L., Caporaso J.G., Walters W.A., Knight R., Fierer N. The under-recognized dominance of *Verrucomicrobia* in soil bacterial communities // Soil Biology and Biochemistry. 2011. Vol. 43. No. 7. P. 1450–1455. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.03.012>.
- Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft.: Richtlinie für den sachgerechten Einsatz von Pflanzenaschen zur Verwertung auf Land- und Forstwirtschaftlich genutzten Flächen. 2011. P. 74 (Guideline of the Austrian Agriculture Ministry for the adequate use of Biomass ashes in agricultural and forestry areas) [Электронный ресурс]. URL: <https://www.bmnt.gv.at/land/produktion-maerkte/pflanzlich-e-produktion/boden-duengung/Bodenschutz.html> (дата обращения 29.09.2023).
- Burdick E.M. Commercial humates for agriculture and the fertilizer industry // Economic Botany. 1965. Vol. 19. P. 152–156. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02862826>.
- Ceronio G.M., van Tonder J.T., du Preez C.C. Is Application of Commercial Potassium Humates Beneficial to Soil and Wheat? // South African Journal of Plant and Soil. 2022. Vol. 39. No. 2. P. 123–131. DOI: [10.1080/02571862.2021.2000051](https://doi.org/10.1080/02571862.2021.2000051).
- Chen M., Xu J., Li Z., Zhao B., Zhang J. Soil physicochemical properties and bacterial community composition jointly affect crop yield // Agronomy Journal. 2020. Vol. 112. No. 5. P. 4358–4372. DOI: <https://doi.org/10.1002/agj2.20358>.
- Chen Y., Huizi M., Zhang Y., Zhang G., Li C., Ye Y., Zhang R., Shi J., Li Z., Tian X., Wang Y. Impact of ZnSO₄ and ZnEDTA applications on wheat Zn biofortification, soil Zn fractions and bacterial community: Significance for public health and agroecological environment // Applied Soil Ecology. 2022. Vol. 176. P. 104484. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2022.104484>.
- Cordero Elvia J., de Freitas J. R., Germida J. J. Bacterial Microbiomes Associated with the Rhizosphere, Root Interior, and Aboveground Plant Organs of Wheat and Canola at Different Growth Stages // Phytobiomes Journal. 2021. Vol. 5. No. 4. P. 442–451. DOI: <https://doi.org/10.1094/PBIOMES-10-20-0073-R>.

- da Silva Lima L., Olivares F.L., Rodrigues de Oliveira R., Vega M.R.G., Aguiar N.O., Canellas L.P. Root exudate profiling of maize seedlings inoculated with *Herbaspirillum seropedicae* and humic acids // Chemical and Biological Technologies in Agriculture. 2014. Vol. 1. No. 1. P. 23–23. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40538-014-0023-z>.
- Ding J., Jiang X. M. M., Zho B., Gua D., Zha B., Zhou J., Cao F., Li L., Li J. Effect of 35 years inorganic fertilizer and manure amendment on structure of bacterial and archaeal communities in black soil of northeast China // Applied Soil Ecology. 2016. Vol. 105. P. 187–195. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2016.04.010>.
- Dong W., Liu E., Yan C., Tian J., Zhang H., Zhang Y. Impact of no tillage vs. conventional tillage on the soil bacterial community structure in a winter wheat cropping succession in northern China // European Journal of Soil Biology. 2017. Vol. 80. P. 35–42. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2017.03.001>.
- Edgar R.C. Search and clustering orders of magnitude faster than BLAST // Bioinformatics. 2010. Vol. 26. No. 19. P. 2460–2461. DOI: <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btq461>.
- Edgar R.C. UPARSE: highly accurate OTU sequences from microbial amplicon reads // Nature Methods. 2013. Vol. 10. P. 996–998. DOI: <https://doi.org/10.1038/nmeth.2604>.
- Edgar R.C. UNOISE2: Improved error-correction for Illumina 16S and ITS amplicon reads // bioRxiv. 2016a. DOI: <https://doi.org/10.1101/081257>.
- Edgar R.C. SINTAX, a Simple Non-Bayesian Taxonomy Classifier for 16S and ITS Sequences // bioRxiv. 2016b. DOI: <https://doi.org/10.1101/074161>.
- Ertani A., Francioso O., Tugnoli V., Righi V., Nardi S. Effect of commercial lignosulfonate-humate on *Zea mays* L. metabolism // Journal of Agriculture and Food Chemistry. 2011. Vol. 59. No. 22. P. 11940–11948. DOI: <https://doi.org/10.1021/jf202473e>.
- Fadrosh D.W., Ma B., Gajer P., Gajer P., Sengamalay, N., Ott, S., Brotman R.M., Ravel J. An improved dual-indexing approach for multiplexed 16S rRNA gene sequencing on the Illumina MiSeq platform // Microbiome. 2014. Vol. 2. A.6. DOI: <https://doi.org/10.1186/2049-2618-2-6>.
- Feoktistova A., Timergalin M., Chetverikov S., Nazarov A., Kudoyarova G. Effects on *Pseudomonas plecoglossicida* 2,4-D and Humic Substances on the Growth, Pigment Indices and Concentration of Hormones in Wheat Seedlings Grown under Water Deficit // Microorganisms. 2023. Vol. 11. No. 3. A.549. DOI: <https://doi.org/10.3390/microorganisms11030549>.
- García-Sánchez F., Simón-Grao S., Navarro-Pérez V., Alfosea-Simón M. Scientific Advances in Biostimulation Reported in the 5th Biostimulant World Congress // Horticulturae. 2022. Vol. 8. No. 7. P. 665. DOI: <https://doi.org/10.3390/horticulturae8070665>.
- Gosal S.K., Saroa G. S., Vika, Y., Cameotr, S. S., Pathani, N., Bhanot A. Isolation and molecular characterisation of diazotrophic growth-promoting bacteria from wheat rhizospheric soils of Punjab // Soil Research. 2011. Vol. 49. No. 8. P. 725–732. DOI: <https://doi.org/10.1071/SR11136>.
- Hammer O., Harper D.A.T., Ryan P.D. PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis // Palaeontologia Electronica. 2001. Vol. 4. P. 9.
- He Y., Wang D., Liu K., Deng S., Liu Y. Sodium humate alleviates LPS-induced intestinal barrier injury by improving intestinal immune function and regulating gut microbiota // Molecular Immunology. 2023. Vol. 161. P. 61–73. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.molimm.2023.07.012>.
- Hegab R.H., Eissa D., Abou-Shady A. Effects of foliar application of selenium and potassium-humate on oat growth in Baloza, North Sinai, Egypt // Scientific Reports. 2022. Vol. 12. No. 1. P. 15119. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-19229-x>.
- Hong C., Su Y., Lu S. Phosphorus availability changes in acidic soils amended with biochar, fly ash, and lime determined by diffusive gradients in thin films (DGT) technique // Environmental Science and Pollution Research International. 2018. Vol. 25. No. 30. P. 30547–30556. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3086-8>.
- Hou K., Lu C., Shi B., Xiao Z., Wang X., Zhang J., Cheng C., Ma J., Du Z., Li B., Zhu L. Evaluation of agricultural soil health after applying pyraclostrobin in wheat/maize rotation field based on the response of soil microbes // Agriculture, Ecosystems and Environment. 2022. Vol. 340. P. 108186. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2022.108186>.
- Ikunaga Y., Sato I., Grond S., Numaziri N., Yoshida S., Yamaya H., Hiradate S., Hasegawa M., Toshima H., Koitabashi M., Ito M., Karlovsky P., Tsushima S. *Nocardioide* sp. strain WSN05-2, isolated from a wheat field, degrades deoxynivalenol, producing the novel intermediate 3-epi-deoxynivalenol // Applied Microbiology and Biotechnology. 2011. Vol. 89. No. 2. P. 419–427. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00253-010-0729-1>.

- Innerebner G., Knief C., Vorholt J. A. Protection of *Arabidopsis thaliana* against Leaf-Pathogenic *Pseudomonas syringae* by *Sphingomonas* Strains in a Controlled Model System // *Applied and Environmental Microbiology*. 2011. Vol. 77. No. 10. P. 3202–3210. DOI: <https://doi.org/10.1128/AEM.00133-11>.
- Jin Q., Zhang Y., Wang Q., Li M., Sun H., Liu N., Zhang L., Zhang Y., Liu, Z. Effects of potassium fulvic acid and potassium humate on microbial biodiversity in bulk soil and rhizosphere soil of *Panax ginseng* // *Microbiological research*. 2022. Vol. 254. P. 126914. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.micres.2021.126914>.
- Kaplan H., Ratering S., Felix-Henningsen P., Schnell S. Stability of in situ immobilization of trace metals with different amendments revealed by microbial ¹³C-labelled wheat root decomposition and efflux-mediated metal resistance of soil bacteria // *Science of the Total Environment*. 2019. Vol. 659. P. 1082–1089. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.441>.
- Kemgro Crop Solutions, Waikerie, South Australia. [Электронный ресурс]. URL: <https://kemgro.com.au/wp-content/uploads/2021/12/Kemgro-Humic26-brochure3.pdf> (дата обращения 29.09.2023).
- Lee C.H., Lee Y.B., Lee H., Kim P.J. Reducing phosphorus release from paddy soils by a fly ash-gypsum mixture // *Bioresource technology*. 2007. Vol. 98. No. 10. P. 1980–1984. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.07.050>.
- Liu M., Wang C., Wang F., Xie Y. Vermicompost and humic fertilizer improve coastal saline soil by regulating soil aggregates and the bacterial community // *Archiv für Acker- und Pflanzenbau und Bodenkunde*. 2019. Vol. 65. No. 3. P. 281–293. DOI: <https://doi.org/10.1080/03650340.2018.1498083>.
- Lyons G., Genc Y. Commercial Humates in Agriculture: Real Substance or Smoke and Mirrors? // *Agronomy*. 2016. Vol. 6. No. 4. A.50. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy6040050>.
- Naumova N.B., Belanov I.P., Alikina T.Y., Kabilov M.R. Undisturbed Soil Pedon under Birch Forest: Characterization of Microbiome in Genetic Horizons // *Soil Systems*. 2021. Vol. 5. No. 1. A.14. DOI: <https://doi.org/10.3390/soilsystems5010014>.
- Noskov Y.A., Kabilov M.R., Polenogova O.V., Yurchenko Y.A., Belevich O.E., Yaroslavtseva O.N., Alikina T.Y., Byvaltsev A.M., Rotskaya U.N., Morozova V.V., Glupov V.V., Kryukov V.Y. A Neurotoxic Insecticide Promotes Fungal Infection in *Aedes aegypti* Larvae by Altering the Bacterial Community // *Microbial Ecology*. 2021. Vol. 8. P. 493–505. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00248-020-01567-w>.
- Ondrasek G., Romić D., Tanaskovik V., Savić R., Rathod S., Horvatinec J., Rengel Z. Humates mitigate Cd uptake in the absence of NaCl salinity, but combined application of humates and NaCl enhances Cd mobility & phyto-accumulation // *Science of the Total Environment*. 2022. Vol. 847. P. 157649. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157649>.
- Ouni Y., Ghnaya T., Montemurro F., Abdelly C., Lakhdar A. The role of humic substances in mitigating the harmful effects of soil salinity and improve plant productivity // *International Journal of Plant Production*. 2014. Vol. 8. No. 3. P. 353–374. DOI: <https://doi.org/10.22069/IJPP.2014.1614>.
- Panova I., Demidov V.V., Shulga P.S., Ilyasov L.O., Butilkina M.A., Yaroslavov A. A. Interpolyelectrolyte complexes as effective structure-forming agents for Chernozem soil // *Land Degradation and Development*. 2021. Vol. 32. No. 2. P. 1022–1033. DOI: <https://doi.org/10.1002/ldr.3743>.
- Praeg N., Seeber J., Leitinger G., Tasser E., Newesely C., Tappeiner U., Illmer P. The role of land management and elevation in shaping soil microbial communities: Insights from the Central European Alps // *Soil Biology and Biochemistry*. 2020. Vol. 150. P. 107951. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.107951>.
- Relict Organics, ООО НПП «Генезис». [Электронный ресурс]. URL: <https://relictorganics.com/relictp> (дата обращения 29.09.2023).
- Sangwan P., Kovac S., Davis K. E. R., Sait M., Janssen P. H. Detection and Cultivation of Soil *Verrucomicrobia* // *Applied and Environmental Microbiology*. 2005. Vol. 71. No. 12. P. 8402–8410. DOI: <https://doi.org/10.1128/AEM.01633-05>.
- Suliman A.M., Idris A., Alanazi N., Alshammari N., Alshammari A., Kahrizi S., Al-Azmi M. The Different Ecological, Medical, and Industrial Important Bacteria Harboring the Soil of Hail, Kingdom of Saudi Arabia // *Cellular and Molecular Biology*. 2022. Vol. 68. No. 9. P. 40–44. DOI: <https://doi.org/10.14715/cmb/2022.68.9.6>.
- Ullah A., Ali M., Shahzad K., Ahmad F., Iqbal S., Rahman M. H. U., Ahmad S., Iqbal M. M., Danish S., Fahad S., Alkahtani J., Soliman Elshikh M., Datta R. Impact of Seed Dressing and Soil Application of Potassium Humate on Cotton Plants Productivity and Fiber Quality // *Plants*. 2020. Vol. 9. No. 11. A.1444. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants9111444>.
- van Rensburg CE. The Antiinflammatory Properties of Humic Substances: A Mini Review // *Phytotherapy Research*. 2015. Vol. 29. No. 6. P. 791–795. DOI: <https://doi.org/10.1002/ptr.5319>.

- Wang D., You Z., Du Y., Zheng D., Jia H., Liu Y. Influence of Sodium Humate on the Growth Performance, Diarrhea Incidence, Blood Parameters, and Fecal Microflora of Pre-Weaned Dairy Calves // *Animals*. 2022. Vol. 12. No. 1. P. 123. DOI: <https://doi.org/10.3390/ani12010123>.
- Wang Q., Garrity G.M., Tiedje J.M., Cole J.R. Naïve Bayesian Classifier for Rapid Assignment of rRNA Sequences into the New Bacterial Taxonomy // *Applied and Environmental Microbiology*. 2007. Vol. 73. P. 5261–5267. DOI: <https://doi.org/10.1128/AEM.00062-07>.
- Wen T., Ding Z., Thomashow L. S., Hale L., Yang S., Xie P., Liu X., Wang H., Shen Q., Yuan J. Deciphering the mechanism of fungal pathogen-induced disease-suppressive soil // *New Phytologist*. 2023. Vol. 238. No. 6. P. 2634–2650. DOI: <https://doi.org/10.1111/nph.18886>.
- Whitton M. M., Ren X., Yu S. J., Irving A. D., Trotter T., Bajagai Y. S., Stanley D. Humate application alters microbiota-mineral interactions and assists in pasture dieback recovery // *Heliyon*. 2023. Vol. 9. No. 2. P. e13327. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13327>.
- Xu Y., Ge Y., Lou Y., Meng J., Shi L., Xia F. Assembly strategies of the wheat root-associated microbiome in soils contaminated with phenanthrene and copper // *Journal of Hazardous Materials*. 2021. Vol. 412. P. 125340. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125340>.
- Yörük M.A., Gül M., Hayirli A., Macit M. The effects of supplementation of humate and probiotic on egg production and quality parameters during the late laying period in hens // *Poultry Science*. 2004. Vol. 83. No. 1. P. 84–88. DOI: <https://doi.org/10.1093/ps/83.1.84>.
- Zhang Y., Zhang M., Tang L., Che R., Chen H., Blumfield T., Boyd S., Nouansyong M., Xu Z. Long-Term Harvest Residue Retention Could Decrease Soil Bacterial Diversities Probably Due to Favouring Oligotrophic Lineages // *Microbial Ecology*. 2018. Vol. 76. No. 3. P. 771–781. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00248-018-1162-8>.
- Zhang F., Xu N., Zhang Z., Zhang Q., Yang Y., Yu Z., Sun L., Lu T., Qian H. Shaping effects of rice, wheat, maize, and soybean seedlings on their rhizosphere microbial community // *Environmental Science and Pollution Research International*. 2023. Vol. 30. No. 13. P. 35972–35984. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-022-24835-3>.
- Zhilkibayev O., Aitbayev T. E., Zhirkova A. M., Perminova I.V., Popov A.I., Shoinbekova S. A., Kudaibergenov M. S., Shalmaganbetov K. M. The Coal Humic Product EldORost Shows Fertilizing and Growth Stimulating Properties on Diverse Agricultural Crops // *Agronomy*. 2022. Vol. 12. No. 12. P. 3012. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy12123012>.
- Zhuo L., Li H., Cheng F., Shi Y., Zhang Q., Shi W. Co-remediation of cadmium-polluted soil using stainless steel slag and ammonium humate // *Environmental Science and Pollution Research International*. 2011. Vol. 19. No. 7. P. 2842–2848. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-012-0790-7>.

Поступила в редакцию 06.10.2023

Принята 23.11.2023

Опубликована 24.11.2023

Сведения об авторах:

Наумова Наталья Борисовна – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории агрохимии Института почвоведения и агрохимии СО РАН (г. Новосибирск, Россия); naumova@issa-siberia.ru

Беланов Иван Петрович – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории рекультивации Института почвоведения и агрохимии СО РАН (г. Новосибирск, Россия); belanov@issa-siberia.ru

Савенков Олег Александрович – кандидат биологических наук, научный сотрудник лаборатории агрохимии Института почвоведения и агрохимии СО РАН (г. Новосибирск, Россия); savenkov@issa-siberia.ru

Степанова Мария Викторовна – младший научный сотрудник лаборатории рекультивации Института почвоведения и агрохимии СО РАН (г. Новосибирск, Россия); maria44421@gmail.com

Щемелева Галина Витальевна – младший научный сотрудник лаборатории рекультивации Института почвоведения и агрохимии СО РАН (г. Новосибирск, Россия); shgv95@mail.ru

Батурина Ольга Анатольевна – младший научный сотрудник ЦКП «Геномика» Института химической биологии и фундаментальной медицины СО РАН (г. Новосибирск, Россия); baturina@niboch.nsc.ru

Кабиллов Марсель Расимович – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник ЦКП «Геномика» Института химической биологии и фундаментальной медицины СО РАН (г. Новосибирск, Россия); kabilov@niboch.nsc.ru

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.



Статья доступна по лицензии [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

SOIL AND RHIZOSPHERE BACTERIOBIOME OF WHEAT UNDER COMBINED HUMATE AND FLY ASH APPLICATION

© 2023 N. B. Naumova ¹, I. P. Belanov ¹, O. A. Savenkov ¹, M. V. Stepanova¹, G. V. Shemeleva ¹,
O. A. Baturina ², M. R. Kabilov ²

¹Institute of Soil Science and Agrochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Lavrentieva 8/2, Novosibirsk 630090, Russia. E-mail: naumova@issa-siberia.ru

²Institute of Chemical Biology and Fundamental Medicine, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Lavrentieva 8, Novosibirsk 630090, Russia. E-mail: kabilov@niboch.nsc.ru

The aim of the study was to examine the effect of low rate of potassium humate application with and without fly ash (FA) on wheat roots rhizosphere bacteriobiome.

Location and time of the study. The microplot field experiment was conducted in three replicates in randomized design in 2022 in Novosibirsk (Russia).

Methods. Soil physical and chemical properties were determined by commonly used methods. Bacteriobiome structure and diversity were estimated by 16S rRNA genes (V3-V4 region) by metabarcoding.

Results. The study revealed large bacteriobiome diversity: on average 2472 and 2330 operational taxonomic units (OTU) in bulk and rhizosphere soil respectively. Overall 9120 OTUs were found, belonging to 929 genera, 438 families, 416 orders, 104 classes and 37 phyla. A quarter of the total OTUs number belonged to the Proteobacteria phylum; Actinobacteria phylum ranked second in OTUs number (10%), whereas Firmicutes, Bacteroidetes and Acidobacteria each accounted for 8% of the total OTUs number. The Actinobacteria dominated in the relative abundance of the total number of sequence reads (38–41%), with Proteobacteria (25–28%) and Acidobacteria (10–13%) following. The treatment with potassium humate without fly ash did not influence the relative abundance of genera in the bulk soil, but increased twofold the relative abundance of the genus when combined with FA. In the rhizosphere soil bacteriobiome potassium humate without FA increased the *Nocardioideae* relative abundance 1.8 times, whereas in combination with FA increased *Sphingomonas* and decreased *Spartobacteria_gis* relative abundance.

Conclusions. Potassium humate treatment at a low rate resulted in small, but positive changes in soil and rhizosphere bacteriobiome despite the huge bacterial diversity, inherent for practically any soil, including the one used in this study. The effect of exogenic humate treatment involves a complex of various mechanisms, and detailed physiological and biochemical studies and meta-analysis of the published data are needed to understand the effect of low rate humate application on soil, plants and microorganisms.

Key words: biodiversity; soil bacteria; rhizosphere; wheat roots.

How to cite: Naumova N.B., Belanov I.P., Savenkov O.A., Stepanova M.V., Shemeleva G.V., Baturina O.A., Kabilov M.R. Soil and rhizosphere bacteriobiome of wheat under combined humate and fly ash application // *The Journal of Soils and Environment*. 2023. 6(3). e218. DOI: [10.31251/pos.v6i3.218](https://doi.org/10.31251/pos.v6i3.218). (in Russian with English abstract).

FUNDING

The study was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (projects 121031700309-1 and 121031300042-1).

REFERENCES

- Arinushkina E.V. A Manual for Soil Chemical Analyses. Moscow: Moscow University Publishers, 1970. 488 p. (in Russian).
- Kachinsky N.A. Soil Mechanical and Microaggregate Composition and Methods for Studying it. Moscow: USSR Academy of Sciences, 1958. 193 p. (in Russian).

- Nevenchannaya N.M., Gindemit A.M. Efficiency of Ash and Slag Materials in Cucumber Growing on Meadow-Chernozemic Soil. Agriculture and Crop Production. 2018. Vol. 32. No. 10. P. 37–40. DOI: [10.24411/0235-2451-2018-11008](https://doi.org/10.24411/0235-2451-2018-11008). (in Russian).
- Paleev P.L., Khudyakova L.I. The Use of Fly Ash Waste in Agriculture. XXI Century. Technosphere Safety. 2021. Vol. 6. No. 4. P. 348–356. DOI: [10.21285/2500-1582-2021-4-348-356](https://doi.org/10.21285/2500-1582-2021-4-348-356). (in Russian).
- Petrova T.A., Rudzish E. Types of soil improvers for reclamation of mining-disturbed lands. MIAB. Mining informational and analytical bulletin. 2021. Vol. 4. P. 100–112. DOI: [10.25018/0236_1493_2021_4_0_100](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_4_0_100). (in Russian).
- Shishelova T.I., Samuseva M.N. The Use of Fly Ash from IrkutskEnergo thermo- and Electricity-Generating Station for chemical melioration of acidic soils. Advances in current natural sciences. 2004. No. 12. P. 85–86. URL: <https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=13826> (accessed on 18.09.2023). (in Russian).
- Abdelrasheed K.G., Mazrou Y., Omara A.E., Osman H.S., Nehela Y., Hafez E.M., Rady A.M.S., El-Moneim D.A., Alowaiesh B.F., Gowayed S.M. Soil Amendment Using Biochar and Application of K-Humate Enhance the Growth, Productivity, and Nutritional Value of Onion (*Allium cepa* L.) under Deficit Irrigation Conditions. Plants. 2021. Vol. 10. No. 12. A.2598. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants10122598>.
- Alharbi K., Rashwan E., Hafez E., Omara A.E., Mohamed H.H., Alshaal T. Potassium Humate and Plant Growth-Promoting Microbes Jointly Mitigate Water Deficit Stress in Soybean Cultivated in Salt-Affected Soil. Plants. 2022. Vol. 11. No. 22. A.3016. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants11223016>.
- Ansari M.S., Ahmad G., Khan A.A., Mohamed H.I. Coal fly ash application as an eco-friendly approach for modulating the growth, yield, and biochemical constituents of *Withania somnifera* L. plants. Environmental science and pollution research international. 2023. Vol. 30. No. 37. P. 87958–87980. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-28318-x>.
- Bergmann G.T., Bates S.T., Eilers K.G., Lauber C.L., Caporaso J.G., Walters W.A., Knight R., Fierer N. The under-recognized dominance of *Verrucomicrobia* in soil bacterial communities. Soil Biology and Biochemistry. 2011. Vol. 43. No. 7. P. 1450–1455. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.03.012>.
- Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft.: Richtlinie für den sachgerechten Einsatz von Pflanzenaschen zur Verwertung auf Land- und Forstwirtschaftlich genutzten Flächen. 2011. P. 74 (Guideline of the Austrian Agriculture Ministry for the adequate use of Biomass ashes in agricultural and forestry areas) [Электронный ресурс]. URL: <https://www.bmnt.gv.at/land/produktion-maerkte/pflanzliche-produktion/boden-duengung/Bodenschutz.html> (accessed on 29.09.2023).
- Burdick E.M. Commercial humates for agriculture and the fertilizer industry. Economic Botany. 1965. Vol. 19. P. 152–156. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02862826>.
- Ceronio G.M., van Tonder J.T., du Preez C.C. Is Application of Commercial Potassium Humates Beneficial to Soil and Wheat? South African Journal of Plant and Soil. 2022. Vol. 39. No. 2. P. 123–131. DOI: [10.1080/02571862.2021.2000051](https://doi.org/10.1080/02571862.2021.2000051).
- Chen M., Xu J., Li Z., Zhao B., Zhang J. Soil physicochemical properties and bacterial community composition jointly affect crop yield. Agronomy Journal. 2020. Vol. 112. No. 5. P. 4358–4372. DOI: <https://doi.org/10.1002/agj2.20358>.
- Chen Y., Huizi M., Zhang Y., Zhang G., Li C., Ye Y., Zhang R., Shi J., Li Z., Tian X., Wang Y. Impact of ZnSO₄ and ZnEDTA applications on wheat Zn biofortification, soil Zn fractions and bacterial community: Significance for public health and agroecological environment. Applied Soil Ecology. 2022. Vol. 176. P. 104484. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2022.104484>.
- Cordero Elvia J., de Freitas J.R., Germida J.J. Bacterial Microbiomes Associated with the Rhizosphere, Root Interior, and Aboveground Plant Organs of Wheat and Canola at Different Growth Stages. Phytobiomes Journal. 2021. Vol. 5. No. 4. P. 442–451. DOI: <https://doi.org/10.1094/PBIOMES-10-20-0073-R>.
- da Silva Lima L., Olivares F. L., Rodrigues de Oliveira R., Vega M. R. G., Aguiar N. O., Canellas L. P. Root exudate profiling of maize seedlings inoculated with *Herbaspirillum seropedicae* and humic acids. Chemical and Biological Technologies in Agriculture. 2014. Vol. 1. No. 1. P. 23–23. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40538-014-0023-z>.
- Ding J., Jiang X.M.M., Zho B., Gua D., Zha B., Zhou J., Cao F., Li L., Li J. Effect of 35 years inorganic fertilizer and manure amendment on structure of bacterial and archaeal communities in black soil of northeast China. Applied Soil Ecology. 2016. Vol. 105. P. 187–195. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2016.04.010>.
- Dong W., Liu E., Yan C., Tian J., Zhang H., Zhang Y. Impact of no tillage vs. conventional tillage on the soil bacterial community structure in a winter wheat cropping succession in northern China. European Journal of Soil Biology. 2017. Vol. 80. P. 35–42. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2017.03.001>.

- Edgar R.C. Search and clustering orders of magnitude faster than BLAST. *Bioinformatics*. 2010. Vol. 26. No. 19. P. 2460–2461. DOI: <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btq461>.
- Edgar R.C. UPARSE: highly accurate OTU sequences from microbial amplicon reads. *Nature Methods*. 2013. Vol. 10. P. 996–998. DOI: <https://doi.org/10.1038/nmeth.2604>.
- Edgar R.C. UNOISE2: Improved error-correction for Illumina 16S and ITS amplicon reads. *bioRxiv*. 2016a. DOI: <https://doi.org/10.1101/081257>.
- Edgar R.C. SINTAX, a Simple Non-Bayesian Taxonomy Classifier for 16S and ITS Sequences. *bioRxiv*. 2016b. DOI: <https://doi.org/10.1101/074161>.
- Ertani A., Francioso O., Tugnoli V., Righi V., Nardi S. Effect of commercial lignosulfonate-humate on *Zea mays* L. metabolism. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*. 2011. Vol. 59. No. 22. P. 11940–11948. DOI: <https://doi.org/10.1021/jf202473e>.
- Fadrosh D.W., Ma B., Gajer P., Gajer P., Sengamalai, N., Ott, S., Brotman R.M., Ravel J. An improved dual-indexing approach for multiplexed 16S rRNA gene sequencing on the Illumina MiSeq platform. *Microbiome*. 2014. Vol. 2. A.6. DOI: <https://doi.org/10.1186/2049-2618-2-6>.
- Feoktistova A., Timergalin M., Chetverikov S., Nazarov A., Kudoyarova G. Effects of Pseudomonas plecoglossicida 2,4-D and Humic Substances on the Growth, Pigment Indices and Concentration of Hormones in Wheat Seedlings Grown under Water Deficit. *Microorganisms*. 2023. Vol. 11. No. 3. A.549. DOI: <https://doi.org/10.3390/microorganisms11030549>.
- García-Sánchez F., Simón-Grao S., Navarro-Pérez V., Alfosea-Simón M. Scientific Advances in Biostimulation Reported in the 5th Biostimulant World Congress. *Horticulturae*. 2022. Vol. 8. No. 7. P. 665. DOI: <https://doi.org/10.3390/horticulturae8070665>.
- Gosal S.K., Saroa G. S., Vika, Y., Cameotr, S. S., Pathani, N., Bhanot A. Isolation and molecular characterisation of diazotrophic growth-promoting bacteria from wheat rhizospheric soils of Punjab. *Soil Research*. 2011. Vol. 49. No. 8. P. 725–732. DOI: <https://doi.org/10.1071/SR11136>.
- Hammer O., Harper D.A.T., Ryan P.D. PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis. *Palaeontologia Electronica*. 2001. Vol. 4. P. 9.
- He Y., Wang D., Liu K., Deng S., Liu Y. Sodium humate alleviates LPS-induced intestinal barrier injury by improving intestinal immune function and regulating gut microbiota. *Molecular Immunology*. 2023. Vol. 161. P. 61–73. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.molimm.2023.07.012>.
- Hegab R.H., Eissa D., Abou-Shady A. Effects of foliar application of selenium and potassium-humate on oat growth in Baloza, North Sinai, Egypt. *Scientific Reports*. 2022. Vol. 12. No. 1. P. 15119. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-19229-x>.
- Hong C., Su Y., Lu S. Phosphorus availability changes in acidic soils amended with biochar, fly ash, and lime determined by diffusive gradients in thin films (DGT) technique. *Environmental Science and Pollution Research International*. 2018. Vol. 25. No. 30. P. 30547–30556. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3086-8>.
- Hou K., Lu C., Shi B., Xiao Z., Wang X., Zhang J., Cheng C., Ma J., Du Z., Li B., Zhu L. Evaluation of agricultural soil health after applying pyraclostrobin in wheat/maize rotation field based on the response of soil microbes. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 2022. Vol. 340. P. 108186. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2022.108186>.
- Ikunaga Y., Sato I., Grond S., Numaziri N., Yoshida S., Yamaya H., Hiradate S., Hasegawa M., Toshima H., Koitabashi M., Ito M., Karlovsky P., Tsushima S. *Nocardioide* sp. strain WSN05-2, isolated from a wheat field, degrades deoxynivalenol, producing the novel intermediate 3-epi-deoxynivalenol. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2011. Vol. 89. No. 2. P. 419–427. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00253-010-0729-1>.
- Innerebner G., Knief C., Vorholt J.A. Protection of *Arabidopsis thaliana* against Leaf-Pathogenic *Pseudomonas syringae* by *Sphingomonas* Strains in a Controlled Model System. *Applied and Environmental Microbiology*. 2011. Vol. 77. No. 10. P. 3202–3210. DOI: <https://doi.org/10.1128/AEM.00133-11>.
- Jin Q., Zhang Y., Wang Q., Li M., Sun H., Liu N., Zhang L., Zhang Y., Liu, Z. Effects of potassium fulvic acid and potassium humate on microbial biodiversity in bulk soil and rhizosphere soil of *Panax ginseng*. *Microbiological research*. 2022. Vol. 254. P. 126914. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.micres.2021.126914>.
- Kaplan H., Ratering S., Felix-Henningsen P., Schnell S. Stability of in situ immobilization of trace metals with different amendments revealed by microbial ¹³C-labelled wheat root decomposition and efflux-mediated metal resistance of soil bacteria // *Science of the Total Environment*. 2019. Vol. 659. P. 1082–1089. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.441>.

- Kemgro Crop Solutions, Waikerie, South Australia. [Electronic resource]. URL: <https://kemgro.com.au/wp-content/uploads/2021/12/Kemgro-Humic26-brochure3.pdf> (accessed on 29.09.2023).
- Lee C. H., Lee Y. B., Lee H., Kim P. J. Reducing phosphorus release from paddy soils by a fly ash-gypsum mixture. *Bioresource technology*. 2007. Vol. 98. No. 10. P. 1980–1984. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.07.050>.
- Liu M., Wang, C., Wang, F., & Xie, Y. Vermicompost and humic fertilizer improve coastal saline soil by regulating soil aggregates and the bacterial community. *Archiv für Acker- und Pflanzenbau und Bodenkunde*. 2019. Vol. 65. No. 3. P. 281–293. DOI: <https://doi.org/10.1080/03650340.2018.1498083>.
- Lyons G., Genc Y. Commercial Humates in Agriculture: Real Substance or Smoke and Mirrors? *Agronomy*. 2016. Vol. 6. No. 4. A.50. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy6040050>.
- Naumova N.B., Belanov I.P., Alikina T.Y., Kabilov M.R. Undisturbed Soil Pedon under Birch Forest: Characterization of Microbiome in Genetic Horizons. *Soil Systems*. 2021. Vol. 5. No. 1. A.14. DOI: <https://doi.org/10.3390/soilsystems5010014>.
- Noskov Y.A., Kabilov M.R., Polenogova O.V., Yurchenko Y.A., Belevich O.E., Yaroslavtseva O.N., Alikina T.Y., Byvaltsev A.M., Rotskaya U.N., Morozova V.V., Glupov V.V., Kryukov V.Y. A Neurotoxic Insecticide Promotes Fungal Infection in *Aedes aegypti* Larvae by Altering the Bacterial Community. *Microbial Ecology*. 2021. Vol. 8. P. 493–505. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00248-020-01567-w>.
- Ondrasek G., Romić D., Tanasković V., Savić R., Rathod S., Horvatinec J., Rengel Z. Humates mitigate Cd uptake in the absence of NaCl salinity, but combined application of humates and NaCl enhances Cd mobility & phyto-accumulation. *Science of the Total Environment*. 2022. Vol. 847. P. 157649. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157649>.
- Ouni Y., Ghnaya T., Montemurro F., Abdelly C., Lakhdar A. The role of humic substances in mitigating the harmful effects of soil salinity and improve plant productivity. *International Journal of Plant Production*. 2014. Vol. 8. No. 3. P. 353–374. DOI: <https://doi.org/10.22069/IJPP.2014.1614>.
- Panova I., Demidov V.V., Shulga P.S., Ilyasov L.O., Butilkina M.A., Yaroslavov A. A. Interpolyelectrolyte complexes as effective structure-forming agents for Chernozem soil. *Land Degradation and Development*. 2021. Vol. 32. No. 2. P. 1022–1033. DOI: <https://doi.org/10.1002/ldr.3743>.
- Praeg N., Seeber J., Leitinger G., Tasser E., Newesely C., Tappeiner U., Illmer P. The role of land management and elevation in shaping soil microbial communities: Insights from the Central European Alps. *Soil Biology and Biochemistry*. 2020. Vol. 150. P. 107951. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.107951>.
- Relict Organics, ООО НПП «Генезис». [Electronic resource] URL: <https://relictorganics.com/relictp> (accessed on 29.09.2023).
- Sangwan P., Kovac S., Davis K. E. R., Sait M., Janssen P. H. Detection and Cultivation of Soil *Verrucomicrobia*. *Applied and Environmental Microbiology*. 2005. Vol. 71. No. 12. P. 8402–8410. DOI: <https://doi.org/10.1093/aem/71.12.8402>.
- Suliman A.M., Idris A., Alanazi N., Alshammari N., Alshammari A., Kahrizi S., Al-Azmi M. The Different Ecological, Medical, and Industrial Important Bacteria Harboring the Soil of Hail, Kingdom of Saudi Arabia. *Cellular and Molecular Biology*. 2022. Vol. 68. No. 9. P. 40–44. DOI: <https://doi.org/10.14715/cmb/2022.68.9.6>.
- Ullah A., Ali M., Shahzad K., Ahmad F., Iqbal S., Rahman M. H. U., Ahmad S., Iqbal M. M., Danish S., Fahad S., Alkahtani J., Soliman Elshikh M., Datta R. Impact of Seed Dressing and Soil Application of Potassium Humate on Cotton Plants Productivity and Fiber Quality. *Plants*. 2020. Vol. 9. No. 11. A.1444. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants9111444>.
- van Rensburg CE. The Antiinflammatory Properties of Humic Substances: A Mini Review. *Phytotherapy Research*. 2015. Vol. 29. No. 6. P. 791–795. DOI: <https://doi.org/10.1002/ptr.5319>.
- Wang D., You Z., Du Y., Zheng D., Jia H., Liu Y. Influence of Sodium Humate on the Growth Performance, Diarrhea Incidence, Blood Parameters, and Fecal Microflora of Pre-Weaned Dairy Calves. *Animals*. 2022. Vol. 12. No. 1. P. 123. DOI: <https://doi.org/10.3390/ani12010123>.
- Wang Q., Garrity G.M., Tiedje J.M., Cole J.R. Naïve Bayesian Classifier for Rapid Assignment of rRNA Sequences into the New Bacterial Taxonomy// *Applied and Environmental Microbiology*. 2007. Vol. 73. P. 5261–5267. DOI: <https://doi.org/10.1128/AEM.00062-07>.
- Wen T., Ding Z., Thomashow L. S., Hale L., Yang S., Xie P., Liu X., Wang H., Shen Q., Yuan J. Deciphering the mechanism of fungal pathogen-induced disease-suppressive soil. *New Phytologist*. 2023. Vol. 238. No. 6. P. 2634–2650. DOI: <https://doi.org/10.1111/nph.18886>.

Whitton M. M., Ren X., Yu S. J., Irving A. D., Trotter T., Bajagai Y. S., Stanley D. Humate application alters microbiota-mineral interactions and assists in pasture dieback recovery. *Heliyon*. 2023. Vol. 9. No. 2. P. e13327. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13327>.

Xu Y., Ge Y., Lou Y., Meng J., Shi L., Xia F. Assembly strategies of the wheat root-associated microbiome in soils contaminated with phenanthrene and copper. *Journal of Hazardous Materials*. 2021. Vol. 412. P. 125340. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125340>.

Yörük M.A., Gül M., Hayirli A., Macit M. The effects of supplementation of humate and probiotic on egg production and quality parameters during the late laying period in hens. *Poultry Science*. 2004. Vol. 83. No. 1. P. 84–88. DOI: <https://doi.org/10.1093/ps/83.1.84>.

Zhang Y., Zhang M., Tang L., Che R., Chen H., Blumfield T., Boyd S., Nouansyvong M., Xu Z. Long-Term Harvest Residue Retention Could Decrease Soil Bacterial Diversities Probably Due to Favouring Oligotrophic Lineages // *Microbial Ecology*. 2018. Vol. 76. No. 3. P. 771–781. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00248-018-1162-8>.

Zhang F., Xu N., Zhang Z., Zhang Q., Yang Y., Yu Z., Sun L., Lu T., Qian H. Shaping effects of rice, wheat, maize, and soybean seedlings on their rhizosphere microbial community. *Environmental Science and Pollution Research International*. 2023. Vol. 30. No. 13. P. 35972–35984. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-022-24835-3>.

Zhilikbayev O., Aitbayev T. E., Zhirkova A. M., Perminova I. V., Popov A. I., Shoinbekova S. A., Kudaibergenov M. S., Shalmaganbetov K. M. The Coal Humic Product EldORost Shows Fertilizing and Growth Stimulating Properties on Diverse Agricultural Crops. *Agronomy*. 2022. Vol. 12. No. 12. P. 3012. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy12123012>.

Zhuo L., Li H., Cheng F., Shi Y., Zhang Q., Shi W. Co-remediation of cadmium-polluted soil using stainless steel slag and ammonium humate. *Environmental Science and Pollution Research International*. 2011. Vol. 19. No. 7. P. 2842–2848. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-012-0790-7>.

Received 06 October 2023

Accepted 23 November 2023

Published 24 November 2023

About the authors:

Naumova Natalia Borisovna – Candidate of Biological Sciences, Leading Researcher in the Laboratory of Agrochemistry of the Institute of Soil Science and Agrochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia); naumova@issa-siberia.ru

Belanov Ivan Petrovich – Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher in the Laboratory of Recultivation of the Institute of Soil Science and Agrochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia); belanov@issa-siberia.ru

Savenkov Oleg Alexandrovich – Candidate of Biological Sciences, Researcher in the Laboratory of Agrochemistry of the Institute of Soil Science and Agrochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia); savenkov@issa-siberia.ru

Stepanova Maria Victorovna – Junior Researcher in the Laboratory of Recultivation of the Institute of Soil Science and Agrochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia); maria44421@gmail.com

Shemeleva Galina Vitalievna – Junior Researcher in the Laboratory of Recultivation of the Institute of Soil Science and Agrochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia); shgv95@mail.ru

Baturina Olga Anatolievna – Junior Researcher in Genomics Core Facility of Institute of Chemical Biology and Fundamental Medicine, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia). E-mail: baturina@niboch.nsc.ru

Kabilov Marsel Rasimovich – Candidate of Biological Science, Head of the Genomics Core Facility in the Institute of Chemical Biology and Fundamental Medicine, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia). E-mail: kabilov@niboch.nsc.ru

The authors read and approved the final manuscript



The article is available under [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)