

## Влияние микробного препарата на миграцию подвижных форм Pb в системе почва – озимая пшеница

Овсиенко О. Л., Чайковская Л. А., Баранская М. И.

Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Крыма  
Симферополь, Россия  
[olovsien@mail.ru](mailto:olovsien@mail.ru), [ludachaika@mail.ru](mailto:ludachaika@mail.ru), [baranskaya@rambler.ru](mailto:baranskaya@rambler.ru)

Среди наиболее распространенных загрязнителей окружающей среды тяжелые металлы (ТМ) занимают ведущее положение. Исследование мигрирующей способности ТМ в системе почва – растение и поиск приемов снижения их токсического действия, в частности в агроценозах, является приоритетным и актуальным. Цель проведенных исследований заключалась в определении влияния микробного препарата Фосфостим-Агро (биоагент – фосфатмобилизующая и ростстимулирующая бактерия – *Lelliottia nimipressuralis* ССМ 32-3) на миграцию водорастворимых форм Pb в системе чернозём южный – *Triticum aestivum*. В условиях полевого опыта в почву вносили раствор ацетата свинца из расчётов (по содержанию Pb), соответствующих уровням загрязнения: 5, 10 и 20 ПДК. Содержание подвижных форм свинца в образцах почвы, корней, соломы и зерна определяли методом атомно-абсорбционного анализа. Выявлено, что при загрязнении чернозема южного свинцом наибольшее количество его подвижных форм накапливалось в ризосфере (54–202 мг/кг) и мигрировало в корни (56–367 мг/кг) озимой пшеницы. Наименьшее содержание Pb, не превышающее ПДК (0,5 мг/кг), обнаружено в зерне *T. aestivum*: оно варьировало в пределах 0,05–0,3 мг/кг в зависимости от уровня загрязнения почвы. Применение микробного препарата Фосфостим-Агро для предпосевной обработки семян озимой пшеницы позволило снизить содержание подвижных форм свинца, как в прикорневой почве, так и в самих растениях. Выявлено, что в ризосфере инокулированных растений количественное содержание Pb снизилось на 5–25 %, а в корнях, соломе и зерне бактеризованных растений – на 18–21 %, 6–25 % и 10–25 % соответственно по сравнению с вариантами без обработки микробным препаратом.

*Ключевые слова:* *Triticum aestivum*, микробный препарат Фосфостим-Агро, свинец, ризосфера.

### ВВЕДЕНИЕ

Тяжелые металлы (ТМ), и в особенности их подвижные формы, являются экологически опасным фактором, влияющим на живые организмы (Титов, 2014). Избыточное накопление ТМ в объектах окружающей среды приводит к негативному воздействию токсикантов на экосистему в целом (Тёплая, 2013). Одним из основных концентраторов ТМ являются почвы, в которые поллютанты попадают из природных источников, а также в результате антропогенной деятельности (Ильин, 1991). Накапливаясь в грунте, ТМ активно воздействуют на мезофауну и микробиоту, а также могут мигрировать в растения, в том числе и сельскохозяйственные культуры (Ильин, 1991; Самохвалова, 2006; Багаева, 2013). Далее по трофическим цепям поллютанты поступают в организм животных и человека. Среди наиболее токсичных ТМ выделяют свинец (Pb), неорганические соединения которого отнесены к политропным ядам и потенциальным канцерогенам (Шестова, 2012). Основными источниками поступления свинца в почву являются промышленные предприятия и транспорт (Дабахов, 2005). В отличие от других загрязняющих веществ, разлагающихся при воздействии факторов биологической и физико-химической природы, ТМ сохраняются в почве длительный период времени. Так, период полужизни Pb составляет 740–5900 лет (Кабата-Пендиас, 1989). Поэтому, изучение особенностей миграции и поиск приёмов снижения токсического действия ТМ на растения имеет важное агроэкологическое значение.

В последние десятилетия в растениеводстве активно применяются экологически безопасные микробные препараты, основой которых являются ризосферные бактерии группы PGPR (Plant Growth Promoting Rhizobacteria). Такие препараты способны не только улучшить

питание растений и повысить продуктивность сельскохозяйственных культур, но и защитить их от воздействия стресс-факторов, в частности ТМ (Zahir, 2004; Чеботарь, 2011; Курамшина, 2016; Duan, 2022).

Известно, что микроорганизмы способны трансформировать токсичные формы ТМ в менее токсичные для растений нерастворимые комплексы (Белоголова, 2013). Этот аспект даёт возможность использовать микробные препараты на почвах, загрязненных ТМ, а изучение влияния бактериализации на миграцию ТМ из грунта в растения в условиях нарастания антропогенного воздействия на экосистемы является актуальным.

Цель наших исследований – определить влияние микробных препаратов (на примере Фосфостим-Агро) на миграцию подвижных форм свинца в системе почва – растения озимой пшеницы в условиях мелкоделяночных полевых опытов.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Полевые исследования проводили на опытном поле Крымского агропромышленного колледжа ФГАОУ ВО «КФУ им. В.И. Вернадского» (Симферопольский район, РК).

Почва – чернозем южный малогумусный карбонатный. Агрохимическая характеристика: содержание гумуса – 2,5 %, подвижного азота – 5,3 мг/100 г почвы, подвижных форм фосфора – 2,6 мг/100 г почвы; рН водной вытяжки – 7,0–7,2. Площадь опытных делянок составляла 10 м<sup>2</sup> с рендомизированным размещением, повторность вариантов – четырёхкратная.

Культура – озимая пшеница *T. aestivum*. Ранней весной в почву вносили водный раствор ацетата свинца (Pb(CH<sub>3</sub>COO)<sub>2</sub>) в расчетном количестве, соответствующем уровням загрязнения Pb: 5, 10 и 20 ПДК. Так, на 1 кг почвы (слой 0–20 см) количество вносимого свинца составило: 30 мг (5 ПДК), 60 мг (10 ПДК), 120 мг (20 ПДК). В контрольных вариантах соли ТМ не вносили. Семена пшеницы перед посевом обрабатывали микробным препаратом, в контрольном варианте – водой. Для инокуляции семян пшеницы использовали биопрепарат Фосфостим-Агро, разработанный в отделе сельскохозяйственной микробиологии ФГБУН НИИСХ Крыма (Чайковская, 2019). Биоагентом микробного препарата является фосфатмобилизующая и ростстимулирующая бактерия *Lelliottia nimipressuralis* ССМ 32-3, входящая в состав Крымской коллекции микроорганизмов [<http://ckp-rf.ru/usu/507484/>].

После уборки урожая проводили количественное определение содержания подвижных форм свинца в образцах почвы, корней, соломы и зерна методом атомно-абсорбционного анализа согласно ГОСТ (ГОСТ 26929-94. Сырье..., 1998; ГОСТ 30178-96. Сырье..., 2010; РД 52.18.289-90. Методические..., 1990) в лаборатории ФГБУ «Центр агрохимической службы «Крымский».

Полевые эксперименты и статистическая обработка полученных данных проведены согласно общепринятым методикам (Доспехов, 1985; Лакин, 1973).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ данных, полученных в результате проведенных исследований, показал, что в прикорневой почве контрольного варианта (без внесения ТМ) содержание подвижных форм свинца составляло 1,42 мг/кг, что не превышало ПДК (6 мг/кг). Также нами выявлена тенденция к снижению содержания Pb (до 1,17 мг/кг) в ризосфере инокулированной микробным препаратом пшеницы, выросшей на естественном фоне.

Внесение раствора ацетата свинца в количестве, соответствующем уровню загрязнения 5, 10 и 20 ПДК, привело к повышению содержания подвижных форм Pb в почве прикорневой зоны пшеницы. Так, их количество варьировало в пределах 54–202 мг/кг почвы в зависимости от уровня загрязнения, что в 9–34 раза превышало значение ПДК (рис. 1).

Применение Фосфостим-Агро для предпосевной инокуляции семян способствовало снижению концентрации подвижных форм Pb в ризосфере пшеницы, что было отмечено на каждом из уровней загрязнения почвы ТМ. Так, при 5 ПДК и 20 ПДК наблюдалась тенденция

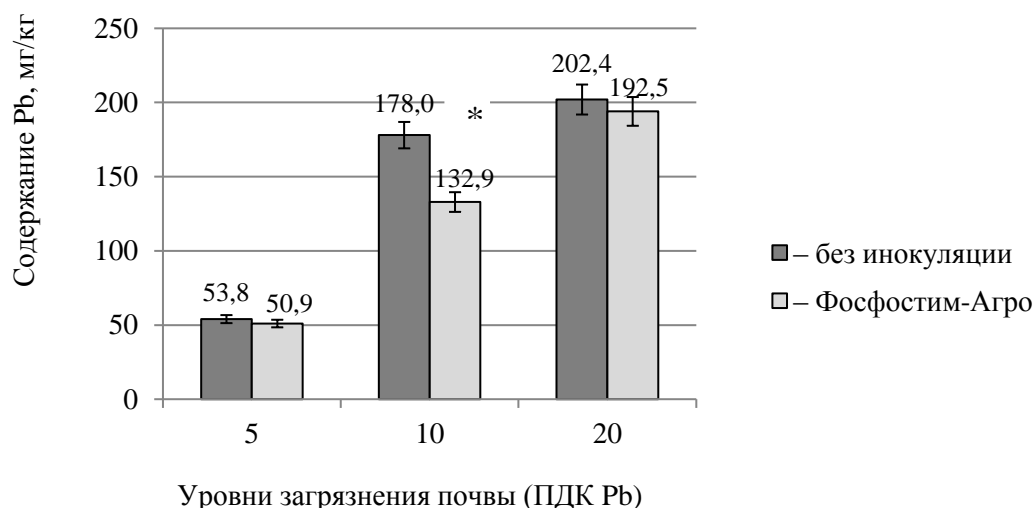


Рис. 1. Содержание подвижных соединений Рb в ризосфере озимой пшеницы при различных уровнях загрязнения почвы (чернозем южный) ацетатом свинца  
\* – различия с контролем значимы ( $p \leq 0,05$ ).

к снижению содержания свинца, а на фоне 10 ПДК количество подвижных соединений Рb в прикорневой зоне бактеризованных растений снизилось на 25 %.

Согласно полученным данным, установлено, что количественное содержание подвижных соединений свинца в корнях пшеницы превысило их накопление в ризосфере. Так, в корнях растений, выросших на контрольных делянках без внесения  $Pb(CH_3COO)_2$ , количество подвижных соединений свинца составило 9,4 мг/кг против 1,4 мг/кг в ризосфере пшеницы. При загрязнении почвы Рb этот показатель достиг значения 56,2 мг/кг на уровне 5 ПДК и 188,5 мг/кг на уровне 10 ПДК. На фоне 20 ПДК в корнях опытных растений накапливалось 366,7 мг/кг свинца, что в 1,8 раз превысило содержание ТМ в прикорневой зоне *T. aestivum* (рис. 2).

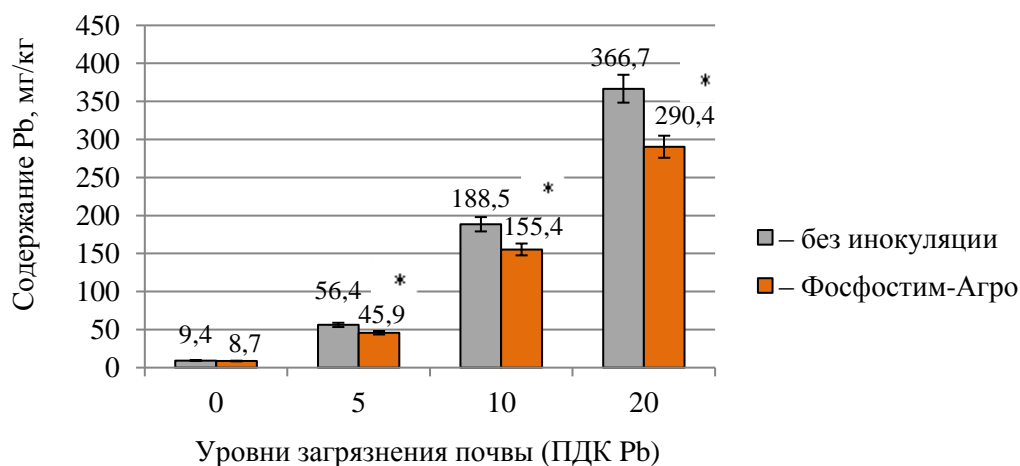


Рис. 2. Содержание подвижных соединений Рb в корнях озимой пшеницы при различных уровнях загрязнения почвы (чернозем южный) ацетатом свинца  
\* – различия с контролем значимы ( $p \leq 0,05$ ).

Полученные нами результаты соответствуют данным литературных источников, согласно которым пшеница относится к растениям-аккумуляторам (Пищик, 2015), при этом

ТМ накапливаются главным образом в корневой системе, непосредственно взаимодействующей с загрязненной почвой (Лайдинен, 2011).

Предпосевная инокуляция семян микробным препаратом Фосфостим-Агро способствовала снижению концентрации свинца в корнях озимой пшеницы при выращивании растений на фоне различных уровней загрязнения почвы. На наш взгляд, это может быть обусловлено способностью бактерий, входящих в состав микробного препарата, связывать свинец в слабо подвижные формы, что согласуется с данными других исследователей (Белоголова, 2013). Выявлено, что количественное содержание подвижных форм Рb в корнях пшеницы, выросшей из бактеризованных семян, было ниже, чем у неинокулированных растений: на 18–21 % при 5; 10 и 20 ПДК Рb (см. рис. 2).

Установлено, что значительно меньшее количество подвижных соединений свинца мигрирует из корней в наземную массу. Их содержание в соломе пшеницы, выросшей на естественном фоне, составляло 6,9 мг/кг и варьировало в пределах 9–48 мг/кг на фоне различных уровней загрязнения почвы ТМ (рис. 3).

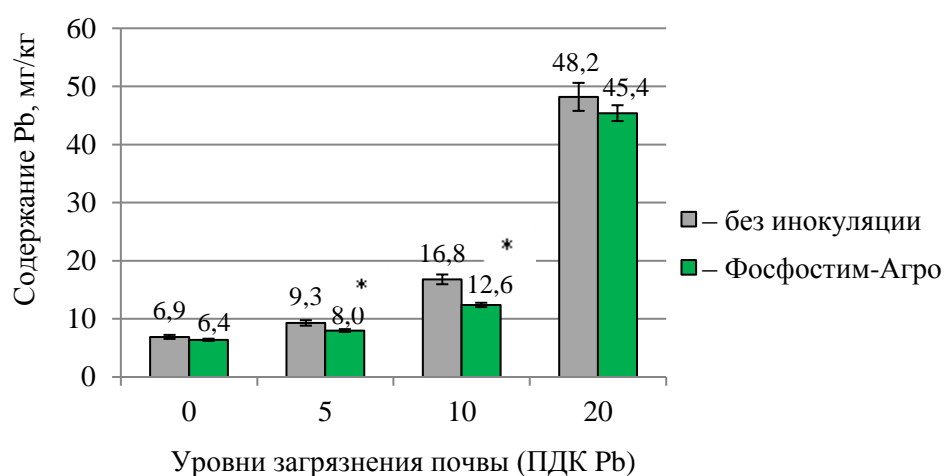


Рис. 3. Содержание подвижных соединений Рb в соломе озимой пшеницы при различных уровнях загрязнения почвы (чернозем южный) ацетатом свинца

\* – различия с контролем значимы ( $p \leq 0,05$ ).

Предпосевная обработка семян пшеницы микробным препаратом Фосфостим-Агро позволила снизить содержание подвижных форм свинца в фитомассе растений. При этом статистически достоверные различия между вариантами с инокуляцией и контролем (без обработки препаратом) отмечены при загрязнении почвы на уровнях 5 ПДК (13 %) и 10 ПДК (25 %) (см. рис. 3).

Минимальное количество подвижных соединений Рb выявлено в зерне озимой пшеницы: оно варьировало в пределах 0,05–0,3 мг/кг в зависимости от уровня загрязнения почвы, что не превышало допустимую концентрацию – 0,5 мг/кг (рис. 4).

В зерне бактеризованных растений, выросших на контрольных делянках (без внесения в почву ТМ), концентрация подвижных соединений свинца (0,03 мг/кг) уменьшилась в 3 раза и составила 0,01 мг/кг.

В вариантах с загрязнением почвы ацетатом свинца применение микробного препарата Фосфостим-Агро позволило на 10–25 % снизить количество Рb в зерне *T. aestivum*. Так, содержание подвижных форм Рb в зерне бактеризованной пшеницы составило 0,04 мг/кг на фоне 5 ПДК, 0,06 мг/кг на фоне 10 ПДК и 0,28 мг/кг на фоне 20 ПДК (см. рис. 4).

Таким образом, проведенные исследования показали, что предпосевная инокуляция семян озимой пшеницы микробным препаратом Фосфостим-Агро повлияла на накопление

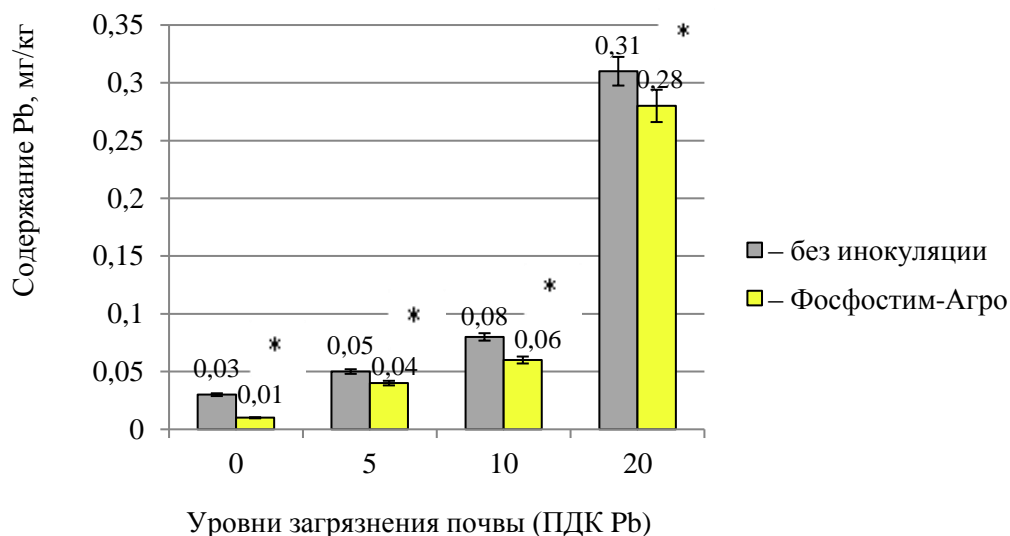


Рис. 4. Содержание подвижных соединений Pb в зерне озимой пшеницы при различных уровнях загрязнения почвы (чернозем южный)

\* – различия с контролем значимы ( $p \leq 0,05$ ).

подвижных форм свинца, как в прикорневой почве, так и в самих растениях. При различных уровнях загрязнения чернозема южного ацетатом свинца (5, 10 и 20 ПДК) в ризосфере инокулированной озимой пшеницы количественное содержание подвижных форм Pb снизилось на 5–25 %, а в корнях, соломе и зерне бактеризованных растений – на 18–21 %, 6–25 % и 10–25 % соответственно по сравнению с контрольными вариантами без обработки семян микробным препаратом.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенного полевого опыта подтверждают то, что пшеница озимая является аккумулятором ТМ (Pb), подвижные формы которого мигрируют из почвы в растение и, главным образом, накапливаются в корневой системе *T. aestivum*. При этом наименьшее количество свинца, не превышающее ПДК, поступает в зерно озимой пшеницы. Установлено, что применение микробного препарата Фосфостим-Агро для предпосевной инокуляции семян *T. aestivum*, выращиваемой в условиях загрязнения чернозема южного свинцом (5, 10 и 20 ПДК), является эффективным приемом, позволяющим снизить содержание подвижных соединений Pb, как в ризосфере, так и в корнях, соломе и зерне бактеризованных растений озимой пшеницы.

## Список литературы

- Багаева Т. В., Ионова Н. Э., Надеева Г. В. Микробиологическая ремедиация природных систем от тяжелых металлов: учебно-методическое пособие. – Казань: Казанский университет, 2013. – 56 с.
- Белоголова Г. А., Соколова М. Г., Гордеева О. Н. Влияние ризосферных бактерий на миграцию и биодоступность тяжелых металлов, мышьяка и фосфора в техногенно-загрязненных экосистемах // Агрохимия. – 2013. – № 6. – С. 69–77.
- ГОСТ 26929-94. Сырье и продукты пищевые. Подготовка проб. Минерализация для определения содержания токсичных элементов. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2010. – 12 с.
- ГОСТ 30178-96. Сырье и продукты пищевые. Атомно-абсорбционный метод определения токсичных элементов. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1998. – 10 с.
- Дабахов М. В., Дабахова Е. В., Титова В. И. Тяжелые металлы: экотоксикология и проблемы нормирования. – Н. Новгород: Изд-во ВВАГС, 2005. – 165 с.
- Доспехов Б. А. Методика полевого опыта. – М.: Агропромиздат, 1985. – 351 с.

- Ильин В. Б. Тяжелые металлы в системе почва – растение. – Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1991. – 151 с.
- Кабата-Пендиас А. Микроэлементы в почвах и растениях. – М.: Мир, 1989. – 439 с.
- Курамшина З. М., Смирнова Ю. В., Хайруллин Р. М. Повышение толерантности *Triticum aestivum* к кадмий-стрессу с помощью эндофитных штаммов *Bacillus subtilis* // Физиология растений. – 2016. – Т. 63, № 5. – С. 1–9.
- Чайковская Л. А., Мельничук Т. Н., Каменева И. А., Баранская М.И., Овсиенко О.Л. Фосфатмобилизирующий штамм почвенных бактерий *Lelliottia nimipressuralis* ССМ 32-3 и биопрепарат на его основе для оптимизации минерального питания растений, стимуляции их роста и повышения урожайности. Патент РФ № 2676926. – 2019. – Бюл. № 2. – 12 с.
- Лайдинен Г. Ф., Титов А. Ф., Батова Ю. В., Казнина Н. М., Кулаковская Т. В. Накопление и распределение тяжелых металлов в растениях *Phleum pratense* (L.), произраставших в условиях промышленного загрязнения // Физиология растений – фундаментальная основа экологии и инновационных биотехнологий: Материалы докладов (в двух частях) VII Съезда Общества физиологов растений России (Нижний Новгород, 4-10 июля 2011 г.). – Нижний Новгород, 2011. – Часть II. – С. 407–408.
- Лакин Г. Ф. Биометрия. – М.: Высшая школа, 1973. – 343 с.
- Пищик В. Н., Воробьев Н.И., Проворов Н.А., Хомяков Ю.В. Механизмы адаптации растений к тяжелым металлам. Обзорная статья // Агрофизика. – 2015. – № 2. – С. 38–49.
- РД 52.18.289-90. Методические указания. Методика выполнения измерений массовой доли подвижных форм металлов (меди, свинца, цинка, никеля, кадмия, кобальта, хрома и марганца) в пробах почвы атомно-абсорбционным анализом. – М: Государственный комитет СССР по гидрометеорологии, 1990. – 36 с.
- Самохвалова В. Л., Фатеев А. И. Тяжелые металлы как фактор техногенного воздействия на почвенные микроорганизмы // Грунтознавство. – 2006. – Т. 7, № 1–2. – С. 88–95.
- Тёплая Г. А. Тяжелые металлы как фактор загрязнения окружающей среды (обзор литературы) // Астраханский вестник экологического образования. – 2013. – № 1 (23). – С. 182–192.
- Титов А. Ф., Казнина Н.М., Таланова В.В. Тяжелые металлы и растения. – Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2014. – 194 с.
- Чеботарь В. К., Щербakov А. В., Чижевская Е. П., Петров В. Б. Влияние засоления и тяжелых металлов на ростстимулирующую и антагонистическую активность почвенных бактерий и перспективы использования микроорганизмов для биоремедиации почв (аналитический обзор) // Достижения науки и техники АПК. – № 07. – 2011. – С. 28–31.
- Шестова Г. В., Ливанов Г. А., Остапенко Ю. Н., Иванова Т. М., Сизова К. В. Опасность хронического отравления свинцом для здоровья населения // Медицина экстремальных ситуаций. – № 4 (42). – 2012. – С. 65–76.
- Duan Ch., Mei Y., Wang Q., Wang Y., Li Q., Hong M., Hu Sh. Li Sh., Fang L. Rhizobium Inoculation Enhances the Resistance of Alfalfa and Microbial Characteristics in Copper-Contaminated Soil // Frontiers in Microbiology. – 2022. – Vol. 12. – P. 1–13.
- Xiao-Rui W., Sheng-Lu Zh., Shao-Hua W. Accumulation of Heavy Metals in Different Parts of Wheat Plant from the Yangtze River Delta, China // International Journal of Agriculture and Biology. – 2016. – Vol. 18. – P. 1242–1248.
- Zahir Z. A. Plant growth promoting rhizobacteria: application and perspectives in agriculture // Advances in Agronomy. – 2004. – Vol. 81. – P. 97–169.

**Ovsienko O. L., Chaikovska L. A., Baranskaya M. I. The effect of microbial preparation on the migration of mobile Pb forms in the soil – winter wheat system** // Ekosistemy. 2023. Iss. 36. P. 181–186.

Heavy metals (HM) take a leading position among the most common environmental pollutants. Studying the HM migration ability in the soil – plant system and searching for methods to reduce their toxic effect, particularly in agrocenosis, is significant and relevant. The aim of the researching was to determine the influence of the microbial preparation Phosphostim-Agro (bioagent – phosphate-mobilizing and growth-stimulating bacterium – *Lelliottia nimipressuralis* CCM 32–3) on the migration of lead mobile forms in the southern chernozem – *Triticum aestivum* L. system. Under the conditions of the field experiment, soil contamination was carried out with a solution of lead acetate in amount exceeding Pb MPC by 5, 10 and 20 times. The content of mobile forms of lead in samples of soil, roots, straw and grain was determined by atomic absorption analysis. It was revealed that when southern chernozem was polluted with lead, the largest amount of its mobile forms accumulated in the rhizosphere (54–202 mg/kg) and migrated to the roots (56–367 mg/kg) of winter wheat. The lowest content of Pb, not exceeding MPC (0.5 mg/kg), was found in *T. aestivum* grain: it varied in the range of 0.05–0.3 mg/kg depending on the level of soil contamination. The application of the microbial preparation Phosphostim-Agro for pre-sowing inoculation of winter wheat seeds reduced the content of mobile forms of lead, both in the rhizosphere and in the aerial parts of the plants. It was revealed that in the rhizosphere of inoculated plants, the Pb content decreased by 5–25 %, and in the roots, straw and grain of bacterized plants – by 18–21 %, 6–25% and 10–25 %, respectively, compared to the variants without microbial inoculation.

*Keywords:* *Triticum aestivum*, microbial preparation Phosphostim-Agro, lead, rhizosphere.

Поступила в редакцию 01.08.23  
Принята к печати 13.10.23