

УДК 579.2:581.1:632.122:633.11

EDN RVVHLA

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

**ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ БИОПРЕПАРАТОВ НА АДАПТИВНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ МОЛОДЫХ РАСТЕНИЙ ОЗИМОЙ ПШЕНИЦЫ ПРИ СТРЕССОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ**

ФГБУН «Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Крыма»

**Реферат.** Приведены результаты влияния микробных препаратов на компоненты неферментативной антиоксидантной системы защиты озимой пшеницы *Triticum aestivum* L. при загрязнении почвы (чернозем южный) тяжелыми металлами (ТМ). Цель исследований – изучение влияния комплексных микробных препаратов (КМП) на формирование адаптивного потенциала озимой пшеницы на ранних этапах развития растений при загрязнении почвы ТМ (Pb, Cu, Cr) в условиях вегетационных опытов. Для предпосевной инокуляции семян использовали комплекс микробных препаратов, включающий: «Диазофит», препарат на основе *Lelliottia nimipressuralis* ССМ 32-3, «Биополицид». Определены физиолого-биохимические параметры растений: функционирование компонентов антиоксидантных неферментативных систем (аскорбиновая кислота и глутатион) как показателя их адаптивности к ТМ. Установлено, что загрязнение почвы ТМ приводило к увеличению содержания аскорбиновой кислоты и глутатиона в листьях по сравнению с контролем на 10–82 % и в 1,4–3,0 раза соответственно в зависимости от уровня ПДК ТМ в почве. Предпосевная инокуляция семян способствует снижению содержания аскорбиновой кислоты и глутатиона в листьях пшеницы по сравнению с инокулированными растениями: на 6–29 % и 14–30 % соответственно, а также повышает продуктивность растений на 9–38 % против контроля. Установлено наличие прямой, сильной корреляционной зависимости между содержанием аскорбиновой кислоты и глутатиона в листьях пшеницы, достоверной как у инокулированных растений ( $r = 0,93–0,97$ ), так и у растений без инокуляции ( $r = 0,86–0,96$ ). Выявлена прямая, сильная и достоверная корреляционная связь между уровнем загрязнения почвы ТМ и содержанием аскорбиновой кислоты и глутатиона в листьях пшеницы:  $r = 0,92–0,94$  (без инокуляции) и  $r = 0,88–0,93$  (с инокуляцией). Корреляционный анализ показал наличие обратной, сильной достоверной связи между продуктивностью молодых растений пшеницы и уровнем загрязнения почвы ТМ ( $r = -0,98$  и  $-0,99$ ), а также отрицательной связи между содержанием компонентов антиоксидантных неферментативных систем и продуктивностью ( $r = -0,98$  и  $-0,99$ ).

**Ключевые слова:** микробные препараты, озимая пшеница, тяжелые металлы, аскорбиновая кислота, глутатион, продуктивность.

**Для цитирования:** Чайковская Л. А., Баранская М. И., Клименко Н. Н., Овсиенко О. Л. Оценка влияния микробных препаратов на адаптивный потенциал озимой пшеницы при воздействии тяжелых металлов // Таврический вестник аграрной науки. 2022. № 1(29). С. 181–191. EDN: RVVHLA.

**For citation:** Chaikovskaya L. A., Baranskaya M. I., Klimenko N. N., Ovsienko O. L. Evaluation of the effect of biological preparations on the adaptive potential of young winter wheat plants under the stressful impact of heavy metals // Taurida Herald of the Agrarian Sciences. 2022. No. 1(29). P. 181–191. EDN: RVVHLA.

### Введение

В природных условиях растения подвергаются воздействию различных неблагоприятных факторов. Формирование защитных эффектов адаптации растений обеспечивается не только активацией генетического аппарата, но также изменением

метаболизма клеток и функционирования основных систем организма. Одним из универсальных звеньев стрессового ответа растений является окислительный стресс. При этом в клетках увеличивается образование активных форм кислорода, что может привести к гибели организма. Развитие окислительного стресса отмечено при воздействии на растения вирусной и бактериальной инфекции, засухи, засоления, тяжелых металлов (ТМ) и др. Растения обладают различными эффективными системами защиты от окислительного стресса: синтезируют ферменты и антиоксиданты неферментативной природы (аскорбиновая кислота, глутатион и др.), устраняющие токсичные кислородные радикалы. В литературных источниках отмечено повышение содержания в растениях окислительных ферментов [1], а также глутатиона и аскорбиновой кислоты [2–7] при воздействии ТМ.

Известно, что ТМ являются одними из наиболее распространенных загрязнителей окружающей среды. Включаясь в трофические цепи, они изменяют интенсивность метаболических процессов растений, что снижает их продуктивность и качество урожая. В загрязненных ТМ почвах нарушается интенсивность микробиологических процессов, снижается количество полезных микроорганизмов, что также негативно влияет на культурные растения [8, 9].

В экспериментальных исследованиях доказано, что микроорганизмы являются посредниками между почвенными условиями и растениями и могут значительно повысить устойчивость макросимбионта к стрессу [10]. В настоящее время созданы эффективные микробные препараты, которые успешно применяют в технологиях выращивания многих сельскохозяйственных растений [11–16]. Применение препаратов на основе полезных штаммов микроорганизмов – важный аспект биологизации современного земледелия, способствующий улучшению качества растительной продукции, снижению пестицидной нагрузки и стабилизирующий функционирование агроэкосистем [17–21]. Именно поэтому поиск приемов, повышающих устойчивость растений к негативному воздействию ТМ, не теряет актуальности. Особое место среди биопрепаратов занимают комплексные полифункциональные микробные препараты, созданные на основе ассоциаций микроорганизмов. В России и Украине разработаны технологические аспекты производства и применения комплексных микробных препаратов (КМП) на основе азотфиксирующих (симбиотических и ассоциативных), а также фосфатмобилизирующих бактерий [22, 23]. Применение этих препаратов позволяет эффективно защитить растения от различных стрессов, стимулировать их урожайность и качество продукции, а также сохранить плодородие почвы.

**Цель исследований** – изучение влияния КМП на формирование адаптивного потенциала (неферментативной антиоксидантной системы защиты) молодых растений озимой пшеницы *Triticum aestivum* L. при загрязнении почвы ТМ (Pb, Cu, Cr) в условиях вегетационных опытов.

#### **Материалы и методы исследований**

Для предпосевной инокуляции семян озимой пшеницы *Triticum aestivum* L. использовали комплекс микробных препаратов (КМП): «Диазофит» (основа – *Rhizobium radiobacter* 204, азотфиксатор и продуцент ростстимулирующих веществ); препарат на основе *Lelliottia nimipressuralis* ССМ 32-3, обладающий способностью к трансформации труднорастворимых соединений фосфора, продуцент фитогормонов [24]; «Биополицид» (основа – *Paenibacillus polymyxa* П, синтезирует хитиназу и антифунгальные компоненты) в соотношении 1:1:1. Изучаемые штаммы зарегистрированы в Крымской коллекции микроорганизмов ФГБУН «НИИСХ Крыма» (<http://ckp-rf.ru/usu/507484/>). В контроле семена увлажняли водой.

Серия вегетационных опытов проведена в теплице: растения выращивали в пластиковых сосудах (объем 0,5 л) в течение шести недель.

Почва – чернозем южный малогумусный карбонатный тяжелосуглинистый, содержание гумуса (ГОСТ 26213-91) – 2,5 %; подвижных форм азота (ГОСТ 26951-86) и фосфора (по методу Мачигина в модификации ЦИНАО, ГОСТ 26205-91) – 5,3 и 2,6 мг/100 г почвы соответственно; рН водной вытяжки – 7,0–7,2. Повторность опытов шестикратная. В сосуды вносили воздушно-сухую почву, увлажняли водой (70 % влагоёмкости) и добавляли водные растворы солей ТМ:  $Pb(CH_3COO)_2$ ,  $CuSO_4$ ,  $K_2CrO_4$  в соответствии с различными уровнями предельно допустимых концентраций (ПДК) загрязнения: 1,0; 2,5; 5,0 ПДК. В контрольных вариантах растворы ТМ в почву не вносили. Схема вегетационных опытов: 1. Контроль (без инокуляции), 2. КМП, 3. ТМ (1 ПДК), 4. ТМ (1 ПДК) + КМП, 5. ТМ (2,5 ПДК), 6. ТМ (2,5 ПДК) + КМП, 7. ТМ (5 ПДК), 8. ТМ (5 ПДК) + КМП. Отбор фитомассы растений для анализов проводили трижды: через две (I), четыре (II) и шесть (III) недель после всходов.

В лабораторных опытах проводили определение биохимических параметров растений, отвечающих за функционирование неферментативной антиоксидантной системы защиты (аскорбиновая кислота и глутатион). Определение массовой доли аскорбиновой кислоты и глутатиона в листьях озимой пшеницы проводили по методике Петга в модификации Прокошева [25]. Принцип выявления аскорбиновой кислоты в растительной пробе основан на ее способности восстанавливать 2,6-дихлорфенолиндофенол: раствор 2,6-дихлорфенолиндофенола синего цвета восстанавливается до бесцветного соединения экстрактами растений, содержащих аскорбиновую кислоту (реакция Тильманса). Определение глутатиона основано на его способности восстанавливать свободный йод, образующийся при титровании экстракта растений йодатом калия в кислой среде. Для получения экстракта 2 г листьев растирали в фарфоровой ступке с кварцевым песком и 20 мл 5 % раствора метафосфорной кислоты до однородной массы. Далее вытяжку переносили в мерную колбу на 50 мл и доводили объем до метки дистиллированной водой. Содержимое колбы перемешивали, отстаивали, затем снова взбалтывали в течение 2-х мин и фильтровали через сухой бумажный фильтр. Для определения содержания аскорбиновой кислоты отбирали в колбочки по 5 мл фильтрата и титровали из микробюретки 0,001 н раствором 2,6-дихлорфенолиндофенола до появления слабой розовой окраски. Для определения содержания глутатиона, отбирали в колбочки по 5 мл фильтрата, добавляли по две капли 15 % раствора КJ, пять капель 1 % крахмала и титровали раствором  $KJ_3$  до появления устойчивой слабо-синей окраски. Статистическая обработка полученных результатов проведены согласно общепринятым методам [26] и программы Statistica 7.0.

#### Результаты и их обсуждение

**Аскорбиновая кислота.** Результаты исследований показали, что содержание аскорбиновой кислоты в листьях растений контроля (без внесения ТМ), выросших из инокулированных и неинокулированных семян, составляло в первый отбор фитомассы (I) 0,15 и 0,17 мг/% соответственно (таблица 1). В дальнейшем отмечена тенденция к возрастанию содержания аскорбиновой кислоты в листьях контрольных растений до 0,30 мг/% (II) и 0,23 мг/% (III), что свидетельствует о её широком диапазоне в качестве стресс-показателя. Необходимо подчеркнуть, что даже незначительное загрязнение почвы ТМ (1 ПДК) приводило к увеличению содержания аскорбиновой кислоты в листьях растений, выросших из неинокулированных семян, по сравнению с контролем – на 10% (II) и 13% (III). Выявлено, что более интенсивное загрязнение почвы (2,5 и 5,0 ПДК ТМ) способствовало возрастанию содержания аскорбиновой кислоты в листьях пшеницы во все сроки отбора фитомассы. Так, при загрязнении почвы на уровне 2,5 ТМ, количество аскорбиновой кислоты в листьях неинокулированных растений достигало 0,21 (I), 0,36 (II), 0,28 (III) мг/% против 0,17 (I), 0,30 (II), 0,23 (III) мг/% в контроле и возрастало на 23 %, 20 % и 22 %

соответственно. Внесение в почву ТМ на уровне 5,0 ПДК провоцировало еще большее накопление аскорбиновой кислоты в листьях пшеницы, выросшей из неинокулированных семян: 0,31 (I), 0,39 (II), 0,31 (III) мг/% и возросло по сравнению с контролем на 82 %, 30 % и 35 % соответственно.

**Таблица 1 – Содержание аскорбиновой кислоты в листьях озимой пшеницы, мг/%**

Вариант	Срок отбора проб		
	две недели	четыре недели	шесть недель
контроль (без ТМ)			
Без инокуляции	0,17	0,30	0,23
КМП	0,15	0,29	0,23
НСР <sub>05</sub>	0,025	0,015	0,025
ТМ (1,0 ПДК)			
Без инокуляции	0,16	0,33	0,27
КМП	0,14	0,31	0,25
НСР <sub>05</sub>	0,025	0,025	0,025
ТМ (2,5 ПДК)			
Без инокуляции	0,21	0,36	0,28
КМП	0,15	0,33	0,26
НСР <sub>05</sub>	0,025	0,015	0,020
ТМ (5,0 ПДК)			
Без инокуляции	0,31	0,39	0,31
КМП	0,27	0,35	0,28
НСР <sub>05</sub>	0,015	0,020	0,025

Анализ полученных результатов показал, что предпосевная инокуляции семян (КМП) способствует снижению содержания аскорбиновой кислоты в листьях бактеризованных растений на 6–29 % по сравнению с растениями, выросшими из семян без инокуляции (таблица 1). Однако, наиболее четкое и достоверное воздействие микробных препаратов на содержание аскорбиновой кислоты в листьях пшеницы выявлено у молодых растений (I): оно уменьшалось на 12 %, 29 % и 13 % при загрязнении почвы на уровне 1,0; 2,5 и 5,0 ПДК ТМ соответственно. На наш взгляд, это свидетельствует о снижении окислительного стресса, возникающего вследствие загрязнения почвы ТМ. Подобная тенденция отмечена в дальнейшем (II и III) для растений, выросших на загрязненной ТМ почве. Так, предпосевная инокуляция семян способствовала снижению содержания аскорбиновой кислоты в листьях пшеницы на 6–10 % (II) и 7–10 % (III).

**Глутатион.** Известно, что глутатион является активным антиоксидантом и одним из наиболее четких показателей, характеризующим стрессовое воздействие ТМ на растения [7, 27]. Рассмотрим данные, полученные в наших экспериментах (таблица 2). Анализ результатов (I) показал, что содержание глутатиона в листьях контрольных растений (почва без ТМ), выросших из инокулированных и неинокулированных семян, различалось незначительно и составляло 26,4 и 25,4 мг/г соответственно. Выявлено, что загрязнение почвы ТМ приводило к увеличению содержания глутатиона в листьях озимой пшеницы во всех вариантах опыта. Так, в листьях растений, выросших из неинокулированных семян, оно возросло до 38,6; 36,6 и 68,2 мг/г при загрязнении почвы ТМ на уровне 1,0; 2,5 и 5,0 ПДК соответственно, что превышало контроль на 11,2–42,8 мг/г или в 1,5–2,7 раза. Подобная тенденция сохранилась и в последующие отборы – содержание глутатиона в листьях растений контрольного варианта варьировало незначительно и составляло 22,3–23,7 (II) и 24,8–25,4 мг/г (III). Максимальное значение содержания глутатиона в листьях отмечено у пшеницы, выросшей на загрязненной ТМ почве: оно достигало 45,8; 46,9; 71,5 мг/г (II) и 41,8; 52,7; 62,3 мг/г (III) на уровне 1,0; 2,5 и 5,0 ПДК ТМ соответственно.

Количество глутатиона в листьях пшеницы, выросшей на загрязненной почве, превышало его содержание в контрольных растениях (почва без ТМ) на 22,1–47,8 мг/г или в 2–3 раза (II) и 17,0–37,5 мг/г или в 1,6–2,5 раза (III).

**Таблица 2 – Содержание глутатиона в листьях пшеницы озимой, мг/г**

Вариант	Срок отбора проб		
	две недели	четыре недели	шесть недель
контроль (без ТМ)			
Без инокуляции	25,4	23,7	24,8
КМП	26,4	22,3	25,4
НСР <sub>05</sub>	0,30	0,50	0,46
ТМ (1,0 ПДК)			
Без инокуляции	38,6	45,8	41,8
КМП	38,5	33,4	29,1
НСР <sub>05</sub>	4,01	4,77	3,98
ТМ (2,5 ПДК)			
Без инокуляции	36,6	46,9	52,7
КМП	35,5	36,6	37,9
НСР <sub>05</sub>	3,29	4,50	5,18
ТМ (5,0 ПДК)			
Без инокуляции	68,2	71,5	62,3
КМП	58,8	50,2	53,5
НСР <sub>05</sub>	4,21	5,89	4,27

Рассмотрим воздействие предпосевной инокуляция (КМП) семян на содержание глутатиона в листьях бактеризованных растений при загрязнении почвы ТМ. Необходимо отметить, что у растений двухнедельного возраста (I) не выявлено существенного влияния инокуляции на содержание глутатиона в листьях при загрязнении почвы ТМ на уровне 1,0 и 2,5 ПДК (таблица 2). В то же время отмечено достоверное снижение массовой доли глутатиона в листьях пшеницы, выращенной из инокулированных семян, при загрязнении почвы на уровне 5,0 ПДК ТМ: на 9,4 мг/г (14 %) против варианта без инокуляции. Однако, наиболее четкие результаты влияния предпосевной бактеризации семян на содержание глутатиона в листьях пшеницы выявлены у растений четырех- (II) и шестинедельного (III) возрастов: инокуляция способствовала достоверному снижению содержания глутатиона по сравнению с неинокулированными растениями на 10,3–21,3 мг/г или 22–30 % (II) и 8,8–14,8 мг/г или 14–30 % (III). Установлено, что применение КМП для инокуляции семян озимой пшеницы способствует снижению массовой доли глутатиона в листьях растений по сравнению с неинокулированными: на 8–21 мг/г (14–30 %). На наш взгляд, это свидетельствует о повышении адаптивного потенциала бактеризованных растений к негативным воздействиям ТМ и менее интенсивном развитии окислительного стресса.

Снижение содержания антиоксидантов неферментативной природы (аскорбиновой кислоты и глутатиона) в листьях бактеризованных растений озимой пшеницы свидетельствует о формировании адаптивных реакций к воздействию ТМ и повышению устойчивости растений к окислительному стрессу.

Корреляционный анализ результатов (I – двухнедельные растения) показал, что между концентрацией аскорбиновой кислоты и глутатиона в листьях пшеницы установлена прямая, сильная корреляционная зависимость, достоверная как при инокуляции семян КМП ( $r = 0,94$ ), так и для неинокулированных растений ( $r = 0,87$ ) (таблица 3). Установлено также, что содержание аскорбиновой кислоты и глутатиона в листьях связано с концентрацией ТМ в почве прямой, тесной зависимостью: значение коэффициента корреляции ( $r$ ) составляло 0,88–0,93 и 0,92–0,94 для бактеризованных и неинокулированных растений соответственно. Не выявлено



существенных изменений зависимостей антиоксидантов между собой и уровнем загрязнения почвы ТМ в течение эксперимента. Так, корреляционный анализ результатов (II – четырехнедельные растения) показал, что теснота связи между уровнем ПДК ТМ в почве и содержанием антиоксидантов в листьях незначительно увеличилась по сравнению с предыдущим отбором (I): значение  $r$  достигало 0,95 для растений без инокуляции и 0,96 – для бактеризованных. Коэффициент корреляции между содержанием аскорбиновой кислоты и глутатиона в листьях несколько снизился по сравнению с I и составил 0,86 и 0,93 для неинокулированных и бактеризованных растений соответственно.

**Таблица 3 – Показатели коэффициентов корреляции между содержанием аскорбиновой кислоты и глутатиона в листьях озимой пшеницы**

Компонент неферментативного антиоксидантного комплекса	Загрязнение почвы ТМ		Аскорбиновая кислота	
	контроль	КМП	контроль	КМП
две недели				
Аскорбиновая кислота	0,92*	0,88*	-	-
Глутатион	0,94*	0,93*	0,87*	0,94*
четыре недели				
Аскорбиновая кислота	0,95*	0,83*	-	-
Глутатион	0,95*	0,96*	0,86*	0,93*
шесть недель				
Аскорбиновая кислота	0,92*	0,97*	-	-
Глутатион	0,95*	1,00*	0,96*	0,97*

*Примечание.* \* Достоверно при  $p = 0,05$ .

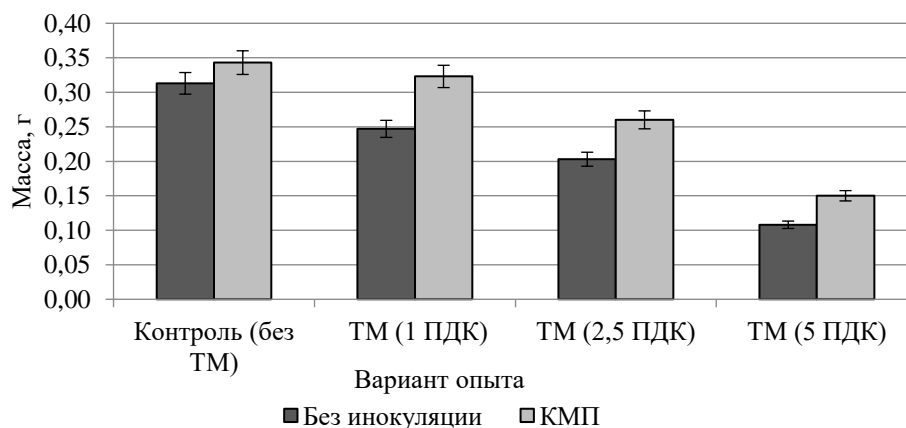
При завершении опыта (III) корреляционные зависимости между уровнем загрязнения почвы ТМ и компонентами неферментативного антиоксидантного комплекса в листьях возросли у бактеризованных растений до 0,97–1,00 (см. таблицу 3). Корреляционная связь между уровнем загрязнения почвы ТМ и содержанием аскорбиновой кислоты и глутатиона в листьях была прямой, сильной и достоверной. Зависимости между содержанием аскорбиновой кислоты и глутатиона в листьях пшеницы стали более тесными, чем в период 2–4 недели и составили для неинокулированных растений 0,96, а для КМП – 0,97. Необходимо отметить, что значения коэффициентов корреляции при бактеризации семян пшеницы превышали таковые у растений без инокуляции.

**Продуктивность растений.** Как известно, воздействие различных стресс-факторов на растения очень часто сказывается на их продуктивности. Рассмотрим влияние ТМ на накопление фитомассы молодыми растениями озимой пшеницы (III) в возрасте шести недель (рисунок 1). Анализ полученных результатов показал, что загрязнение почвы ТМ даже в незначительной мере (1 ПДК) снижает фитомассу растений на 21 % по сравнению с контрольным вариантом (до 0,247 г против 0,313 г). Увеличение уровня загрязнения почвы ТМ (до 2,5 и 5,0 ПДК) привело к еще большему снижению фитомассы озимой пшеницы против контроля: до 0,203 и 0,108 г/растение (на 35,0 % и 65,5 %) соответственно.

Рассмотрим воздействие изучаемых микробных препаратов на продуктивность молодых растений озимой пшеницы. Применение КМП для предпосевной инокуляции семян способствует возрастанию фитомассы растений озимой пшеницы как в контроле, так и при загрязнении почвы ТМ.

Так, применение КМП обеспечило прибавку фитомассы на 9,6 % (0,30 г/растение) в контроле. При загрязнении почвы на уровне 5, 10 и 20 ПДК ТМ продуктивность фитомассы пшеницы, выросшей из инокулированных семян, возрастала по сравнению с вариантами без инокуляции на 30,8 %, 28,0 % и 38,8 %

соответственно. Следовательно, результаты наших опытов свидетельствуют о положительном влиянии КМП на продуктивность молодых растений озимой пшеницы: она возростала по сравнению с неинокулированными растениями на 9,6–38,8 % в зависимости от варианта опытов и уровня загрязнения почвы ТМ.



**Рисунок 1 – Фитомасса молодых растений озимой пшеницы (возраст – шесть недель)**

Известно, что продуктивность растений является результирующим показателем, характеризующим состояние растения. Корреляционный анализ показал, что продуктивность озимой пшеницы существенно снижалась при возрастании уровня загрязнения почвы как у растений без инокуляции, так и при использовании КМП для бактериализации семян:  $r = -0,97$  и  $-1,00$  соответственно связь обратная, сильная, достоверная (таблица 4). Установлена отрицательная связь между содержанием аскорбиновой кислоты, глутатиона и продуктивностью растений ( $r = -0,98$  и  $-0,99$ ). Об этом свидетельствует значительное увеличение показателей антиоксидантного комплекса в листьях пшеницы при возрастании уровня загрязнения почвы ТМ с одновременным снижением продуктивности.

**Таблица 4 – Корреляционные зависимости между продуктивностью озимой пшеницы, загрязнением почвы ТМ, содержанием аскорбиновой кислоты и глутатиона в листьях**

Компонент неферментативного антиоксидантного комплекса	Загрязнение почвы ТМ		Аскорбиновая кислота		Глутатион	
	контроль	КМП	контроль	КМП	контроль	КМП
Продуктивность растений	-0,97*	-1,00*	-0,98*	-0,98*	-0,99*	-0,99*

*Примечание.* \* Достоверно при  $p = 0,05$ .

Установлены тесные корреляционные зависимости между показателями антиоксидантного неферментативного комплекса и уровнем загрязнения почвы, а также их связи с продуктивностью молодых растений озимой пшеницы.

Таким образом, проведенные исследования свидетельствуют о позитивном влиянии предпосевной инокуляции (КМП) семян озимой пшеницы на физиолого-биохимические параметры (на примере содержания массовой доли аскорбиновой кислоты и глутатиона как компонентов неферментативной антиоксидантной системы защиты), что способствует формированию адаптивного потенциала растений к стрессовому воздействию ТМ. Установлено также положительное влияние КМП на продуктивность молодых растений озимой пшеницы: она возростала по сравнению с неинокулированными растениями на 9,6–38,8 % в зависимости от варианта опытов и уровня загрязнения почвы ТМ.

### Выводы

Исследовано влияние комплекса микробных препаратов (КМП) на физиолого-биохимические показатели молодых растений озимой пшеницы при загрязнении почвы ТМ (Pb, Cu, Cr) в условиях модельных вегетационных опытов (почва чернозем южный тяжелосуглинистый). Определено содержание в листьях массовой доли компонентов неферментативной антиоксидантной системы (аскорбиновой кислоты и глутатиона) как показателей их адаптивности к ТМ.

Установлено, что загрязнение почвы ТМ приводило к увеличению содержания аскорбиновой кислоты и глутатиона в листьях озимой пшеницы. Показано, что бактериализация способствует снижению содержания аскорбиновой кислоты и глутатиона в листьях пшеницы по сравнению с инокулированными растениями: на 6–29 % и 14–30 % соответственно. Определено положительное влияние бактериализации на продуктивность озимой пшеницы: в условиях модельных вегетационных опытов она возрастала на 9,6–38,8 % против контроля.

Установлено наличие прямой, сильной корреляционной зависимости между содержанием аскорбиновой кислоты и глутатиона в листьях пшеницы, достоверной как в случае применения КМП для инокуляции семян ( $r = 0,93–0,97$ ), так и для растений без инокуляции ( $r = 0,86–0,96$ ). Выявлена прямая, сильная и достоверная корреляционная связь между уровнем загрязнения почвы ТМ и содержанием аскорбиновой кислоты и глутатиона в листьях пшеницы:  $r = 0,92–0,94$  (без инокуляции) и  $0,88–0,93$  (КМП). Корреляционный анализ показал наличие обратной, сильной достоверной связи между уровнем загрязнения почвы ТМ и продуктивностью пшеницы:  $r = -0,97$  и  $-1,00$ , а также отрицательной связи между содержанием аскорбиновой кислоты и глутатиона в листьях пшеницы и продуктивностью молодых растений ( $r = -0,98$  и  $-0,99$ ).

### Литература

1. Синютина С. Е., Можаров А. В., Зайченко М. А. Влияние солей свинца и никеля на ферментативную активность ячменя // Вестник Тамбовского государственного университета. 2013. Т. 18. Вып. 1. С. 255–257.
2. Сыщиков Д. В. Состояние антиоксидантной глутатионзависимой системы проростков кукурузы при действии соединений кадмия // Вестник Харьковского аграрного университета. Серия «Биология». 2009. Вып. 1(16). С. 45–51.
3. Grishko V. N. Functioning of somelinks of the non-enzymatic antioxidant protection system of plant cell at the fluorine action // Материалы Международной конференции «Современная физиология растений: от молекул до экосистем». Часть 2. Сыктывкар: Институт биологии Коми, 2007. С. 101–103.
4. Maier E. A., Matthews R. D., McDowell J. A., Walden R. R., Ahner B. A. Environmental cadmium levels increase phytochelatin and glutathione in lettuce grown in a chelator-buffered nutrient solution // J. Environ. Qual. 2003. Vol. 32. No. 4. P. 1356–1364. DOI: 10.2134/jeq2003.1356.
5. Чайковская Л. А., Баранская М. И., Овсиенко О. Л., Клименко Н. Н. Влияние бактериализации на устойчивость пшеницы озимой к воздействию тяжелых металлов // Научные труды SWorld. 2015. Вып. 12. № 3 (40). С. 7–12.
6. Mostofa M. G., Hossain M. A., Fujita M., Tran L-S.P. Physiological and biochemical mechanisms associated with trehalose-induced copper-stress tolerance in rice // Scientific Reports. Biology, Medicine. 2015. Vol. 5. Art. No. 11433. DOI: 10.1038/srep11433.
7. Hasanuzzaman M., Nahar K., Rahman A., Al Mahmud J., Alharby H. F., Fujita M. Exogenous glutathione attenuates lead-induced oxidative stress in wheat by improving antioxidant defense and physiological mechanisms // Journal of Plant Interactions. 2018. Vol. 13(1). P. 203–212. DOI: 10.1080/17429145.2018.1458913.
8. Иутинская Г. А. Математическое моделирование в микробиологическом мониторинге почв, загрязненных тяжелыми металлами // Почвоведение. 2005. № 5. С. 594–599.
9. Биорегуляция микробно-растительных систем: монография // Под общ. ред. Иутинской Г. А., Пономаренко С. П. Киев: Ничлава, 2010. 464 с.
10. Белимов А. А., Тихонович И. А. Микробиологические аспекты устойчивости и аккумуляции тяжелых металлов у растений // Сельскохозяйственная микробиология. 2011. № 3. С. 17–22.
11. Чеботарь В. К., Завалин А. А., Кипрушкина Е. Н. Эффективность применения биопрепарата Экстрасол. М.: Издательство ВНИИА, 2007. 216 с.



12. Khan M. S., Zaidi A., Wani P. A. Role of phosphate solubilizing microorganisms in sustainable agriculture – a review // *Agronomy for Sustainable Development*. 2007. Vol. 27(1). P. 29–43. DOI: 10.1051/agro:2006011.
13. Методологія і практика використання мікробних препаратів у технологіях вирощування сільськогосподарських культур // За заг. ред. Волкогона В. В. Київ: Аграрна наука, 2011. 156 с.
14. Mostafiz S. B., Rahman M. Biotechnology: role of microbes in sustainable agriculture and environmental health // *The Internet Journal of Microbiology*. 2012. Vol. 10 (1). [Electronic resource]. Access point: <https://ispub.com/IJMB/10/1/14136> (reference's date 30.03.2022).
15. Фосфатмобилизующие бактерии в агроценозах Крыма: монография // Под ред. Чайковской Л. А. Симферополь: "АРИАЛ", 2018. 156 с.
16. Мікробні препарати у землеробстві. Теорія і практика // За заг. ред. Волкогона В. В. Київ: Аграрна наука, 2006. 312 с.
17. Тихонович И. А., Проворов Н. А. Сельскохозяйственная микробиология как основа экологически устойчивого агропроизводства: фундаментальные и прикладные аспекты // *Сельскохозяйственная микробиология*. 2011. № 3. С. 3–9.
18. Sharma S. B., Sayyed R. Z., Trivedi M. H., Gobi T. A. Phosphate solubilizing microbes: sustainable approach for the managing phosphorus deficiency in agricultural soils // *Springer Plus*. 2013. Vol. 2(587). P. 1–14. DOI: 10.1186/2193-1801-2-587.
19. Біотехнологія ризосфери овочевих рослин: монографія // За ред. Патики В. П. Вінниця: «ПП«ТД Едельвейс і К», 2015. 266 с.
20. Khan M. S., Zaidi A., Musarrat J. Phosphate solubilizing microorganisms: principles and application of microphos technology. Springer, 2014. 307 p. DOI: 10.1007/978-3-319-08216-5.
21. Новые технологи производства и применения биопрепаратов комплексного действия // Под ред. Завалина А. А., Кожемякова А. П. Санкт-Петербург: ХИМИЗДАТ, 2010. 64 с.
22. Iutynska G. O., Biliavska L. O., Titova L. V., Leonova N. O., Yamborko N. A., Petruk T. V., Vozniuk S. V., Litovchenko A. M. Microbial bioformulations for plant growing. Methodical recommendations. Kyiv: Zabolotny Institute of Microbiology and Virology of NAS of Ukraine, 2017. 84 с.
23. Патент РФ № 2676926 «Фосфатмобилизующий штамм почвенных бактерий *Lelliottia nimipressuralis* ССМ 32-3 и биопрепарат на его основе для оптимизации минерального питания растений, стимуляции их роста и повышения урожайности» // Авторы: Чайковская Л. А., Мельничук Т. Н., Каменева И. А., Баранская М. И., Овсиенко О. Л. 2019. Бюлл. № 2. 12 с.
24. Грицаенко З. М., Грицаенко А. О., Карпенко В. П. Методи біологічних та агрохімічних досліджень рослин і ґрунтів. К.: ЗАТ «НІЧЛАВА», 2003. 320 с.
25. Доспехов Б. А. Методика полевого опыта. М.: Книга по требованию, 2012. 351 с.
26. Most P., Papenbrock J. Possible Roles of plant sulfurtransferases in detoxification of cyanide, reactive oxygen species, selected heavy metals and arsenate // *Molecules*. 2015. Vol. 20. P. 1410–1423. DOI: 10.3390/molecules20011410.

## References

1. Sinyutina S. E., Mozharov A. V., Zaichenko M. A. Influence of lead and nickel salts on enzymatic activity of barley // *Tambov University Reports. Series "Natural and Technical Sciences"*. 2013. Vol. 18(1). P. 255–257.
2. Syshchikov D. V. State of antioxidant glutathionedependent system of maize plantlets at actions of cadmium compounds // *The Bulletin of Kharkiv National Agrarian University. Series "Biology"*. 2009. Vol. 1 (16). P. 45–51.
3. Grishko V. N. Functioning of some links of the non-enzymatic antioxidant protection system of plant cell at the fluorine action // *Materials of International Conference "The modern plant physiology: from molecules to ecosystems"*. 2007. Part 2. Syktyvkar: Institute of Biology of Komi. P. 101–103.
4. Maier E. A., Matthews R. D., McDowell J. A., Walden R. R., Ahner B. A. Environmental cadmium levels increase phytochelatin and glutathione in lettuce grown in a chelator-buffered nutrient solution // *J. Environ. Qual.* 2003. Vol. 32(4). P. 1356–1364. DOI: 10.2134/jeq2003.1356.
5. Chaikovskaya L. A., Baranskaya M. I., Ovsienko O. L., Klymenko N. N. The influence of bacterization on the resistance of winter wheat to the effects of heavy metals // *Scientific papers of SWorld*. 2015. Vol. 12. No. 3(40). P. 7–12.
6. Mostafa M. G., Hossain M. A., Fujita M., Tran L-S.P. Physiological and biochemical mechanisms associated with trehalose-induced copper-stress tolerance in rice // *Scientific Reports. Biology, Medicine*. 2015. Vol. 5. Art. No. 11433. DOI: 10.1038/srep11433.
7. Hasanuzzaman M., Nahar K., Rahman A., Al Mahmud J., Alharby H. F., Fujita M. Exogenous glutathione attenuates lead-induced oxidative stress in wheat by improving antioxidant defense and physiological mechanisms // *Journal of Plant Interactions*. 2018. Vol. 13(1). P. 203–212. DOI: 10.1080/17429145.2018.1458913.

8. Iutynskaya G. A. Mathematical modeling in the microbiological monitoring of soil contaminated with heavy metals // Eurasian Soil Science. 2005. No. 5. P. 528–532.
9. Bioregulation of microbial-plant systems: monograph // Ed. by Iutynskaya G. O., Ponomarenko S. P. Kyiv: Nichlava, 2010. 464 p.
10. Belimov A. A., Tikhonovich I. A. Microbiological aspects of resistance and accumulation of heavy metals by plants // Sel'skokhozyaistvennaya Biologia [Agricultural Biology]. 2011. No. 3. P. 10–15.
11. Chebotar V. K., Zavalin A. A., Kiprushkina E. I. Efficiency of application of biopreparation Extrasol. Moscow: Publishing house of All Russia Research Institute of Agrochemistry, 2007. 216 p.
12. Khan M. S., Zaidi A., Wani P. A. Role of phosphate solubilizing microorganisms in sustainable agriculture – a review // Agronomy for Sustainable Development. 2007. Vol. 27(1). P. 29–43. DOI: 10.1051/agro:2006011.
13. Methodology and practice of using microbial agents in agricultural crop cultivation technologies // Ed. by Volkogon V. V. Kyiv: Agrarna Nauka, 2011. 156 p.
14. Mostafiz S. B., Rahman M. Biotechnology: role of microbes in sustainable agriculture and environmental health // The Internet Journal of Microbiology. 2012. Vol. 10 (1). [Electronic resource]. Access point: <https://ispub.com/IJMB/10/1/14136> (reference's date 30.03.2022).
15. Phosphate-mobilizing bacteria in the agrocenosis of Crimea: monograph // Ed. by Chaikovskaya L. A. Simferopol: ARIAL, 2018. 156 p.
16. Microbial preparations in agriculture. Theory and practice: monograph // Ed. by Volkogon V. V. Kyiv: Agrarna Nauka, 2006. 312 p.
17. Tikhonovich I. A., Provorov N. A. Agricultural microbiology as the basis of ecologically sustainable agriculture: fundamental and applied aspects // Sel'skokhozyaistvennaya Biologia [Agricultural Biology]. 2011. No. 3. P. 3–9.
18. Sharma S. B., Sayyed R. Z., Trivedi M. H., Gobi T. A. Phosphate solubilizing microbes: sustainable approach for the managing phosphorus deficiency in agricultural soils // Springer Plus. 2013. Vol. 2(1). Art No. 587. DOI: 10.1186/2193-1801-2-587.
19. Biotechnology of vegetable plants rhizosphere: monograph // Ed. by Patyka V. P. Vinnitsa: “SH Edelweiss & K”, 2015. 266 p.
20. Khan M. S., Zaidi A., Musarrat J. Phosphate solubilizing microorganisms: principles and application of microphos technology. Springer International Publishing, 2014. 307 p. DOI: 10.1007/978-3-319-08216-5.
21. New technologies of production and application of complex action biopreparations // Ed. by Zavalin A. A., Kozhemyakov A. P. Saint-Petersburg: KHIMIZDAT, 2010. 64 p.
22. Iutynska G. O., Biliavska L. O., Titova L. V., Leonova N. O., Yamborko N. A., Petruk T. V., Vozniuk S. V., Litovchenko A. M. Microbial bioformulations for plant growing. Methodical recommendations. Kyiv: Zabolotny Institute of Microbiology and Virology of NAS of Ukraine, 2017. 84 p.
23. Patent RF No. 2676926 “Phosphate-mobilizing strains of soil bacteria *Lelliottia nimipressuralis* CCM 32-3 and biopreparation on its basis for the optimization of mineral nutrition of plants, stimulates their growth and increase yields application” // Authors: Chaikovskaya L. A., Melnichuk T. N., Kameneva I. A., Baranskaya M. I., Ovsienko O. L. 2019. Bul. No. 2. 12 p.
24. Gritsaenko Z. M., Gritsaenko A. A., Karpenko V. P. Methods of biological and agrochemical research of plants and soils. Kyiv: Nichlava, 2003. 320 p.
25. Dospekhov B. A. Methods of field research. Moscow: Kniga po trebovaniju, 2012. 351 p.
26. Most P., Papenbrock J. Possible roles of plant sulfurtransferases in detoxification of cyanide, reactive oxygen species, selected heavy metals and arsenate // Molecules. 2015. Vol. 20. P. 1410–1423. DOI: 10.3390/molecules20011410.

UDC 579.2: 581.1:632.122:633.11

Chaikovskaya L. A., Baranskaya M. I., Klimenko N. N., Ovsienko O. L.

### **EVALUATION OF THE EFFECT OF BIOLOGICAL PREPARATIONS ON THE ADAPTIVE POTENTIAL OF YOUNG WINTER WHEAT PLANTS UNDER THE STRESSFUL IMPACT OF HEAVY METALS**

**Summary.** *The results of the influence of microbial preparations on the components of the non-enzymatic antioxidant protection system of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) when soil (chernozem southern) was contaminated with heavy metals (HM) are presented. The aim of our research was to study the influence of complex microbial preparations (CMP) on the formation of adaptive potential of winter wheat at the early stages of plant development when the soil was contaminated with HM (Pb, Cu, Cr) in pot (vegetation) experiments. For pre-sowing seed inoculation, we used CMP that contains 1) “Diazophyte”; 2) preparation based on *Lelliottia nimipressuralis* CCM 32-3; 3)*

*“Biopolycid”*. The physiological and biochemical parameters of plants were determined, namely functioning of antioxidant non-enzymatic systems components (ascorbic acid and glutathione) as an indicator of their adaptability to HM. Compared to control, soil contamination with HM led to an increase in the ascorbic acid and glutathione content in the *T. aestivum* leaves by 10–82 % and 1.4–3.0 times, respectively, depending on the level of maximum permissible concentrations (MPC) of HM in the soil. Pre-sowing seed inoculation reduced the content of ascorbic acid and glutathione in wheat leaves compared to non-inoculated plants: by 6–29 % and 14–30 %, respectively; moreover, plant productivity also increased (by 9–38% compared to control). A direct, strong correlation between the content of ascorbic acid and glutathione in wheat leaves was established; it was reliable both in variants with inoculated ( $r = 0.93–0.97$ ) and non-inoculated ( $r = 0.86–0.96$ ) plants. Direct, strong and reliable correlation between the level of soil contamination with HM and the content of ascorbic acid and glutathione in wheat leaves was founded:  $r = 0.92–0.94$  (without inoculation),  $r = 0.88–0.93$  (with inoculation). Correlation analysis demonstrated the presence of inverse, strong reliable relationship between the productivity of young wheat plants and the level of soil contamination with HM ( $r = -0.98$  and  $-0.99$ ), as well as negative relationship between the content of components of antioxidant non-enzymatic systems and productivity ( $r = -0.98$  and  $-0.99$ ).

**Keywords:** microbial preparations, winter wheat, heavy metals, ascorbic acid, glutathione, productivity.

Чайковская Людмила Александровна, доктор сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник, главный научный сотрудник лаборатории растительно-микробного взаимодействия ФГБУН «Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Крыма»; 295053, Россия, Республика Крым, г. Симферополь, ул. Киевская, 150; e-mail: ludachaika@mail.ru.

Баранская Марина Ивановна, кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник лаборатории растительно-микробного взаимодействия ФГБУН «Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Крыма»; 295053, Россия, Республика Крым, г. Симферополь, ул. Киевская, 150; e-mail: baranskaya@rambler.ru.

Клименко Нина Николаевна, кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник, исполняющая обязанности заведующей отделом сельскохозяйственной микробиологии, ФГБУН «Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Крыма»; 295453, Россия, Республика Крым, г. Симферополь, ул. Киевская, 150; e-mail: ninaklymenko@yandex.ru.

Овсиенко Ольга Леонидовна, старший научный сотрудник лаборатории растительно-микробного взаимодействия ФГБУН «Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Крыма»; 295053, Россия, Республика Крым, г. Симферополь, ул. Киевская, 150; e-mail: olovsiien@mail.ru.

Chaikovskaya Ludmila Aleksandrovna, Dr. Sc. (Agr.), senior researcher, chief researcher, Laboratory of plant-microbe interaction, FSBSI “Research Institute of Agriculture of Crimea”; 150, Kievskaya str., Simferopol, Republic of Crimea, 295053, Russia; e-mail: ludachaika@mail.ru.

Baranskaya Marina Ivanovna, Cand. Sc. (Agr.), leading researcher, Laboratory of plant-microbe interaction, FSBSI “Research Institute of Agriculture of Crimea”; 150, Kievskaya str., Simferopol, Republic of Crimea, 295053, Russia; e-mail: baranskaya@rambler.ru.

Klimenko Nina Nikolaevna, Cand. Sc. (Agr.), senior researcher, acting head of the Department of Agricultural Microbiology, FSBSI “Research Institute of Agriculture of Crimea”; 150, Kievskaya str., Simferopol, Republic of Crimea, 295000, Russia; e-mail: ninaklymenko@yandex.ru.

Ovsienko Olga Leonidovna, senior researcher, Laboratory of plant-microbe interaction, FSBSI “Research Institute of Agriculture of Crimea”; 150, Kievskaya str., Simferopol, Republic of Crimea, 295053, Russia; e-mail: ludachaika@mail.ru.

Дата поступления в редакцию – 17.02.2022.

Дата принятия к печати – 15.03.2022.