

## ВЛИЯНИЕ ЦИАНОБАКТЕРИЙ НА РАСТЕНИЯ, ВЫРАЩЕННЫЕ В УСЛОВИЯХ ЗАГРЯЗНЕНИЯ МЕТИЛФОСФОНАТАМИ

Е.В. Коваль<sup>1</sup>, Ю.В. Чупрова<sup>1</sup>, С.Ю. Огородникова<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Вятский государственный университет», Киров, Россия, *undina2-10@yandex.ru*

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук, Сыктывкар, Россия

**Аннотация:** Изучено влияние цианобактерии (ЦБ) *Nostoc paludosum* на жизнедеятельность растений ячменя, которые выращивали в присутствии метилфосфоновой кислоты (МФК) и глифосата (ГЛ). Инокуляция семян ЦБ уменьшает фитотоксическое действие метилфосфонатов. Предпосевная обработка ЦБ снижает интенсивность процессов перекисного окисления липидов в клетках, оказывает ростстимулирующее действие на растения ячменя, выращенные в присутствии МФК. В опытах с ГЛ протекторное действие ЦБ проявляется в меньшей степени, что, возможно связано с высокой токсичностью ГЛ.

**Ключевые слова:** метилфосфоновая кислота, глифосат, цианобактерии, ячмень, пластидные пигменты, перекисное окисление липидов

**DOI:** 10.31255/978-5-94797-319-8-936-940

Метилфосфонаты – производные метилфосфоновой кислоты (МФК), которые характеризуются наличием химически стабильной углерод-фосфорной связи [Кононова, Несмеянова, 2002]. МФК является конечным продуктом гидролиза и универсальным маркером фосфорсодержащих отравляющих веществ. МФК устойчива в природных условиях и сохраняется в почве десятилетиями [Савельева и др., 2002]. Известно, что даже в малых концентрациях МФК оказывает влияние на растения и почвенную микрофлору [Огородникова и др., 2004; Ашихмина и др., 2007].

Среди метилфосфонатов широкое распространение получил гербицид глифосат (ГЛ). Глифосат (N-(фосфонометил)-глицин) – неселективный системный гербицид, который используется для борьбы с сорными растениями. Среди гербицидов ГЛ занимает первое место в мире по производству [Шушкова и др., 2009]. Глифосат быстро мигрирует по сосудистой системе растений и наносит им серьезные повреждения. У многолетних растений, выживших после ошибочного опрыскивания, последствия заметны спустя несколько лет [Федтке, 1985].

Цианобактерии (ЦБ) способны выдерживать значительные стрессовые нагрузки благодаря разнообразным физиологическим особенностям [Домрачева, 2005]. В сельском хозяйстве цианобактериальные препараты используются для повышения жизнеспособности растений, как ростстимулирующие средства и иммуномодуляторы.

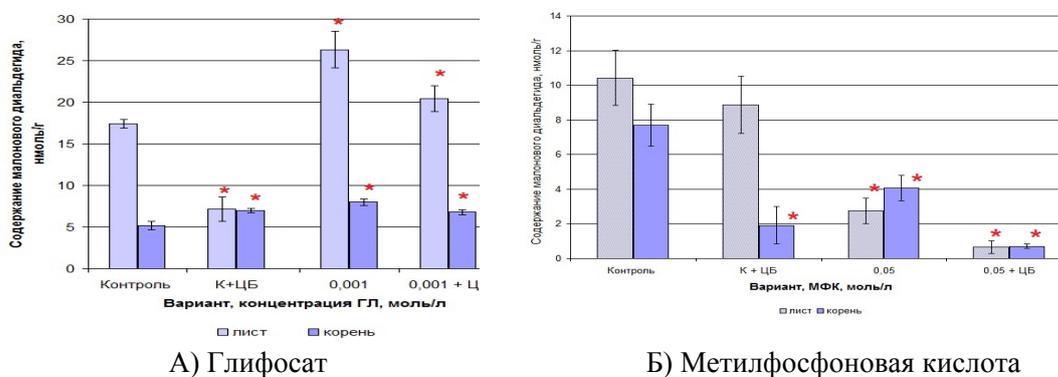
Цель работы – изучить действие ЦБ *Nostoc paludosum* на жизнедеятельность растений ячменя в условиях загрязнения метилфосфонатами (МФК и ГЛ).

Объектом исследования были растения ячменя сорта Новичок. Семена ячменя проращивали в чашках Петри в присутствии ЦБ *N. paludosum* и без ЦБ. В первой серии опытов семидневные проростки ячменя пересаживали в сосуды на водную среду, в качестве которой использовали питательный раствор Кнопа (контроль), раствор ГЛ ( $1 \cdot 10^{-3}$  моль/л), приготовленный на растворе Кнопа. Во второй серии опытов семидневные проростки ячменя пересаживали в контейнеры с песком, увлажненным раствором МФК (0,05 моль/л), приготовленным на питательном растворе Кнопа. Возраст культуры *N. paludosum* – 5 недель. Титр:  $2,6 \cdot 10^7$  кл./мл.

В фазу 2-х листьев оценивали показатели жизнедеятельности растений. Интенсивность процессов ПОЛ изучали по накоплению малонового диальдегида (МДА), который образуется в процессе ПОЛ [Лукаткин, 2002]. Содержание пластидных пигментов анализировали фотометрически в ацетоновой вытяжке [Шлык, 1971]. Для определения показателей линейного роста растений отбирали по 20 растений каждого варианта, измеряли длину побегов и корней.

Переокисление липидов является одним из универсальных механизмов управления внутриклеточным метаболизмом, индуцированное образованием активных форм кислорода [Гонтарь и др., 2006]. Установлено, что ГЛ вызывал активацию процессов ПОЛ в корнях и листьях проростков ячменя. Листья оказались более чувствительны к действию ГЛ, чем корни. Глифосат приводил к повышению накопления МДА в наземных органах, по сравнению с контролем, на 50% (рис. 1А). Обработка семян ЦБ приводила к снижению интенсивности процессов ПОЛ в листьях растений, содержание МДА было ниже, чем в контроле на 59%. Обработка семян ЦБ оказывала протекторное действие на растения ячменя в условиях загрязнения ГЛ. В опытах с действием ГЛ инокуляция семян ЦБ вызывала снижение интенсивности процессов ПОЛ в листьях и корнях ячменя, по сравнению с растениями, которые не подвергались обработке ЦБ.

При воздействии МФК отмечали значительное снижение интенсивности процессов ПОЛ в корнях и листьях опытных растений (рис. 1Б). Инокуляция семян ЦБ не вызывала достоверных изменений содержания МДА в листьях ячменя, но многократно снижала уровень МДА в корнях растений. Цианобактериальная инокуляция семян оказывала защитное действие на растения ячменя, выращенные в условиях загрязнения МФК. Отмечали значительное, в 1,9 раза по сравнению с контролем, снижение накопления МДА в листьях и корнях растений.



**Рис. 1. Влияние метилфосфонатов и обработки семян цианобактерией *N. paludosum* на содержание малонового диальдегида в корнях и листьях ячменя.**

**Примечание:** здесь и далее \* – различия между контролем и опытом достоверны при  $P \leq 0,05$ .

Известно, что каротиноиды входят в состав антиоксидантной системы клетки. При изучении действия ГЛ на растения было установлено, что содержание каротиноидов снижалось во всех вариантах, по сравнению с контролем (табл. 1). Цианобактериальная инокуляция семян вызывала значительное уменьшение накопления каротиноидов в листьях ячменя. В опыте с совместным действием ЦБ и ГЛ отмечали незначительный рост уровня каротиноидов в листьях, по сравнению с растениями, выращенными в присутствии ГЛ.

МФК, напротив, вызывала рост содержания каротиноидов в листьях (табл. 1). Инокуляция семян ЦБ также приводила к повышенному накоплению каротиноидов в

контрольном варианте и в варианте с действием МФК (более, чем в 3 раза от уровня контроля). Выявлена тесная отрицательная корреляция между содержанием МДА в листьях и содержанием желтых пигментов ( $r=-0,7$ ), что может свидетельствовать об эффективной работе антиоксидантной системы в стрессовых условиях.

Изучено накопление зеленых пигментов – хлорофиллов в листьях ячменя. Выявлено, что присутствие в среде выращивания ГЛ приводило к снижению накопления хлорофиллов в листьях на 40% от контроля (табл. 1). Инокуляция семян ЦБ не оказывала протекторного действия на растения, которые выращивали в присутствии ГЛ. Напротив, растения, выращенные в присутствии ГЛ и ЦБ, отличались более низким содержанием хлорофилла.

В опытах с действием МФК, а также с предпосевной инокуляцией семян ЦБ отмечали увеличение содержания хлорофиллов в 1,7 раза от уровня контроля (табл. 1). При совместном действии ЦБ и МФК количество хлорофиллов в листьях было ниже, чем в опыте с действием МФК, однако оставалось в 1,5 раза выше, по сравнению с контролем.

**Таблица 1.**  
**Влияние метилфосфонатов и цианобактерии *N. paludosum* на содержание пластидных пигментов в растениях ячменя**

Вариант, концентрация, моль/л	Содержание пигментов, мг/г сух. м			
	хлорофилл			каротиноиды
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>a+b</i>	
Глифосат, $1 \cdot 10^{-3}$ моль/л				
Контроль (0)	6,48±0,44	2,55±0,36	9,03	1,10±0,02
Контроль (0)+ЦБ	5,67±0,82	2,98±0,58	8,65	0,46±0,13*
ГЛ ( $1 \cdot 10^{-3}$ )	2,49±0,41*	1,75±0,34	4,24	0,68±0,04*
ГЛ ( $1 \cdot 10^{-3}$ )+ЦБ	2,16±0,13*	0,72±0,12*	2,88	0,75±0,02*
Метилфосфоновая кислота, 0,05 моль/л				
Контроль (0)	3,67±0,49	1,02±0,46	4,69	0,79±0,16
Контроль (0)+ЦБ	6,01±0,39*	2,16±0,08*	8,17*	3,24±0,10*
МФК (0,05)	6,05±0,52*	2,33±0,14*	8,38*	3,64±0,11*
МФК (0,05)+ЦБ	5,19±0,23*	1,93±0,09*	7,13*	3,30±0,04*

Изменение ростовых показателей является одним из важных и наиболее легко регистрируемых проявлений токсичности веществ в отношении растений. Установлено, что метилфосфонаты оказывали фитотоксическое действие на проростки ячменя, что проявилось в угнетении ростовых процессов (табл. 2). Наибольшее угнетение роста побегов наблюдали при действии ГЛ. Корни были более чувствительны к действию метилфосфонатов, по сравнению с побегами. Длина корней ячменя, выращенного в присутствии МФК, была на 20% меньше, по сравнению с контролем.

Предпосевная инокуляция семян ЦБ *N. paludosum* стимулировала ростовые процессы органов ячменя. Отмечали фитопротекторное действие ЦБ на растения ячменя, выращенные в присутствии метилфосфонатов. В варианте с совместным действием ЦБ и МФК длина корней и побегов ячменя, была, соответственно, в 1,26 и 1,14 раза выше, чем в контроле. В меньшей степени проявилось защитное действие ЦБ на растения, выращенные в присутствии ГЛ, что, по-видимому, обусловлено большей фитотоксичностью ГЛ, по сравнению с МФК. Цианобактерии значительно снижали ростингибирующее действие метилфосфонатов на корни. Возможно, это обусловлено

способом ЦБ обработки растений, и может быть следствием образования растительно-микробного комплекса, который способствует повышению жизнеспособности растений в условиях загрязнения метилфосфонатами.

Таблица 2.

Действие метилфосфонатов и цианобактерии *N. paludosum* на рост органов ячменя

Вариант, концентрация, моль/л	Длина, % к контролю	
	побег	корень
Глифосат, $1 \cdot 10^{-3}$ моль/л		
Контроль (0)+ЦБ	129	128
ГЛ ( $1 \cdot 10^{-3}$ )	60*	90
ГЛ ( $1 \cdot 10^{-3}$ )+ЦБ	72	114
Метилфосфоновая кислота, 0,05 моль/л		
Контроль (0)+ЦБ	113	114
МФК (0,05)	102	78
МФК (0,05)+ЦБ	114	126

Таким образом, загрязнение среды выращивания метилфосфонатами приводит к нарушению жизнедеятельности растений ячменя. Глифосат вызывает активацию процессов ПОЛ в растительных клетках и снижение накопления пластидных пигментов в листьях. В присутствии МФК, напротив, происходит снижение интенсивности процессов ПОЛ и накопление хлорофиллов и каротиноидов в клетках ячменя. Метилфосфонаты вызывают угнетение роста ячменя. Глифосат, по сравнению с МФК, в большей степени ингибирует ростовые процессы. Различия в ответных реакциях растений на действие метилфосфонатов, возможно, обусловлены большей фитотоксичностью ГЛ, по сравнению с МФК.

Инокуляция семян ЦБ *N. paludosum* уменьшает фитотоксическое действие метилфосфонатов, что проявляется как в биохимических изменениях в клетках, так и в показателях линейного роста проростков. Предпосевная обработка ЦБ *N. paludosum* снижает интенсивность процессов ПОЛ в клетках, оказывает ростстимулирующее действие на растения ячменя, выращенные на песчаной культуре, загрязненной МФК. В опытах с ГЛ протекторное действие ЦБ проявляется в меньшей степени, что, возможно, связано с высокой токсичностью ГЛ.

Литература

Ашихмина Т.Я., Кондакова Л.В., Домрачева Л.И., Огородникова С.Ю. Метилфосфоновая кислота как регулятор биологических процессов в экологических системах: действие на микроорганизмы, ферментативную активность и высшие растения // Теоретическая и прикладная экология. – 2007. – № 2. – С. 78–85.

Гонтарь О.Б., Жиров В.К., Хаитбаев А.Х., Говорова А.Ф. Возрастные аспекты адаптации растений в экстремальных условиях // Вестник МГТУ. – 2006. – Т. 9, № 5. – С. 729–734.

Домрачева Л.И. «Цветение» почвы и закономерности его развития. – Сыктывкар: 2005. – 336 с.

Кононова С.В., Несмеянова М.А. Фосфонаты и их деградация микроорганизмами // Биохимия. – 2002. – Т. 67, Вып. 2. – С. 220–233.

Лукаткин А. С. Холодовое повреждение теплолюбивых растений и окислительный стресс. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2002. – 208 с.

Огородникова С.Ю., Головки Т.К., Ашихмина Т.Я. Реакции растений на фосфорорганический ксенобиотик – метилфосфоновою кислоту // Научные доклады. – Вып. 464. – Сыктывкар: Коми научный центр УрО РАН. – 2004. – 24 с.

Савельева Е.И., Зенкевич И.Г., Кузнецова Т.А., Радилов А.С., Пшеничная Г.В. Исследование продуктов превращений фосфорорганических отравляющих веществ методом газовой хроматографии – масс-спектрометрии // Российский химический журнал. – 2002. – Т. XLVI, № 6. – С. 82–91.

Федтке К. Биохимия и физиология действия гербицидов. – М.: 1985. – 223 с.

Шлык А.А. Определение хлорофиллов и каротиноидов в экстрактах зеленых листьев // Биохимические методы в физиологии растений. – М.: Наука, 1971. – С. 154–171.

Шушкова Т.В., Васильева Г.К., Ермакова И.Т., Леонтьевский А.А. Сорбция глифосата и его микробная деградация в почвенных суспензиях // Прикладная биохимия и микробиология. – 2009. – Т. 45, № 6. – С. 664–670.

## THE INFLUENCE OF CYANOBACTERIA ON BARLEY PLANTS, GROWN IN CONDITIONS OF METHYLPHOSPHONATES POLLUTION

E.V. Koval<sup>1</sup>, J.V. Chuprova<sup>1</sup>, S.Y. Ogorodnikova<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Vyatka State University», Kirov, Russia, [undina2-10@yandex.ru](mailto:undina2-10@yandex.ru)

<sup>2</sup>Institute of Biology of Komi Scientific Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Syktyvkar, Russia

**Abstract.** The effect of *Nostoc paludosum* on the vital activity of barley plants, which was grown in the presence of methylphosphonic acid (MPA) and glyphosat (GL), was studied. Inoculation of seeds of the cyanobacteria (CB) reduces the phytotoxic effect of methylphosphonates. Presowing treatment of the CB reduces the intensity of processes of lipid peroxidation in cells, exerts a growth stimulating effect on barley plants grown in the presence of MPA. In the experiments with GL, the protective action of the CB appears to a lesser degree, which is possibly due to the high toxicity of GL.

**Keywords:** *methylphosphonic acid, glyphosat, cyanobacteria, barley, plastid pigments, lipid peroxidation*