



Научная статья

# Обработка семян биопленками цианобактерий для повышения устойчивости растений в условиях химического загрязнения метилфосфонатами

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

<sup>1</sup> Государственный аграрный университет Северного Зауралья, 625003, г. Тюмень, ул. Республики, д. 7

<sup>2</sup> Институт биологии Коми научного центра УрО РАН, 167000, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 24

\*koval.ev@gausz.ru

Поступила в редакцию: 09.06.2022

Доработана: 29.06.2022

Принята к печати: 05.07.2022

Опубликована онлайн: 28.02.2023

DOI: 10.23859/estr-220609

УДК 58.071+574.24

**Аннотация.** В ходе работы было исследовано влияние биопленок с доминированием цианобактерии *Nostoc commune*, метилфосфоновой кислоты и их совместного действия на биохимические и физиологические показатели жизнедеятельности растений ячменя. Показано, что метилфосфоновая кислота в концентрации 0.5 и 1 мМ способствовала активации процессов перекисного окисления липидов в листьях ячменя на 20 и 60% соответственно, а также снижению количества хлорофиллов и длины проростков на 20%. Инокуляция семян ячменя природными многовидовыми биопленками с доминированием цианобактерии *Nostoc commune* снижала фитотоксические эффекты метилфосфоновой кислоты, что проявилось в ингибировании интенсивности процессов окисления липидов, накоплении хлорофиллов (при действии кислоты в концентрации 0.5 мМ), антиоксидантов – каротиноидов, а также в стимуляции ростовых процессов. Отмечено, что в ответ на обработку семян биопленками снижается накопление антоцианов в листьях: содержание пигмента не превышало 70% от уровня контрольных растений. Таким образом, биопленки с доминированием цианобактерии *Nostoc commune* стимулируют механизмы устойчивости растений при загрязнении среды метилфосфоновой кислотой.

**Ключевые слова:** метилфосфоновая кислота, перекисное окисление липидов, пластидные пигменты, антоцианы, рост, *Nostoc commune*, *Hordeum distichon*

Для цитирования. Коваль, Е.В., Огородникова, С.Ю., 2023. Обработка семян биопленками цианобактерий для повышения устойчивости растений в условиях химического загрязнения метилфосфонатами. *Трансформация экосистем* 6 (1), 99–107. <https://doi.org/10.23859/estr-220609>

## Article

# Treatment of seeds with cyanobacterial biofilm to increase plant resistance to methylphosphonate pollution

Ekaterina V. Koval<sup>1\*</sup> , Svetlana Yu. Ogorodnikova 

<sup>1</sup> Northern Trans-Ural State Agricultural University, ul. Respubliki 7, Tyumen, 7625003 Russia

<sup>2</sup> Institute of Biology of Komi Science Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, ul. Kommunisticheskaya 24, Syktyvkar, 167000 Russia

\*koval.ev@gausz.ru

---

Received: 09.06.2022

Revised: 29.06.2022

Accepted: 05.07.2022

Published online: 28.02.2023

DOI: 10.23859/estr-220609

UDC 58.071+574.24

Translated by S.V. Nikolaeva

**Abstract.** The effect of biofilms dominated by the cyanobacterium *Nostoc commune*, methylphosphonic acid and their combined action on the biochemical and physiological parameters of the vital activity of barley plants was studied. Methylphosphonic acid at a concentration of 0.5 and 1 mM was shown to promote the activation of lipid peroxidation processes in leaves by 20 and 60%, respectively, as well as a decrease in the amount of chlorophyll and the length of seedlings by 20%. Inoculation of seeds with natural multispecies biofilms dominated by the cyanobacterium *Nostoc commune* reduced the phytotoxic effects of methylphosphonic acid, which manifested itself in the inhibition of the intensity of lipid oxidation processes, the accumulation of chlorophyll (under the action of acid at a concentration of 0.5 mM), antioxidant carotenoids, and also in the stimulation of growth processes. In response to the treatment of seeds with biofilms, the accumulation of anthocyanins in the leaves decreased, while the pigment content did not exceed 70% of the level of control plants. It has been established that biofilms dominated by the cyanobacterium *Nostoc commune* contribute to an increase in plant resistance to contamination with methylphosphonic acid.

**Keywords:** methylphosphonic acid, cyanobacteria, lipid peroxidation, pigments, growth, anthocyanins, *Nostoc commune*, *Hordeum distichon*

*To cite this article.* Koval, E.V., Ogorodnikova, S.Yu., 2023. Treatment of seeds with cyanobacterial biofilm to increase plant resistance to methylphosphonate pollution. *Ecosystem Transformation* 6 (1), 99–107. <https://doi.org/10.23859/estr-220609>

---

## Введение

На сегодняшний день агроэкосистемы занимают более 10% суши (Шеуджен и др., 2018). При этом в условиях роста численности и потребностей населения актуальнее дальнейшее развитие сельского хозяйства, что помимо смены и трансформации естественных ландшафтов сопряжено с другими экологическими проблемами, такими как загрязнение окружающей среды и истощение почвенного покрова. Активная химизация сельского хозяйства способствует загрязнению окружающей среды пестицидами и продуктами их деградации, к числу которых относятся метилфосфонаты.

Быстрые темпы развития растениеводства требуют использования многочисленных химических препаратов, в том числе фосфорорганических пестицидов. Одним из самых продаваемых гербицидов в мире является Глифосат (препараты Раундап, Ураган, Глифор и др.), действующим веществом которых служит производное метилфосфоновой кислоты – N-фосфометил глицин (Baylis, 2000). В процессе деградации метилфосфонатов в окружающей среде образуется метилфосфоновая кислота (МФК) (Брызгалина и др., 2014). Сроки разложения некоторых метилфосфонатов и продуктов их биodeградации в почве зависят от климата и химического состава грунта и варьируют от 55 дней до 3 лет и более (Савельева и др., 2002). МФК устойчива к фотолизу, а также к химическому и тепловому воздействию (Кононова и Несмеянова, 2002). Эта персистентность обеспечивается наличием в составе молекулы МФК химически стабильной углерод-фосфорной (C–P) связи. Известно, что МФК вызывает нарушение жизнедеятельности фототрофных организмов, оказывает влияние на почвенную микробиоту (Ашихмина и др., 2007; Коваль и др., 2013; Огородникова и др., 2004).

В почвенной среде обитает множество микроорганизмов: бактерии, в том числе актиномицеты, которые участвуют в круговороте азота, фосфора, серы, железа, углерода и других элементов, грибы – деструкторы органического вещества, водоросли, которые обогащают почву кислородом и служат питанием для других участников пищевых цепей. В процессе жизнедеятельности микроорганизмов почва насыщается гумусовыми кислотами, доступными макро- и микроэлементами, ферментами, ростостимуляторами, витаминами, гормонами. Все это благоприятно сказывается на ее структуре и в целом на почвенном плодородии (Батькаев, 2013). Именно поэтому большой интерес для повышения продуктивности почв, улучшения состояния растений, стимуляции их роста и повышения иммунитета представляют микробные биопрепараты, которые уже сейчас применяются в сельском и лесном хозяйстве (Домрачева и др., 2020).

Цианобактерия (ЦБ) *Nostoc commune* Vaucher ex Bornet & Flahault – один из самых активных

колонизаторов пространства, которые обитают повсеместно (Домрачева и др., 2007), даже в загрязненных средах (Киреева и др., 2003). Возможно, уникальные адаптационные и экологические способности этой ЦБ связаны с тем, что вид является эдификатором многовидовых альго-цианобактериальных ценозов с богатым спектром гетеротрофных спутников (Domracheva et al., 2007). Зачастую различные группы микроорганизмов (в том числе и *N. commune*) формируют почвенные биопленки (БП) – структурированные колонии с большой плотностью клеток разнообразных организмов. Актуальными являются исследования биоремедиационных возможностей подобных биопленок с перспективой применения их для повышения устойчивости растений в условиях химического загрязнения.

Целью работы было изучить влияние инокуляции семян ячменя многовидовыми биопленками с доминированием ЦБ *N. commune* на биохимические и ростовые показатели растений, выращенных в условиях загрязнения среды МФК.

## Материал и методы

Объектами исследования были растения ячменя двурядного сорта Новичок (*Hordeum distichon* L.) и БП с доминированием ЦБ *N. commune*, собранные Кондаковой Л.В на песчано-гравийной насыпи вдоль железной дороги в Нижегородской области. Для сорта ячменя Новичок характерна устойчивость к черной и твердой головне, средняя восприимчивость к возбудителям корневой гнили, к которым могут относиться фитопатогенные грибы родов *Fusarium*, *Bipolaris*, *Typhula*, *Rhizoctonia* и др., стабильная урожайность, а также алюмотолерантность (Головкин и др., 2004; Родина и др., 2007).

В ходе работы природные БП предварительно выращивали при 12-ти часовом освещении (3000 лк) и температуре +25 °С на жидкой среде Громова № 6 без азота. Непосредственно перед использованием в эксперименте БП разбивали с получением клеточной суспензии. Помимо доминирующего вида, в состав биопленок входили гетероцистные и безгетероцистные цианобактерии (8 видов), а также одноклеточная зеленая водоросль (*Chlorella mirabilis* V.M. Andreeva). Среди прочих ЦБ в составе БП присутствовали: *N. punctiforme* (Kütz.) Har., *Phormidium autumnale* (C. Agardh) Gomont, *Ph. mole* (Kütz.) Gomont, *Leptolyngbya foveolarum* (Mont. ex Gomont), *Plectonema nostocorum* Gomont, *Leptolyngbya fragilis* (Gomont) Anagnostidis & Komárek, *Phormidium uncinatum* Gomont ex Gomont, *Borzia trilocularis* Cohn. ex Gomont. Численность доминирующего вида *N. commune* в культуре составляла  $1.61 (\pm 0.21) \cdot 10^9$  кл./г (83.12%) (Горностаева и др., 2013). Видовой состав бактерий-спутников не изучался.

Для участия в эксперименте использовалась культура БП возрастом 7 недель (отсчет возраста биопленок велся с начала культивирования сухой пленки в жидкой среде Громова). Титр клеток составил  $1.6 \cdot 10^8$  кл./мл (определен методом прямого счета под микроскопом в камере Горяева).

В течение недели семена ячменя проращивали на дистиллированной воде в чашках Петри (15–20 семян на чашку) с добавлением суспензии БП и без нее. Опыты проводили на водной среде, в частности, на питательном растворе Кнопа (контрольный вариант) и растворах МФК различной концентрации (0.5 мМ и 1 мМ), куда пересаживали недельные проростки ячменя по 20 штук на контейнер.

Действие БП на жизнеспособность проростков ячменя, в том числе в условиях загрязнения МФК, оценивали по физиологическим (изменение роста проростков) и по биохимическим показателям: активность процессов перекисного окисления липидов (ПОЛ) в корнях и листьях опытных растений, содержанию антоциановых и фотосинтетических пигментов.

Исследование роста органов (корней и побегов) проводилось методом прямого измерения, в котором участвовало по 20 растений из всех опытных вариантов. Интенсивность процессов ПОЛ в растительных клетках анализировали по цветной реакции тиобарбитуровой кислоты с малоновым диальдегидом (МДА) – одним из продуктов ПОЛ (длина волны 532 нм) (Лукаткин, 2002). Содержание антоциановых пигментов в листьях ячменя определяли

по методике Муравьевой спектрофотометрически при длинах волн 510, 657 нм (Муравьева и др., 1987). Оценку количества пластидных пигментов проводили с помощью спектрофотометрического измерения уровня хлорофилла *a* и *b*, а также каротиноидов в ацетоновой вытяжке (длина волны 662, 644 (хлорофиллы), 440.5 нм (каротиноиды)) (Шлык, 1971). Все эксперименты дублировали трижды.

## Результаты и обсуждение

МФК оказывала токсическое действие на проростки ячменя, о чем говорит активация окислительных процессов в клетках, оцениваемое по накоплению МДА (Рис. 1). В опытах с загрязнением среды выращивания МФК (0.5 мМ и 1 мМ) содержание МДА в листьях было выше в 1.2 и 1.6 раза от контроля соответственно. Корни были более устойчивы к действию МФК, значимых различий с контролем по содержанию МДА не выявлено.

В ходе исследования влияния цианобактериальной инокуляции на интенсивность процессов ПОЛ в корнях и листьях ячменя было установлено, что добавление БП с доминированием *N. commune* при проращивании способствовало снижению количества МДА в растительных клетках (Рис. 1, К+БП). Наиболее чувствительно на обработку БП отреагировали листья, где накопление продуктов ПОЛ снизилось на 10% от контроля.

Протекторный эффект БП для растений отмечали на загрязненных МФК средах. В вариантах опыта с обработкой БП и выращиванием растений в присутствии МФК интенсивность процессов

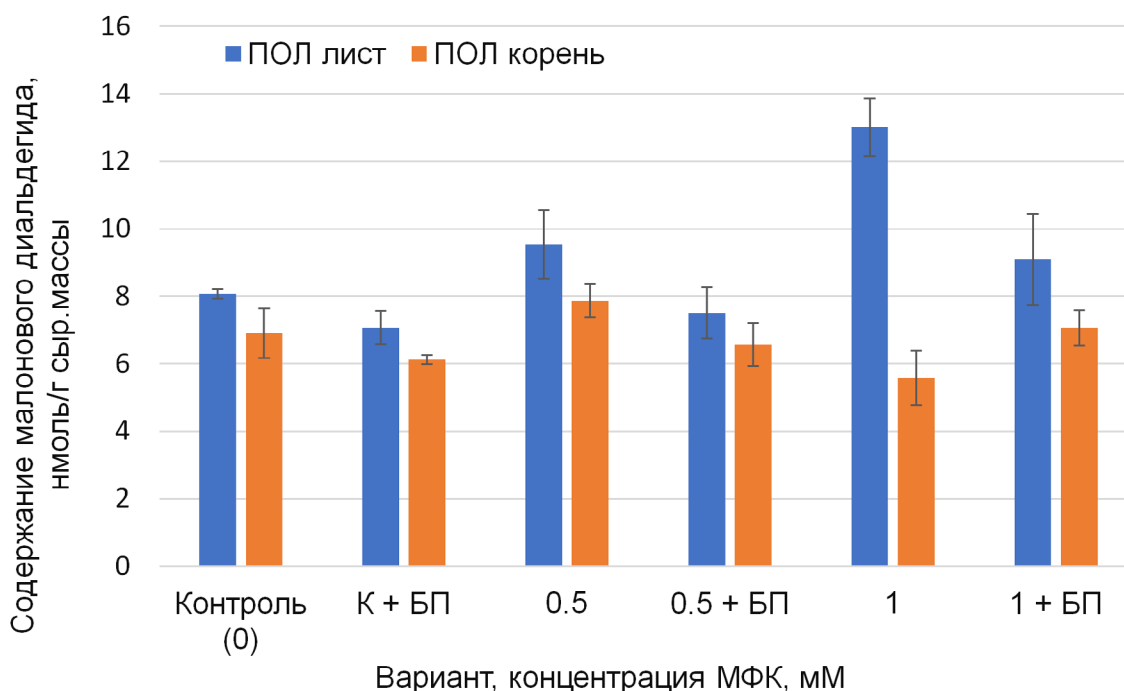


Рис. 1. Изменение активности процессов перекисного окисления липидов в органах ячменя при воздействии метилфосфоновой кислоты (МФК) и природных биопленок (БП) с доминированием *Nostoc commune*.

ПОЛ в растительных клетках снижалась до уровня контрольных растений, что значительно меньше, чем в опытах с действием МФК без БП (Рис. 1).

Содержание пластидных пигментов – важный показатель, отражающий физиологическое состояние растений. В ходе работы было выявлено, что добавка БП к семенам при проращивании впоследствии ингибировала накопление в листьях опытных растений общего количества хлорофиллов *a* и *b* (Табл. 1). МФК в низкой концентрации (0.5 мМ) также вызвала достоверное снижение уровня зеленых пигментов в растительных тканях на 20% по сравнению с растениями контрольного варианта ( $p \leq 0.5$ ). При воздействии 1 мМ МФК сумма хлорофиллов оставалась в пределах контроля. Инокуляция семян БП стимулировала накопление хлорофиллов в условиях загрязнения МФК (0.5 мМ) до уровня контрольных растений. При действии МФК в повышенной концентрации достоверных изменений количества хлорофиллов в растениях, семена которых обрабатывали при проращивании БП, не выявлено.

В ответ на действие МФК в растительных клетках накапливались вещества с антиоксидантными свойствами – каротиноиды и антоцианы, что является неспецифической реакцией на стрессовые условия произрастания (Чупахина и др., 2011). Как антоцианы, так и каротиноиды представляют собой низкомолекулярные антиоксиданты в составе защитной системы растений. Количество антоцианов в листьях зависело от концентрации МФК. Так, 0.5 мМ МФК способствовала снижению уровня антоцианов, а МФК в более высокой концентрации (1 мМ), напротив, активизировала накопление антоцианов в среднем в 1.2 раза выше контроля (Рис. 2). Растения, выращенные с добавлением БП, как в присутствии МФК, так и в контрольном варианте отличались пониженным содержанием антоцианов (в среднем на 40% ниже контроля). Показатели интенсивности процессов

ПОЛ и содержания антоциановых пигментов тесно коррелировали друг с другом ( $r = 0.79$ ).

При совместном действии МФК и БП на проростки ведущую роль в антиоксидантной защите играли каротиноиды, уровень которых возрастал по сравнению с их количеством в вариантах с действием чистой МФК. Достоверные различия в содержании каротиноидов были выявлены в варианте с 0.5 мМ МФК: количество желтых пигментов снижалось на 20% от уровня контроля (Табл. 1). При этом МФК в более высокой концентрации (1 мМ), напротив, стимулировала рост количества пигментов. В проростках, инокулированных при проращивании БП и выращенных на растворе 1 мМ МФК, данная закономерность сохранялась, и прирост количества каротиноидов составил 27% к контролю.

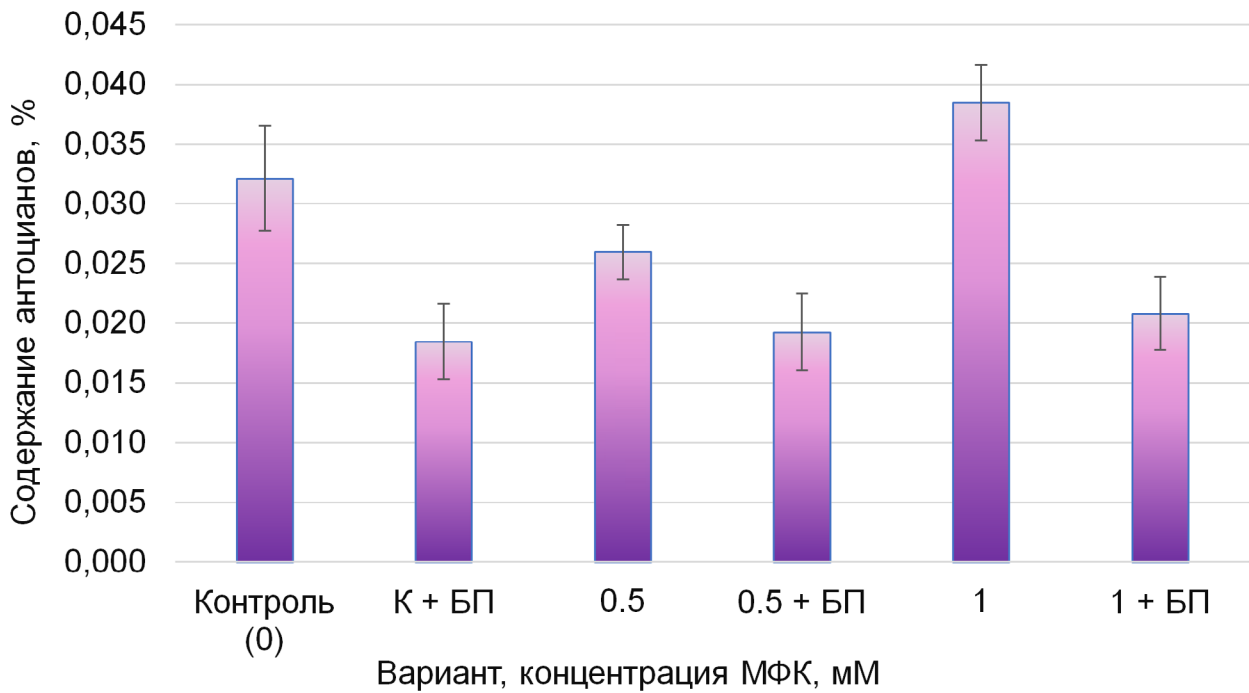
Рост растений также является интегральным показателем адаптации к условиям среды обитания. Обработка семян БП оказывала ростактивирующее действие на проростки ячменя: длина побегов и корней была достоверно выше, чем в контрольном варианте (Рис. 3, К+БП). В опытах с действием МФК, напротив, отмечали ингибирование линейного роста побегов. При этом корни были менее чувствительны к загрязнению среды выращивания; их длина достоверно не отличалась от корней контрольных растений. Инокуляция семян БП при проращивании уменьшала ростингибирующее действие МФК. Длина побегов и корней ячменя в опытах с действием БП и МФК была достоверно больше по сравнению с растениями, которые не обрабатывали БП. Вероятно, ростостимулирующий эффект связан с наличием в клетках ЦБ ауксино- и гиббереллиноподобных веществ (Domracheva et al., 2007).

## Выводы

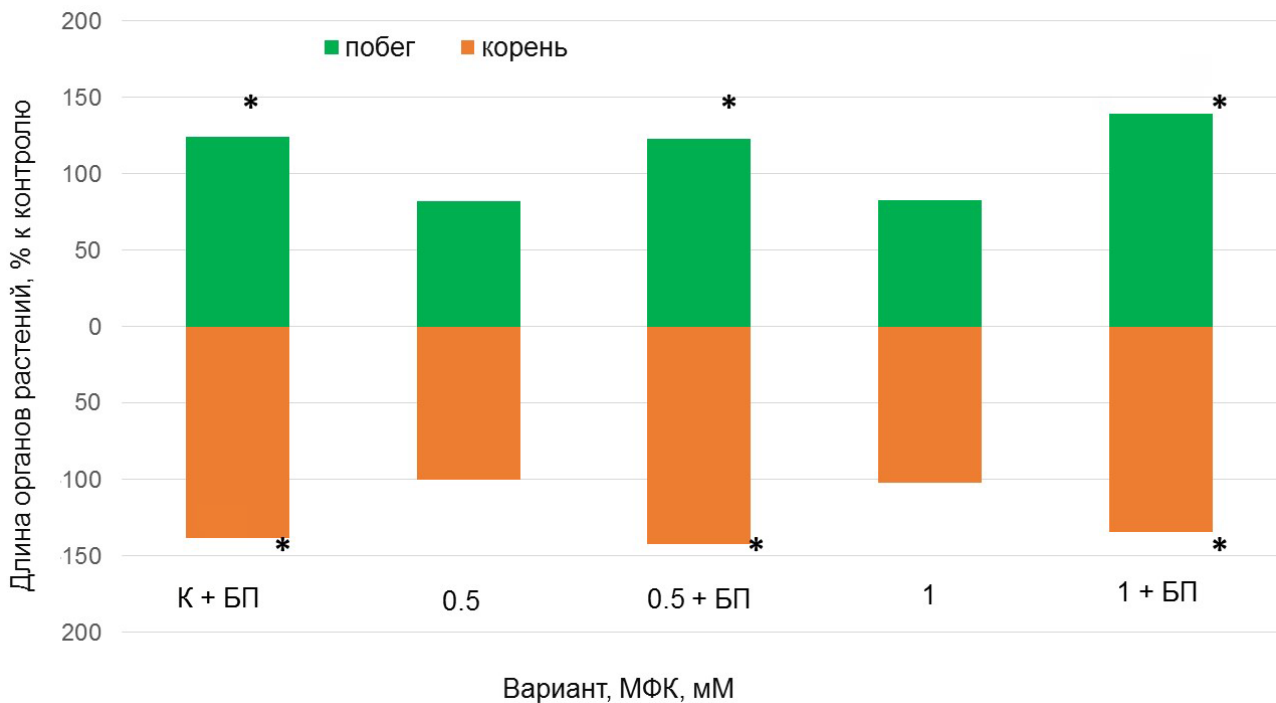
1. МФК оказывает фитотоксическое действие на растения ячменя. Оно проявляется в активации

**Табл. 1.** Содержание пластидных пигментов в листьях ячменя при действии метилфосфоновой кислоты и биопленок (БП) с доминированием *Nostoc commune*.

Вариант, мМ	Содержание пигментов, мг/г сухой массы	
	Хлорофилл <i>a+b</i>	Каротиноиды
Контроль (0)	8.34 ± 1.24	1.17 ± 0.14
Контроль +БП	6.42 ± 0.15	1.00 ± 0.15
0.5 МФК	6.76 ± 0.30	0.96 ± 0.02
0.5 МФК + БП	7.89 ± 0.40	1.10 ± 0.03
1 МФК	9.01 ± 0.17	1.35 ± 0.03
1 МФК + БП	8.93 ± 0.10	1.49 ± 0.11



**Рис. 2.** Действие метилфосфоновой кислоты и природных биопленок с доминированием *Nostoc commune* на накопление антоцианов в листьях ячменя.



**Рис. 3.** Влияние метилфосфоновой кислоты и биопленок цианобактерий с доминированием *Nostoc commune* на рост растений ячменя. \* – различия с контролем достоверны при  $p \geq 0.05$ .

процессов ПОЛ, снижении количества хлорофиллов (при 0.5 мМ МФК) и угнетении роста побегов. МФК в изученных концентрациях тормозит линейный рост наземной части проростков, при этом поллютант в высокой дозе (1 мМ) значительно активизирует процессы ПОЛ в листьях, что сопровождается увеличением концентрации веществ-антиоксидантов в клетках (антоцианов и каротиноидов).

2. Инокуляция семян многовидовыми биопленками с доминированием ЦБ *N. commune* оказывает защитное действие на ячмень, выращенный на загрязненном МФК субстрате. Фитопротекторные свойства БП реализуются путем торможения интенсивности процессов окисления липидов в листьях опытных растений и увеличения количества каротиноидов, играющих роль антиоксидантов в растительных клетках.

3. Предпосевная инокуляция семян биопленками с доминированием *N. commune* индуцирует значительный рост органов ячменя, выращенного в присутствии МФК. Это свидетельствует о фитопротекторном эффекте организмов, входящих в состав биопленок.

## Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания Института биологии Коми НЦ УрО РАН по теме «Структура и состояние компонентов техногенных экосистем подзоны южной тайги».

## ORCID

Е.В. Коваль [id 0000-0003-3179-1557](https://orcid.org/0000-0003-3179-1557)

С.Ю. Огородникова [id 0000-0001-8865-4743](https://orcid.org/0000-0001-8865-4743)

## Список литературы

- Ашихмина, Т.Я., Кондакова, Л.В., Домрачева, Л.И., Огородникова, С.Ю., 2007. Метилфосфоновая кислота как регулятор биологических процессов в экологических системах: действие на микроорганизмы, ферментативную активность и высшие растения. *Теоретическая и прикладная экология* 2, 78–85.
- Батькаев, Ж.Я., 2013. Роль микроорганизмов в повышении плодородия почвы. *Почвоведение и агрохимия* 2, 24–27.
- Брызгалова, Е.В., Рудь, В.Л., Зыгин, Д.А., Беломытцев, М.К., 2014. Исследование процессов трансформации фосфорсодержащих органических веществ в окружающей среде. *Теоретическая и прикладная экология* 4, 75–77.
- Головко, Т.К., Родина, Н.А., Куренкова, С.В., Табаленкова, Г.Н., 2004. Ячмень на севере (селекционно-генетические и физиолого-биохимические основы продуктивности). УрО РАН, Екатеринбург, Россия, 156 с.
- Горностаева, Е.А., Фокина, А.И., Кондакова, Л.В., Огородникова, С.Ю., Домрачева, Л.И., Лаптев, Д.С., Слестникова, Е.М., 2013. Потенциал природных биопленок *Nostoc commune* как сорбентов тяжелых металлов в водной среде. *Вода: химия и экология* 1 (55), 93–101.
- Домрачева, Л.И., Зыкова, Ю.Н., Трефилова, Л.В., Ковина, А.Л., 2020. Использование почвенных цианобактерий в агрономической практике. В: Симбирских, Е.С. (ред.), *Инновационное развитие агропромышленного комплекса как фактор конкурентоспособности: проблемы, тенденции, перспективы*. Вятская государственная сельскохозяйственная академия, Киров, Россия, 22–39.
- Домрачева, Л.И., Кондакова, Л.В., Пегушина, О.А., Фокина, А.И., 2007. Биопленки *Nostoc commune* – особая микробная сфера. *Теоретическая и прикладная экология* 1, 15–20.
- Киреева, Н.А., Кузяхметов, Г.Г., Мифтахова, А.М., Водопьянов, В.В., 2003. Фитотоксичность антропогенно загрязненных почв. Гилем, Уфа, Россия, 266 с.
- Коваль, Е.В., Свинолупова, Л.С., Огородникова, С.Ю., 2013. Оценка токсических эффектов метилфосфоновой кислоты по ответным биохимическим реакциям фототрофных организмов. *Теоретическая и прикладная экология* 1, 89–93.
- Кононова, С.В., Несмеянова, М.А., 2002. Фосфонаты и их деградация микроорганизмами. *Биохимия* 67 (2), 220–233.
- Лукаткин, А.С., 2002. Холодовое повреждение теплолюбивых растений и окислительный стресс. Издательство Мордовского университета, Саранск, Россия, 208 с.
- Муравьева, Д.А., Бубенчикова, В.Н., Беликов, В.В., 1987. Спектрофотометрическое определение суммы антоцианов в цветках василька синего. *Фармация* 5, 28–29.
- Огородникова, С.Ю., Головко, Т.К., Ашихмина, Т.Я., 2004. Реакция растений на фосфорорганический ксенобиотик – метилфосфоновую кислоту. *Научные доклады Коми научного центра УрО РАН* 464, 1–24.
- Родина, Н.А., Щенникова, И.Н., Грибков, М.В., 2007. Селекция адаптивных сортов ярового ячменя. *Зерновое хозяйство* 3–4, 15–16.

Савельева, Е.И., Зенкевич, И.Г., Кузнецова, Т.А., Радиллов, А.С., Пшеничная, Г.В., 2002. Исследование продуктов превращений фосфорорганических отравляющих веществ методом газовой хроматографии – масс-спектрометрии. *Российский химический журнал* **46** (6), 82–91.

Чухахина, Г.Н., Масленников, П.В., Скрыпник, Л.Н., 2011. Природные антиоксиданты (экологический аспект). Издательство БФУ им. И. Канта, Калининград, Россия, 111 с.

Шеуджен, А.Х., Аканова, Н.И., Бондарева, Т.Н., 2018. Агрехимия. Ч. 6. Экологическая агрехимия. Полиграф-ЮГ, Майкоп, Россия, 575 с.

Шлык, А.А., 1971. Определение хлорофиллов и каротиноидов в экстрактах зеленых листьев. В: Павлинова, О.А. (ред.), *Биохимические методы в физиологии растений*. Наука, Москва, СССР, 154–171.

Baylis, A.D., 2000. Why glyphosate is a global herbicide: strengths, weaknesses and prospects. *Pest Management Science* **56**. 299–308. [http://www.doi.org/10.1002/\(SICI\)1526-4998\(200004\)56:4<299::AID-PS144>3.3.CO;2-B](http://www.doi.org/10.1002/(SICI)1526-4998(200004)56:4<299::AID-PS144>3.3.CO;2-B)

Domracheva, L.I., Dabakh, E.V., Kondakova, L.V., Varaksina, A.I., Fokina, A.I., 2006. Algal-mycological complexes in soils upon their chemical pollution. *Eurasian Soil Science* **39**, 91–97.

## Funding

The work was carried out within the framework of the state task of the Institute of Biology, Komi Scientific Center, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, on the topic “Structure and state of the components of technogenic ecosystems in the southern taiga subzone”.

## References

Ashihmina, T.Ya., Kondakova, L.V., Domracheva, L.I., Ogorodnikova, S.Yu., 2007. Metilfosfonovaya kislota kak regulyator biologicheskikh processov v ekologicheskikh sistemakh: deystvie na mikroorganizmy, fermentativnyuyu aktivnost' i vysshie rasteniya [Methylphosphonic acid as a regulator of biological processes in ecological systems: action on microorganisms, enzymatic activity and higher plants]. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya [Theoretical and Applied Ecology]* **2**, 78–85. (In Russian).

Bat'kaev, Zh.Ya., 2013. Rol' mikroorganizmov v povyshenii plodorodiya pochvy [The role of microorganisms in improving soil fertility]. *Pochvovedenie i agrokimiya [Soil Science and Agrochemistry]* **2**, 24–27. (In Russian).

Baylis, A.D., 2000. Why glyphosate is a global herbicide: strengths, weaknesses and prospects. *Pest Management Science* **56**. 299–308. [http://www.doi.org/10.1002/\(SICI\)1526-4998\(200004\)56:4<299::AID-PS144>3.3.CO;2-B](http://www.doi.org/10.1002/(SICI)1526-4998(200004)56:4<299::AID-PS144>3.3.CO;2-B)

Bryzgalina, E.V., Rud', V.L., Zygin, D.A., Belomytcev, M.K., 2014. Issledovanie protsessov transformatsii fosforsoderzhashhikh organicheskikh veshchhestv v okruzhayushhey srede [Study of the processes of transformation of phosphorus-containing organic substances in the environment]. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya [Theoretical and Applied Ecology]* **4**, 75–77. (In Russian).

Chupakhina, G.N., Maslennikov, P.V., Skrypnik, L.N., 2011. Prirodnye antioksidanty (ekologicheskii aspekt) [Natural antioxidants (environmental aspect)]. Publishing House of the Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia, 111 p. (In Russian).

Domracheva, L.I., Dabakh, E.V., Kondakova, L.V., Varaksina, A.I., Fokina, A.I., 2006. Algal-mycological complexes in soils upon their chemical pollution. *Eurasian Soil Science* **39**, 91–97.

Golovko, T.K., Rodina, N.A., Kurenkova, S.V., Tabalenkova, G.N., 2004. Yachmen' na severe (selekcionno-geneticheskie i fiziologo-biohimicheskie osnovy produktivnosti) [Barley in the North (breeding-genetic and physiological-biochemical bases of productivity)]. Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia, 156 p. (In Russian).

Gornostaeva, E.A., Fokina, A.I., Kondakova, L.V., Ogorodnikova, S.Yu., Domracheva, L.I., Laptev, D.S., Slastnikova, E.M., 2013. Potencial prirodnykh bioplenok *Nostoc commune* kak sorbentov tyazhelykh metallov v vodnoy srede [The potential of *Nostoc commune* natural biofilm as sorbents of heavy metals in the aquatic environment]. *Voda: khimiya i ekologiya [Water: Chemistry and Ecology]* **1** (55), 93–101.

Domracheva, L.I., Zykova, Yu.N., Trefilova, L.V., Kovina, A.L., 2020. Ispol'zovanie pochvennykh tsianobakteriy v agronomicheskoy praktike [Use

- of soil cyanobacteria in agronomic practice]. In: Simbirskih, E.S. (ed.), *Innovacionnoe razvitie agropromyshlennogo kompleksa kak faktor konkurentosposobnosti: problemy, tendencii, perspektivy* [Innovative development of the agro-industrial complex as a factor of competitiveness: problems, trends, prospects]. Vyatka State Agricultural Academy, Kirov, Russia, 22–39. (In Russian).
- Domracheva, L.I., Kondakova, L.V., Pegushina, O.A., Fokina, A.I., 2007. Bioplenki *Nostoc commune* – osobaya mikrobnaya sfera [Nostoc commune biofilms – a special microbial realm]. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya* [Theoretical and Applied Ecology] 1, 15–20. (In Russian).
- Kireeva, N.A., Kuzyakhmetov, G.G., Miftahova, A.M., Vodop'yanov, V.V., 2003. Fitotoksichnost' antropogенно zagryaznjonnykh pochv [Phytotoxicity of Anthropogenically Contaminated Soils]. Gilem, Ufa, Russia, 266 p. (In Russian).
- Koval', E.V., Svinolupova, L.S., Ogorodnikova, S.Yu., 2013. Otsenka toksicheskikh effektov metilfosfonovoy kisloty po otvetnym biokhimicheskim reaktsiyam fototrofnyykh organizmov [Evaluation of the toxic effects of methylphosphonic acid according to the response biochemical reactions of phototrophic organisms]. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya* [Theoretical and Applied Ecology] 1, 89–93. (In Russian).
- Kononova, S.V., Nesmeyanova, M.A., 2002. Fosfonaty i ikh degradatsiya mikroorganizmami [Phosphonates and their degradation by microorganisms]. *Biokhimiya* [Biochemistry] 67 (2), 220–233. (In Russian).
- Lukatkin, A.S., 2002. Holodovoe povrezhdenie teplolyubivykh rasteniy i okislitel'nyy stress [Cold damage to heat-loving plants and oxidative stress]. Mordovian University Publishing House, Saransk, Russia, 208 p. (In Russian).
- Muravieva, D.A., Bubenchikova, V.N., Belikov, V.V., 1987. Spektrofotometricheskoe opredelenie summy antotsianov v tsvetkah vasil'ka sinego [Spectrophotometric determination of the amount of anthocyanins in blue cornflower flowers]. *Farmacija* [Pharmacy] 5, 28–29. (In Russian).
- Ogorodnikova, S.Yu., Golovko, T.K., Ashikhmina, T.Ya., 2004. Reakciya rasteniy na fosfororganicheskiy ksenobiotik – metilfosfonovuyu kislotu [Plant response to organophosphorus xenobiotic – methylphosphonic acid]. *Nauchnye doklady Komi nauchnogo tsentra UrO RAN* [Scientific Reports of the Komi Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences]. Syktyvkar, Russia, 24 p. (In Russian).
- Rodina, N.A., Schennikova, I.N., Gribkov, M.V., 2007. Selekcija adaptivnykh sortov yarovogo yachmenya [Selection of adaptive varieties of spring barley]. *Zernovoe khozyajstvo* [Grain farming] 3–4, 15–16. (In Russian).
- Savel'eva, E.I., Zenkevich, I.G., Kuznetsova, T.A., Radilov, A.S., Pshenichnaya, G.V., 2002. Issledovanie produktov prevrashheniy fosfororganicheskikh otravlyayushhikh veschestv metodom gazovoy khromatografii – masspektrometrii [Investigation of the products of transformations of organophosphorus poisonous substances by gas chromatography – mass spectrometry]. *Rossijskij himicheskij zhurnal* [Russian Chemical Journal] 46 (6), 82–91. (In Russian).
- Sheudzhen, A.Kh., Akanova, N.I., Bondareva, T.N., 2018. Agrokimiya. Ch. 6. Ekologicheskaya agrokimiya [Agrochemistry. Part 6. Ecological agrochemistry]. Poligraf-YuG, Maykop, Russia, 575 p. (In Russian).
- Shlyk, A.A., 1971. Opredelenie khlorofillov i karotinoidov v ekstraktakh zelyonykh listyev [Determination of chlorophylls and carotenoids in green leaf extracts]. In: Pavlinova, O.A. (ed.), *Biokhimicheskie metody v fiziologii rastenij* [Biochemical methods in plant physiology]. Nauka, Moscow, USSR, 154–171. (In Russian).