

Оригинальная статья / Original article  
УДК 579.264; 544.723  
DOI: 10.18470/1992-1098-2021-1-53-60

## Участие цианобактерий в снижении концентрации фузариотоксинов и ионов тяжелых металлов в водных растворах

Людмила И. Домрачева<sup>1,2</sup>, Светлана Г. Скугорева<sup>2</sup>, Анна И. Фокина<sup>3</sup>,  
Максим А. Загоскин<sup>3</sup>, Тамара Я. Ашихмина<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Вятская государственная сельскохозяйственная академия, Киров, Россия

<sup>2</sup>Институт биологии Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, Россия

<sup>3</sup>Вятский государственный университет, Киров, Россия

### Контактное лицо

Светлана Г. Скугорева, кандидат биологических наук, научный сотрудник, лаборатория биомониторинга, Институт биологии Коми НЦ УрО РАН; 167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28. Тел. +79539412061  
Email [skugoreva@mail.ru](mailto:skugoreva@mail.ru)  
ORCID <https://orcid.org/0000-0003-2371-4949>

### Формат цитирования

Домрачева Л.И., Скугорева С.Г., Фокина А.И., Загоскин М.А., Ашихмина Т.Я. Участие цианобактерий в снижении концентрации фузариотоксинов и ионов тяжелых металлов в водных растворах // Юг России: экология, развитие. 2021. Т.16, N 1. С. 53-60. DOI: 10.18470/1992-1098-2021-1-53-60

Получена 10 июня 2020 г.

Прошла рецензирование 8 августа 2020 г.

Принята 5 ноября 2020 г.

### Резюме

**Цель** – установить влияние почвенных цианобактерий (ЦБ) *Fischerella muscicola*, *Nostoc paludosum* и *Nostoc linckia* на изменение концентрации ионов тяжелых металлов (ТМ) и фузариотоксинов в водных средах.

**Материал и методы.** Для построения кривых кинетики сорбции сухой биомассой ЦБ *Fischerella muscicola* и *Nostoc paludosum* ионов меди(II), свинца(II) и кадмия из растворов с концентрацией  $10^{-4}$  моль/л использовали метод потенциометрии с ионоселективными электродами. Методом ВЭЖХ определили концентрацию фузариотоксинов в фильтрате среды контактирования ЦБ *Fischerella muscicola* и *Nostoc linckia* с *F. culmorum*.

**Результаты.** Кинетику сорбции ионов ТМ сухой биомассой ЦБ наилучшим образом описывает модифицированная модель второго порядка. Согласно модели, процесс сорбции лимитирует реакция ионного обмена. В присутствии ЦБ *Fischerella muscicola* и *Nostoc linckia* с титром  $1,8 \cdot 10^6$  кл./мл (разведение 1:100) происходит снижение в среде Т-2 токсина и ликомаразмина. Однако при этом увеличиваются концентрации фузариевой кислоты и дезоксиниваленола. В варианте, где титр ЦБ равен  $1,8 \cdot 10^7$  кл./мл, значительно снижается концентрация ликомаразмина, при этом не происходит изменений концентрации иных фузариотоксинов.

**Заключение.** Сухая биомасса ЦБ, обладая высоким бисорбционным потенциалом, может выступать в качестве хорошего биосорбента по отношению к ионам меди(II), свинца(II) и кадмия. Снижение концентрации фузариотоксинов указывает на возможность выделить активные вещества ЦБ, способные подавлять биосинтез определенных токсинов микромицетов рода *Fusarium*, снижая как фитотоксичность сред произрастания растений, так и повышая безопасность продукции растениеводства.

### Ключевые слова

Цианобактерии, *F. culmorum*, фузариотоксины, биосорбция, кинетика сорбции, тяжелые металлы, скорость и емкость сорбции.

# The participation of cyanobacteria in reducing the concentration of fusariotoxins and heavy metal ions in aqueous solutions (model experiments)

Lyudmila I. Domracheva<sup>1,2</sup>, Svetlana G. Skugoreva<sup>2</sup>, Anna I. Fokina<sup>3</sup>,  
Maksim A. Zagoskin<sup>3</sup> and Tamara Ya. Ashikhmina<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Vyatka State Agricultural Academy, Kirov, Russia

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

<sup>3</sup>Vyatka State University, Kirov, Russia

## Principal Contact

Svetlana G. Skugoreva, Candidate of Biological Sciences, Researcher, Biomonitoring Laboratory, Institute of Biology, Komi Scientific Centre, Ural Division, Russian Academy of Sciences; 28, Kommunisticheskaya St, Syktyvkar, Russia 167982. Tel. +79539412061

Email [skugoreva@mail.ru](mailto:skugoreva@mail.ru)

ORCID <https://orcid.org/0000-0003-2371-4949>

## How to cite this article

Domracheva L.I., Skugoreva S.G., Fokina A.I., Zagoskin M.A., Ashikhmina T.Ya. The participation of cyanobacteria in reducing the concentration of fusariotoxins and heavy metal ions in aqueous solutions (model experiments). *South of Russia: ecology, development*. 2021, vol. 16, no. 1, pp. 53-60. (In Russian) DOI: 10.18470/1992-1098-2021-1-53-60

Received 10 June 2020

Revised 8 August 2020

Accepted 5 November 2020

## Abstract

**Aim.** The goal was to establish the effect of soil cyanobacteria (CB) *Fischerella muscicola*, *Nostoc paludosum* and *Nostoc linckia* on change in the concentration of heavy metal ions (HM) and fusariotoxins in aqueous media.

**Material and Methods.** In order to plot the kinetics of sorption by dry biomass of CB *Fischerella muscicola* and *Nostoc paludosum* of copper(II), lead(II) and cadmium ions from solutions with a concentration of  $10^{-4}$  mol/L, the method of potentiometry with ion-selective electrodes was used. The concentration of fusariotoxins in the filtrate of the contact medium of *Fischerella muscicola* CB and *Nostoc linckia* with *F. culmorum* was determined by HPLC.

**Results.** The kinetics of sorption of TM ions by dry biomass of the CB is best described by a modified second-order model. According to the model, the sorption process limits the ion exchange reaction. In the presence of CB *Fischerella muscicola* and *Nostoc linckia* with a titer of  $1.8 \cdot 10^6$  cells/mL (1:100 dilution), a decrease in toxin and lycomarasmin in T-2 medium occurs. However, this increases the concentration of fusaric acid and deoxynivalenol. In the variant where the titer of CB is equal to  $1.8 \cdot 10^7$  cells/mL, the concentration of lycomarasmin is significantly reduced, while there is no change in the concentration of other fusariotoxins.

**Conclusion.** Dry biomass of CB, having a high biosorption potential, can act as a good biosorbent with respect to copper(II), lead(II) and cadmium ions. A decrease in the concentration of fusariotoxins indicates the possibility of isolating active CB substances that can inhibit the biosynthesis of certain toxins of micromycetes of the genus *Fusarium*, reducing both the phytotoxicity of plant growth media and increasing the safety of crop production.

## Key Words

Cyanobacteria, *F. culmorum*, fusariotoxins, biosorption, sorption kinetics, heavy metals, sorption speed and capacity.

## ВВЕДЕНИЕ

*Fusarium culmorum* обладает высокой фитотоксичностью. Вызывает нежелательные изменения в биохимических процессах у растений и, как следствие, поражение тканей и органов [1; 2]. Влияние микромицетов выражается не только в угнетении растений, но и в качестве получаемого из последних сырья для различных целей [3; 4]. Установлено, что развитию фитопатогена способствует загрязнение среды тяжелыми металлами (ТМ), в том числе солями свинца, меди, цинка и т. д. [5]. В таких условиях фитотоксичность среды формируется за счет ее загрязнения метаболитами микромицетов и соединениями ТМ [6]. Многие виды полезной для растений микрофлоры в таких условиях исчезают. Однако установлено, что некоторые виды цианобактерий (ЦБ) способны при этом не только расти, но и подавлять развитие микромицета рода *Fusarium* [7]. Существуют данные о том, что экстракты ЦБ способны разрушать биопленки бактерий и грибов и снижать выработку микотоксинов [4; 8].

При поражении грибами рода *Fusarium*, опасность для растений обусловлена в основном вырабатываемыми фузариотоксинами [9]. По литературным данным известно несколько механизмов снижения фитотоксичности: уменьшение концентрации фузариотоксинов (сорбция, угнетение биосинтеза фузариотоксинов и его продуцента в целом) [4; 10]; продуктов токсического процесса, обусловленных попаданием фузариотоксинов в организм (например, активных форм кислорода) [11]; повышение собственной стрессоустойчивости (продукция веществ, защищающих структуры клеток, у злаков происходит увеличение выработки нуклеидфосфат киназы, связанной с МАРК-опосредованной  $H_2O_2$  передачей сигналов, подавляющей выработку активных форм кислорода и повышающей стрессоустойчивость [9]. Данные механизмы могут быть реализованы как самими растениями, так и их симбионтами, в том числе ЦБ [9; 12].

Цианобактерии занимают особое положение среди микроорганизмов не только благодаря своим уникальным структурным свойствам, но и высокому сорбционному потенциалу по отношению к ТМ [13; 14]. Основным механизмом биосорбции ТМ у ЦБ является ионный обмен с участием различных функциональных групп (амино-, гидроксогруппы, карбоксильные, карбонильные), присутствующих на поверхности клетки [14-16].

Измеряя концентрацию токсикантов в растворе после их контакта с ЦБ, можно оценить потенциал этих микроорганизмов для снижения фитотоксичности среды. Однако данные об эффективности снижения концентрации фузариотоксинов и концентрации ионов ТМ некоторыми достаточно распространенными в почвах видами ЦБ, в частности *Fischerella muscicola*, *Nostoc paludosum* и *Nostoc linckia* отсутствуют. Поэтому целью работы было установить влияние данных видов почвенных ЦБ на изменение концентрации ионов ТМ и фузариотоксинов в водных средах.

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Изучение кинетики сорбции ионов тяжелых металлов цианобактериями *Fischerella muscicola* и *Nostoc paludosum*. Цианобактерии культивировали в течение трех месяцев на среде Громова без азота, затем биомассу ЦБ тщательно отмывали от питательной среды дистиллированной водой, высушивали до постоянной массы и измельчали. В стакан наливали 50 мл раствора нитрата меди(II), свинца(II) или кадмия с концентрацией  $10^{-4}$  моль/л. В раствор погружали магнит, ионселективный электрод, pH-электрод и двухключевой электрод сравнения. Включали магнитную мешалку, запускали программу приема данных для иономера «Эксперт-001», быстро вносили в стакан с раствором 50,0 мг сухой биомассы ЦБ [17].

При описании кинетики сорбции использовали модели псевдо-первого и псевдо-второго порядков, модифицированную модель второго порядка и модель Еловича [18; 19]. Подбор модели кинетики сорбции осуществляли по наибольшему значению коэффициента детерминации  $r^2$  [17]. Значения параметров кинетических моделей были найдены методом наименьших квадратов при помощи надстройки «Поиск решения» программного пакета Microsoft Office Excel.

Исследование влияния цианобактерий *Fischerella muscicola* и *Nostoc linckia* на концентрацию фузариотоксинов в фильтрате среды их контактирования с *F. culmorum*. Готовили суспензии 4-х месячных культур ЦБ *Fischerella muscicola* и *Nostoc linckia*, выращенных на среде Громова без азота, разбавлением суспензии ЦБ родниковой водой 1:10 и 1:100. В неразбавленную суспензию (титр –  $1,8 \cdot 10^8$  кл./мл) и разбавленные варианты помещали высечки ( $d=7$  мм) из газона микромицета на среде Чапека. Через шесть суток экспозиции (режим –  $24^\circ C$ , день/ночь = 16/8 ч) в фильтрате определяли токсины методом ВЭЖХ на хроматографе Shimadzu LC-20 (Япония).

## ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Кинетика сорбции ионов тяжелых металлов сухой биомассой цианобактерий *Fischerella muscicola* и *Nostoc paludosum*. Для описания кинетики сорбции ионов ТМ наиболее приемлемой оказалась модель псевдо-второго порядка и модифицированная модель второго порядка, по которым получены высокие и максимальные значения коэффициента детерминации ( $r^2 = 0,9305-0,9891$ ) (табл. 1). Данные модели предполагают, что процесс сорбции лимитирует реакция ионного обмена. Модель псевдо-первого порядка ( $r^2 = 0,8533-0,9970$ ) и модель Еловича ( $r^2 = 0,5015-0,8147$ ) в меньшей степени подходят для описания кинетики сорбции ТМ.

Емкость сорбента характеризует такой параметр модели как равновесная (пределная) удельная масса сорбата, которая для разных ионов и видов ЦБ различалась не сильно, варьируя в пределах от 93,57 до 108,66 ммоль/г сорбента (табл. 2).

Значения кинетического коэффициента сорбции, который характеризует скорость сорбции, варьировали в более широких пределах от 2,3 до  $11,1 \text{ мин}^{-1}$ .

Наименьшие значения коэффициента были рассчитаны для ионов кадмия; в 1,9-2,6 раза выше была скорость

сорбции ионов свинца и меди. Скорость сорбции ТМ *F. muscicola* была в 1,4-1,9 раза выше, чем *N. paludosum*.

**Таблица 1.** Результаты обработки ( $r^2$ ) кинетических кривых сорбции ионов ТМ моделями химической кинетики  
**Table 1.** Results of processing ( $r^2$ ) kinetic curves of sorption of HM ions by chemical kinetics models

Ион Ion	Сорбент Sorbent	Модель	Модель	Модифицированная модель второго порядка Modified second-order model	Модель Еловича Elovich's model
		псевдо-первого порядка Pseudo-first order model	псевдо-второго порядка Pseudo-second order model		
Cu <sup>2+</sup>	<i>F. muscicola</i>	<b>0,9695</b>	0,9682	0,9682	0,5201
	<i>N. paludosum</i>	0,9522	<b>0,9800</b>	<b>0,9800</b>	0,6215
Pb <sup>2+</sup>	<i>F. muscicola</i>	<b>0,9854</b>	0,9492	0,9492	0,5015
	<i>N. paludosum</i>	<b>0,9970</b>	0,9305	0,9305	0,5041
Cd <sup>2+</sup>	<i>F. muscicola</i>	0,8533	<b>0,9851</b>	<b>0,9891</b>	0,8147
	<i>N. paludosum</i>	0,9421	<b>0,9634</b>	<b>0,9634</b>	0,7522

Примечание: жирным шрифтом выделены наибольшие значения  
Note: the highest values are in bold

Для того чтобы понять насколько быстро идет сорбция ТМ, использовали время достижения 95% от значения равновесной удельной масса сорбата ( $t_{95\%}$ ) [20]. Согласно расчетам, сорбция происходит быстро,  $t_{95\%}$  варьирует от 103 до 490 с (1,7-8,3 мин), что характерно для хемосорбции, которая обычно длится 5-10 мин [14]. Если сопоставить полученные результаты по ЦБ с данными по сухому мицелию грибов рода *Fusarium* [20], то значения скоростей и емкостей сорбции ТМ очень близки. По сравнению с традиционным сорбентом, активированным углем, емкость сорбции

ионов меди(II) ЦБ в 1,3 раза, скорость – в 15-26 раз выше [17].

В ходе сорбции, наряду со снижением концентрации ионов ТМ в растворе, происходило снижение концентрации протонов ( $r = 0,9250-0,9884$ ), то есть отмечали рост pH раствора (табл. 3). Более значительное увеличение pH (на 1,29-1,76 ед. pH) происходило при сорбции *F. muscicola*, чем при сорбции *N. paludosum* (на 0,41-0,72 ед. pH). Данный факт отмечен нами и ранее [20] и может быть обусловлен ионнообменным механизмом сорбции ТМ, что хорошо согласуется с литературными данными [14].

**Таблица 2.** Параметры модифицированной модели второго порядка для различных сорбентов  
**Table 2.** Parameters of the modified second-order model for various sorbents

Параметр модели / Model parameter	Сорбент / Sorbent	Cu <sup>2+</sup>	Pb <sup>2+</sup>	Cd <sup>2+</sup>
Равновесная удельная масса сорбата, ммоль/г Equilibrium specific gravity of the sorbate, mmol/g	<i>F. muscicola</i>	100,6	102,4	108,7
	<i>N. paludosum</i>	101,0	101,6	93,6
Константа скорости сорбции, мин <sup>-1</sup> Sorption rate constant, min <sup>-1</sup>	<i>F. muscicola</i>	11,1	8,4	4,38
	<i>N. paludosum</i>	6,18	6,12	2,34
Время $t_{95\%}$ , с Time $t_{95\%}$ , s	<i>F. muscicola</i>	103	137	260
	<i>N. paludosum</i>	184	187	490

**Таблица 3.** Кислотность раствора (pH) при сорбции ионов меди(II): изменение и корреляционная связь с  $pK(Cu^{2+})$  ( $r$ )  
**Table 3.** Acidity of solution (pH) during sorption of copper(II) ions: change and correlation with  $pK(Cu^{2+})$  ( $r$ )

Ион Ion	Сорбент Sorbent	pH в процессе сорбции / pH during sorption			$r$
		в начале initially	в конце in the end	$\Delta$ pH	
Cu <sup>2+</sup>	<i>F. muscicola</i>	5,67	6,96	+1,29	0,9884
	<i>N. paludosum</i>	5,67	6,08	+0,41	0,9250
Pb <sup>2+</sup>	<i>F. muscicola</i>	5,54	7,30	+1,76	0,9878
	<i>N. paludosum</i>	5,49	6,21	+0,72	0,9852
Cd <sup>2+</sup>	<i>F. muscicola</i>	5,61	7,43	+1,82	0,9447
	<i>N. paludosum</i>	5,62	6,28	+0,66	0,9441

Влияние цианобактерий *Fischerella muscicola* и *Nostoc linckia* на концентрацию фузариотоксинов в фильтрате среды их контактирования с *F. culmorum*. После контакта суспензии цианобактерий *Fischerella muscicola* и *Nostoc linckia* без разведения и с

разведением 1:10, 1:100 с высечками из газона *F. culmorum* в фильтрате методом ВЭЖХ был обнаружен целый спектр токсинов, некоторые из них приведены в таблице 4.

**Таблица 4.** Концентрации фузариотоксинов в пробах фильтратов суспензией цианобактерий ( $n = 3$ ,  $P = 0,95$ ,  $\delta = \pm 5\%$ )  
**Table 4.** Concentrations of fusariotoxins in samples of filtrates with a suspension of cyanobacteria ( $n = 3$ ,  $P = 0,95$ ,  $\delta = \pm 5\%$ )

С, мкг/см <sup>3</sup> С, mcg/cm <sup>3</sup>	Состав / Composition			
	Контроль: высечка <i>F. culmorum</i> + ключевая вода Control: die cut <i>F. culmorum</i> + spring water	ЦБ без разведения + высечка <i>F. culmorum</i> Non-diluted CB + die cut <i>F. culmorum</i>	ЦБ с разведением 1:10 + высечка <i>F. culmorum</i> Diluted CB 1:10 + die cut <i>F. culmorum</i>	ЦБ с разведением 1:100 + высечка <i>F. culmorum</i> Diluted CB 1:100 + die cut <i>F. culmorum</i>
<b><i>Fischerella muscicola</i></b>				
<b>Ликомаразмин</b> Lycomarasmin	0,31	0,21	0,37	0,12
<b>Фузариевая кислота</b> Fusaric acid	0,07	0,08	0,09	0,30
<b>Т-2 токсин</b> T-2 Toxin	0,09	0,09	0,08	0,01
<b>Дезоксиниваленол</b> Deoxynivalenol	0,07	0,07	0,10	0,12
<b><i>Nostoc linckia</i></b>				
<b>Ликомаразмин</b> Lycomarasmin	0,49	0,17	0,36	0,16
<b>Фузариевая кислота</b> Fusaric acid	0,15	0,11	0,10	0,28
<b>Т-2 токсин</b> T-2 Toxin	0,11	0,08	0,11	0,03
<b>Дезоксиниваленол</b> Deoxynivalenol	0,11	0,10	0,14	0,18

Наиболее ярко выражено изменение концентрации фузариотоксинов в присутствии 4-х месячных культур цианобактерий *Fischerella muscicola* и *Nostoc linckia* с титром  $1,8 \cdot 10^6$  кл./мл (разведение 1:100): происходит снижение в среде Т-2 токсина и ликомаразмина по сравнению с вариантом без ЦБ. Однако при этом увеличиваются концентрации фузариевой кислоты и дезоксиниваленола. В варианте, где титр ЦБ равен  $1,8 \cdot 10^7$  кл./мл, заметно снижается концентрация ликомаразмина, при этом не происходит изменений концентрации иных фузариотоксинов. Следовательно, влияние ЦБ специфично по отношению к биосинтезу отдельных фузариотоксинов. Присутствие ЦБ может приводить как к снижению их биосинтеза, так, и наоборот, что может быть следствием особенностей физиологии микроорганизмов и биохимического состава продуктов метаболизма. Во всех остальных вариантах какого-либо заметного влияния на биосинтез фузариотоксинов ЦБ не оказали.

Кроме влияния ЦБ на биосинтез фузариотоксинов, концентрация последних в фильтрате может зависеть от их сорбции компонентами суспензии, в том числе и клетками ЦБ. Существуют сведения о том, что вещества, вырабатываемые ЦБ, обладают сорбционными свойствами по отношению к некоторым органическим соединениям [21]. Явление сорбции наравне с процессом влияния на биосинтез может быть причиной отсутствия закономерностей «разбавление суспензии ЦБ – концентрация токсина».

Возможность снижать концентрацию фузариотоксинов дает повод полагать, что существует вероятность найти и выделить активные вещества ЦБ, способные подавлять биосинтез определенных

токсинов микромицетов рода *Fusarium*, как снижая фитотоксичность сред произрастания растений, так и повышая безопасность продукции растениеводства.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оба вида ЦБ *Fischerella muscicola* и *Nostoc linckia* влияют на биосинтез фузариотоксинов микромицетами *Fusarium culmorum*. Установлено, что данные виды ЦБ вносят большие изменения при титре  $1,8 \cdot 10^6$  кл./мл (разведение 1:100), при этом резко подавляется биосинтез Т-2 токсина и ликомаразмина, но усиливается продукция фузариевой кислоты и дезоксиниваленола. При разбавлении 1:10 концентрация ликомаразмина снижается при практически неизменных значениях концентраций других токсинов. В целом отсутствует закономерность «разбавление ЦБ – концентрация фузариотоксинов в растворе», что может быть причиной не только особенностей биосинтеза в присутствии разных разбавлений ЦБ, но и сорбционных процессов. Цианобактерии могут не только влиять на биосинтез фузариотоксинов, но и сорбировать тяжелые металлы, которые могут быть причиной преимущественного развития фузариума.

Кинетика сорбции ионов ТМ сухой биомассой *Fischerella muscicola* и *Nostoc paludosum* хорошо описывается модифицированной моделью второго порядка, которая предполагает, что процесс сорбции лимитирует реакция ионного обмена. Расчет параметров модели показал, что сорбционные емкости двух видов ЦБ для ионов меди(II), свинца(II) и кадмия различались не сильно. Скорость сорбции ТМ *F. muscicola* была до 2 раз выше, чем *N. paludosum*, при



этом для *F. muscicola* происходило более сильный рост pH. Между концентрациями ионов TM и протонов в растворе установлена высокая прямая корреляционная связь, что может быть обусловлено ионнообменным механизмом сорбции TM. Таким образом, сухая биомасса ЦБ, обладая относительно высоким сорбционным потенциалом, может выступать в качестве хорошего биосорбента по отношению к ионам меди(II), свинца(II) и кадмия.

#### БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа выполнена в рамках государственного задания Института биологии Коми НЦ УрО РАН № 0414-2018-0003.

#### ACKNOWLEDGMENT

This study was performed as part of the state assignment of the Institute of Biology, Komi Scientific Centre, Ural Branch, Russian Academy of Sciences N 0414-2018-0003.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Strausbaugh C.A., Overturf K.E., Koehn A.C. Pathogenicity and real-time PCR detection of *Fusarium* spp. in wheat and barley roots // Canadian Journal of Plant Pathology. 2005. V. 27. Iss. 3. P. 430-438. DOI: 10.1080/07060660509507242
2. Ahammed G.J., Mao Q., Yan Y., Wu M., Wang Y., Ren J., Guo P., Liu A., Chen S. Role of Melatonin in Arbuscular Mycorrhizal Fungi-Induced Resistance to Fusarium Wilt in Cucumber // Phytopathology. 2020. V. 110. N 5. P. 999-1009. DOI: 10.1094/PHYTO-11-19-0435-R
3. Bhat R., Rai R.V., Karim A.A. Mycotoxins in Food and Feed: Present Status and Future Concerns // Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. 2010. V. 9. N 1. P. 57-81. DOI: 10.1111/j.1541-4337.2009.00094.x
4. Haggag W., Abd El-Aty A.M., Mohamed A.A. The Potential Effect of two Cyanobacterial Species; *Anabaena Sphaerica* and *Oscillatoria Agardhii* Against Grain Storage Fungi // European Scientific Journal. 2014. V. 10. Iss. 30. P. 427-423.
5. Домрачева Л.И., Фокина А.И., Ковина А.Л., Ашихмина Т.Я. Экзометаболиты почвенных цианобактерий как стратегия выживания в естественных и техногенно нарушенных экосистемах // Теоретическая и прикладная экология. 2019. N 4. P. 15-23. DOI: 10.25750/1995-4301-2019-4-015-023
6. Домрачева Л.И., Кондакова Л.В., Попов Л.Б., Зыкова Ю.Н. Биоремедиационные возможности почвенных цианобактерий (обзор) // Теоретическая и прикладная экология. 2009. N 1. P. 8-17.
7. Fokina A.I., Dabakh E.V., Domracheva L.I., Skugoreva S.G., Lyalina E.I., Ashikhmina T.Ya., Zykova Yu.N., Leonova K.A. Methodological approaches toward chemico-biological diagnostics of the state of soils in technogenically transformed territories // Eurasian Soil Science. 2018. V. 51. N 5. P. 550-560. DOI: 10.1134/S1064229318030031
8. Sepas V., López Y., Gabasa Y., Martins C.B., Ferreira J.D., Correia M.J., Santos L.M., Oliveira F., Ramos V., Reis M., Castelo-Branco R., Morais J., Vasconcelos V., Probert I., Guilloud E., Mehiri M., Soto S.M. Inhibition of Bacterial and Fungal Biofilm Formation by 675 Extracts from Microalgae and Cyanobacteria // Antibiotics. 2019. V. 8. N 2. article number: 77. DOI: 10.3390/antibiotics8020077
9. Kosová K., Chrpová J., Šantrůček J., Hýnek R., Štěřbová L., Vítámvás P., Bradová J., Prášil I.T. The Effect of *Fusarium culmorum* Infection and Deoxynivalenol (DON) Application on Proteome Response in Barley Cultivars Chevron and Pedant // Journal of Proteomics. 2017. V. 169. P. 112-124. DOI: 10.1016/j.jprot.2017.07.005
10. Shalaby E.A. Influence of A biotic stress on biosynthesis of alga-chemicals and its relation to biological activities // Indian Journal of Geo-Marine Sciences. 2017. V. 46. N1. P. 23-32.
11. Tannin-Spitz T., Bergman M., van-Moppes D., Grossman S., Arad S.(M.) Antioxidant activity of the polysaccharide of the red microalga *Porphyridium* sp. // Journal of Applied Phycology. 2005. V. 17. Iss. 3. P. 215-222. DOI: 10.1007/s10811-005-0679-7
12. Boba A., Kostyn K., Kozak B., Wojtasik W., Preisner M., Prescha A., Gola E.M., Lysh D., Dudek B., Szopa J., Kulma A. *Fusarium oxysporum* infection activates the plastidial branch of the terpenoid biosynthesis pathway in flax, leading to increased aba synthesis // Planta. 2020. V. 251. Article number: 50. DOI: 10.1007/s00425-020-03339-9
13. Фокина А.И., Ашихмина Т.Я., Домрачева Л.И., Горностаева Е.А., Огородникова С.Ю. Тяжелые металлы как фактор изменения метаболизма у микроорганизмов (обзор) // Теоретическая и прикладная экология. 2015. N 2. С. 5-18. DOI: 10.25750/1995-4301-2015-2-005-018
14. Singh S. Biosorption of heavy metals by cyanobacteria: potential of live and dead cells in bioremediation. In: Shah M. (ed.) Microbial Bioremediation & Biodegradation. Springer, Singapore, 2020. P. 409-423. DOI: 10.1007/978-981-15-1812-6\_15
15. Morsy F.M., Hassan S.H.A., Koutb M. Biosorption of Cd(II) and Zn(II) by *Nostoc commune*: isotherm and kinetics studies // CLEAN-Soil, Air, Water. 2011. V. 36. Iss. 7. P. 680-687. DOI: 10.1002/clen.201000312
16. Safari M., Ahmady-Asbchin S. Biosorption of zinc from aqueous solution by cyanobacterium *Fischerella ambigua* ISC67: optimization, kinetic, isotherm and thermodynamic studies // Water Sci. Technol. 2018. V. 78. Iss. 7. P. 1525-1534. DOI: 10.2166/wst.2018.437
17. Скугорева С.Г., Кантор Г.Я., Домрачева Л.И., Кутявина Т.И. Сравнительный анализ эффективности использования сорбентов различной природы по отношению к ионам меди (II) // Теоретическая и прикладная экология. 2018. N 3. С. 12-18. DOI: 10.25750/1995-4301-2018-3-012-018
18. Ho Y.S., Ng J.C.Y., McKay G. Kinetics of pollutant sorption by biosorbents: review // Separ. Purif. Methods. 2000. V. 29. Iss. 2. P. 189-232. DOI: 10.1081/SPM-100100009
19. Cheung W.H., Ng J.C.Y., McKay G. Kinetic analysis of the sorption of copper (II) ions on chitosan // J. Chem. Technol. Biotechnol. 2003. V. 78. Iss. 5. P. 562-571. DOI: 10.1002/jctb.836
20. Скугорева С.Г., Кантор Г.Я., Домрачева Л.И., Шешегова Т.К. Оценка сорбционных способностей различных видов микромицетов рода *Fusarium* по отношению к ионам тяжёлых металлов // Теоретическая и прикладная экология. 2019. N 4. С. 102-109. DOI: 10.25750/1995-4301-2019-4-103-109

21. Flemming H-C. Sorption sites in biofilms // *Water Sci Technol.* 1995. V. 32. Iss. 8. P. 27-33. DOI: 10.2166/wst.1995.0256

#### REFERENCES

1. Strausbaugh C.A., Overturf K.E., Koehn A.C. Pathogenicity and real-time PCR detection of *Fusarium* spp. in wheat and barley roots. *Canadian Journal of Plant Pathology*, 2005, vol. 27, iss. 3, pp. 430-438. DOI: 10.1080/07060660509507242
2. Ahammed G.J., Mao Q., Yan Y., Wu M., Wang Y., Ren J., Guo P., Liu A., Chen S. Role of Melatonin in Arbuscular Mycorrhizal Fungi-Induced Resistance to Fusarium Wilt in Cucumber. *Phytopathology*, 2020, vol. 110, no. 5, pp. 999-1009. DOI: 10.1094/PHYTO-11-19-0435-R
3. Bhat R., Rai R.V., Karim A.A. Mycotoxins in Food and Feed: Present Status and Future Concerns. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2010, vol. 9, no. 1, pp. 57-81. DOI: 10.1111/j.1541-4337.2009.00094.x
4. Haggag W., Abd El-Aty A.M., Mohamed A.A. The Potential Effect of two Cyanobacterial Species; *Anabaena Sphaerica* and *Oscillatoria Agardhii* Against Grain Storage Fungi. *European Scientific Journal*. 2014, vol. 10, iss. 30, pp. 427-423.
5. Domracheva L.I., Fokina A.I., Kovina A.L., Ashikhmina T.Ya. Exometabolites of soil cyanobacteria as a survival strategy in natural and technogenically disturbed ecosystems. *Theoretical and Applied Ecology*, 2019, no. 4, pp. 15-23. (In Russian) DOI: 10.25750/1995-4301-2019-4-015-023
6. Domracheva L.I., Kondakova L.V., Popov L.B., Zykova Yu.N. Bioremediation capabilities of soil cyanobacteria (review). *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya [Theoretical and Applied Ecology]*. 2009, no. 1, pp. 8-17. (In Russian)
7. Fokina A.I., Dabakh E.V., Domracheva L.I., Skugoreva S.G., Lyalina E.I., Ashikhmina T.Ya., Zykova Yu.N., Leonova K.A. Methodological approaches toward chemico-biological diagnostics of the state of soils in technogenically transformed territories. *Eurasian Soil Science*, 2018, vol. 51, no. 5, pp. 550-560. DOI: 10.1134/S1064229318030031
8. Cepas V., López Y., Gabasa Y., Martins C.B., Ferreira J.D., Correia M.J., Santos L.M., Oliveira F., Ramos V., Reis M., Castelo-Branco R., Morais J., Vasconcelos V., Probert I., Guilloud E., Mehiri M., Soto S.M. Inhibition of Bacterial and Fungal Biofilm Formation by 675 Extracts from Microalgae and Cyanobacteria. *Antibiotics*, 2019, vol. 8, no. 2, 77 p. DOI: 10.3390/antibiotics8020077
9. Kosová K., Chrpová J., Šantrůček J., Hynek R., Štěrbová L., Vítámvás P., Bradová J., Prášil I.T. The Effect of *Fusarium culmorum* Infection and Deoxynivalenol (DON) Application on Proteome Response in Barley Cultivars Chevron and Pedant. *Journal of Proteomics*, 2017, vol. 169, pp. 112-124. DOI: 10.1016/j.jprot.2017.07.005
10. Shalaby E.A. Influence of A biotic stress on biosynthesis of alga-chemicals and its relation to biological activities.

#### КРИТЕРИИ АВТОРСТВА

Людмила И. Домрачева выполняла работы по культивированию биомассы цианобактерий и микромицета *Fusarium culmorum* для проведения модельных экспериментов, руководство проведением

Indian Journal of Geo-Marine Sciences. 2017, vol. 46, no. 1, pp. 23-32.

11. Tannin-Spitz T., Bergman M., van-Moppes D., Grossman S., Arad S.(M.) Antioxidant activity of the polysaccharide of the red microalga *Porphyridium* sp. *Journal of Applied Phycology*, 2005, vol. 17, iss. 3, pp. 215-222. DOI: 10.1007/s10811-005-0679-7
12. Boba A., Kostyn K., Kozak B., Wojtasik W., Preisner M., Prescha A., Gola E.M., Lysh D., Dudek B., Szopa J., Kulma A. *Fusarium oxysporum* infection activates the plastidial branch of the terpenoid biosynthesis pathway in flax, leading to increased aba synthesis. *Planta*, 2020, vol. 251, article number: 50. DOI: 10.1007/s00425-020-03339-9
13. Fokina A.I., Ashikhmina T.Ya., Domracheva L.I., Gornostaeva E.A., Ogorodnikova S.Yu. Heavy metals as a factor in changes in the metabolism of microorganisms (review). *Theoretical and Applied Ecology*, 2015, no. 2, pp. 5-18. (In Russian). DOI: 10.25750/1995-4301-2015-2-005-018
14. Singh S. Biosorption of heavy metals by cyanobacteria: potential of live and dead cells in bioremediation. In: Shah M. (ed.) *Microbial Bioremediation & Biodegradation*. Springer, Singapore, 2020, pp. 409-423. DOI: 10.1007/978-981-15-1812-6\_15
15. Morsy F.M., Hassan S.H.A., Koutb M. Biosorption of Cd(II) and Zn(II) by *Nostoc commune*: isotherm and kinetics studies. *CLEAN-Soil, Air, Water*, 2011, vol. 36, iss. 7, pp. 680-687. DOI: 10.1002/clen.201000312
16. Safari M., Ahmady-Asbchin S. Biosorption of zinc from aqueous solution by cyanobacterium *Fischerella ambigua* ISC67: optimization, kinetic, isotherm and thermodynamic studies. *Water Sci. Technol.*, 2018, vol. 78, iss. 7, pp. 1525-1534. DOI: 10.2166/wst.2018.437
17. Skugoreva S.G., Kantor G.Ya., Domracheva L.I., Kutjavina T.I. Comparative analysis of the effectiveness of the use of sorbents of different nature with respect to copper (II) ions. *Theoretical and Applied Ecology*, 2018, no. 3, pp. 12-18. (In Russian) DOI: 10.25750/1995-4301-2018-3-012-018
18. Ho Y.S., Ng J.C.Y., McKay G. Kinetics of pollutant sorption by biosorbents: review. *Separ. Purif. Methods*, 2000, vol. 29, iss. 2, pp. 189-232. DOI: 10.1081/SPM-100100009
19. Cheung W.H., Ng J.C.Y., McKay G. Kinetic analysis of the sorption of copper (II) ions on chitosan. *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, 2003, vol. 78, iss. 5, pp. 562-571. DOI: 10.1002/jctb.836
20. Skugoreva S.G., Kantor G.Ya., Domracheva L.I., Sheshhegova T.K. Assessment of sorption abilities of various species of *Fusarium* micromycetes in relation to heavy metal ions. *Theoretical and Applied Ecology*, 2019, no. 4, pp. 102-109. (In Russian) DOI: 10.25750/1995-4301-2019-4-103-109
21. Flemming H-C. Sorption sites in biofilms. *Water Sci Technol.*, 1995, vol. 32, iss. 8, pp. 27-33. DOI: 10.2166/wst.1995.0256

#### AUTHOR CONTRIBUTIONS

Lyudmila I. Domracheva performed work on the cultivation of biomass of cyanobacteria and *Fusarium culmorum* micromycete for the conduct of model experiments, managed experimental work and generalized the results.

экспериментальной работы, обобщение результатов. Светлана Г. Скугорева проводила модельный эксперимент по изучению кинетики сорбции сухой биомассой цианобактерий *Fischerella muscicola* и *Nostoc paludosum* ионов тяжелых металлов из растворов. Анна И. Фокина проводила эксперимент по исследованию влияния цианобактерий *Fischerella muscicola* и *Nostoc linckia* на концентрацию фузариотоксинов в фильтрате среды их контактирования с *F. culmorum*. Максим А. Загоскин обрабатывал первичные данные по определению токсинов методом ВЭЖХ на хроматографе Shimadzu LC-20, подбирая и обобщал материал для написания введения к статье. Тамара Я. Ашихмина разработала концепцию и осуществляла общее руководство исследованием. Все авторы в равной степени участвовали в написании рукописи и несут ответственность за плагиат, самоплагиат и другие неэтические проблемы.

**КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Svetlana G. Skugoreva conducted a model experiment to study the kinetics of sorption by dry biomass of cyanobacteria *Fischerella muscicola* and *Nostoc paludosum* heavy metal ions from solutions. Anna I. Fokina conducted an experiment to study the effect of cyanobacteria *Fischerella muscicola* and *Nostoc linckia* on the concentration of fusariotoxins in the filtrate of the medium of their contact with *F. culmorum*. Maksim A. Zagoskin processed primary data on the determination of toxins by HPLC on a Shimadzu LC-20 chromatograph, selected and synthesized material for writing an introduction to the article. Tamara Ya. Ashikhmina developed the concept and provided general guidance for the study. All authors equally participated in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism, self-plagiarism and other ethical transgressions.

**NO CONFLICT OF INTEREST DECLARATION**

The authors declare no conflict of interest.

**ORCID**

Людмила И. Домрачева / Lyudmila I. Domracheva <https://orcid.org/0000-0002-7104-3337>

Светлана Г. Скугорева / Svetlana G. Skugoreva <https://orcid.org/0000-0003-2371-4949>

Анна И. Фокина / Anna I. Fokina <https://orcid.org/0000-0001-8265-8882>

Максим А. Загоскин / Maksim A. Zagoskin <https://orcid.org/0000-0002-9130-8232>

Тамара Я. Ашихмина / Tamara Ya. Ashikhmina <https://orcid.org/0000-0003-4919-0047>