

Оценка сорбционных способностей различных видов микромицетов рода *Fusarium* по отношению к ионам тяжёлых металлов

© 2019. С. Г. Скугорева^{1,2}, к. б. н., доцент, н. с.,
Г. Я. Кантор^{1,2}, к. т. н., н. с.,

Л. И. Домрачева^{1,3}, д. б. н., профессор, в. н. с.,

Т. К. Шешегова^{3,4}, д. б. н., зав. лабораторией, профессор,

¹Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН,
167982, Россия, Республика Коми, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,

²Вятский государственный университет,

610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36,

³Вятская государственная сельскохозяйственная академия,

610017, Россия, г. Киров, Октябрьский проспект, д. 133,

⁴ФАНЦ Северо-Востока им. Н. В. Рудницкого,

610007, Россия, г. Киров, ул. Ленина, д. 166а,

e-mail: skugoreva@mail.ru, grigory_kantor@mail.ru, dli-alga@mail.ru

Изучена кинетика сорбции ионов тяжёлых металлов (ТМ) меди(II), свинца(II) и кадмия из растворов их нитратов с концентрацией $1 \cdot 10^{-4}$ моль/л микромицетами р. *Fusarium*: *F. oxysporum* Schltdl. Г-15, *F. poae* (Peck) Wollenw PK-15, *F. sporotrichioides* Sherb. (Т-О 7/3) и *F. culmorum* (Smith) Sacc. Выявлено, что кинетика сорбции некоторых сорбентов для ряда ТМ хорошо описывается уравнением псевдо-первого порядка, а других сорбентов – уравнением псевдо-второго и модифицированного второго порядка.

Для сравнения сорбционных возможностей различных видов по отношению к ТМ использовали равновесную удельную массу сорбата (a_e), начальную скорость сорбции ($v_{нач.}$) и время сорбции 95% или 99% от значения a_e ($t_{95\%}/t_{99\%}$). Сорбция ионов кадмия протекает с заметно более низкой скоростью по сравнению с ионами меди(II) и свинца(II): начальная скорость сорбции была в 2,6–12,3 раза и 5,6–48,1 раза меньше по сравнению с медью и свинцом соответственно; $t_{95\%}$ – 4,0–25,4 и 6,1–18,9 раза больше; $t_{99\%}$ – в 7,6–148,2 и 3,8–61,2 раза больше.

Значения равновесной массы сорбата, которая характеризуют ёмкость сорбента, варьировали в интервале от 0,099 до 0,108 ммоль/г, при сорбции ионов кадмия *F. poae* и *F. sporotrichioides* значения были несколько ниже и составили 0,078 и 0,090 ммоль/г. Наибольшей скоростью сорбции по отношению к ионам свинца и меди характеризовались *F. oxysporum* и *F. poae*, а к ионам кадмия – *F. culmorum* и *F. sporotrichioides*.

Таким образом, различия в сорбции кадмия и других исследованных ТМ (свинец, медь) оказались наиболее существенными, чем межвидовые различия микромицетов.

Ключевые слова: микромицеты, *Fusarium*, биосорбция, кинетика сорбции, модели кинетики, равновесная (удельная) масса сорбата a_e , начальная скорость сорбции $v_{нач.}$, время сорбции.

Assessment of sorption abilities of various species of *Fusarium* micromycetes in relation to heavy metal ions

© 2019. S. G. Skugoreva^{1,2} ORCID: 0000-0002-5902-5187[†]

G. Ya. Kantor^{1,2} ORCID: 0000-0002-6462-6702[†]

L. I. Domracheva^{1,3} ORCID: 0000-0002-7104-3337[†]

T. K. Sheshegova^{3,4} ORCID: 0000-0003-2371-4949[†]

¹Institute of Biology of the Komi Science Centre of the Ural Division RAS,
28, Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Komi Republic, Russia, 167982,

²Vyatka State University,

36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,

³Vyatka State Agricultural Academy,

133, Oktyabrskiy Prospect, Kirov, Russia, 610017,

⁴Federal Agrarian Scientific Center of Northeast named N. V. Rudnitsky,

166a Lenina St., Kirov, Russia, 610007,

e-mail: skugoreva@mail.ru, grigory_kantor@mail.ru, dli-alga@mail.ru

The kinetics of sorption of heavy metal (HM) ions of copper(II), lead(II) and cadmium from solutions of their nitrates with a concentration of $1 \cdot 10^{-4}$ mol/L by micromycetes of the *Fusarium* genus (*F. oxysporum* Schltdl. G-15, *F. poae* (Peck) Wollenw PK-15, *F. sporotrichioides* Sherb. (T-O 7/3) and *F. culmorum* (Smith) Sacc.) was studied. It was revealed that the sorption kinetics by some sorbents for a number of HMs is well described by the pseudo-first order equation, and for other sorbents – by the pseudo-second and modified second order equation.

To compare the sorption capabilities of various species with respect to HM, the equilibrium relative mass of the sorbate (a_e), the initial sorption rate (v_{start}), and the sorption time for reaching 95 or 99% of the a_e value ($t_{95\%} / t_{99\%}$) were used. Sorption of cadmium ions proceeds at a noticeably lower rate compared to copper(II) and lead(II) ions: the initial sorption rate was 2.6–12.3 times and 5.6–48.1 times lower compared to copper and lead, respectively; $t_{95\%}$ – 4.0–25.4 and 6.1–18.9 times longer; $t_{99\%}$ – 7.6–148.2 and 3.8–61.2 times longer.

The values of the equilibrium mass of the sorbate characterizing the capacity of the sorbent, varied in the range 0.099 to 0.108 mmol/g, while sorption values of cadmium ions by *F. poae* and *F. sporotrichioides* were slightly lower and amounted to 0.078 and 0.090 mmol/g. *F. oxysporum* and *F. poae* were characterized by the highest sorption rates with respect to lead and copper ions, and *F. culmorum* and *F. sporotrichioides* – to cadmium ions.

Thus, the differences in the sorption of cadmium and other HMs studied (lead, copper) turned out to be more significant than the interspecies differences of micromycetes.

Keywords: micromycetes, *Fusarium*, biosorption, sorption kinetics, kinetics models, equilibrium (specific) mass of sorbate a_e , initial sorption rate v_{start} , sorption time.

В настоящее время загрязнение почвы и воды соединениями тяжёлых металлов (ТМ) является одной из глобальных экологических проблем [1]. При очистке загрязнённых сточных вод традиционные методы основаны на таких процессах, как адсорбция, коагуляция, флокуляция, ионный обмен, мембранное разделение и осаждение. К недостаткам подобных технологий относятся высокая стоимость, неполное удаление загрязнителей, высокое энергопотребление и образование токсичных отходов [2, 3].

Многообещающей альтернативной технологией очистки сточных вод является биосорбция. В её основе лежит способность живых организмов, прежде всего, микроорганизмов (МО) аккумулировать ТМ из растворов [4]. К достоинствам биосорбции относят экологическую безопасность, простоту, эффективность очистки, доступность, дешевизну сорбентов и возможность их регенерации [5, 6].

В качестве высокоэффективных биосорбентов используют бактерии, водоросли и грибы, включая дрожжи [7]. В частности, показан высокий потенциал биомассы грибов в качестве биосорбента для удаления ионов ТМ из загрязнённых вод [8, 9]. Они способны накапливать не только микроэлементы (Cu, Zn, Mn и др.), но и неэссенциальные металлы (U, Ni, Cd и Hg) [10].

Этот процесс происходит благодаря высокой степени адаптации микромицетов и их устойчивости к действию ТМ, способности аккумулировать и трансформировать соединения ТМ [11]. Среди микромицетов представители р. *Fusarium* имеют обширный ареал, занимая различные экологические ниши [12], обладают повышенной устойчивостью к загрязнению почв, в том числе соединениями ТМ [13–15].

При этом фузарии являются активными сорбентами ТМ. Показано, что при экспозиции культуры *F. oxysporum* в течение 7 сут степень извлечения из растворов сульфатов меди и никеля с концентрацией 20 мг/л для ионов меди составляла 58,8%, а для ионов никеля – 36,5% [16]. Установлено, что биомасса *F. oxysporum* обладает высокой сорбционной способностью по отношению к ионам Pb(II), при этом изотерму адсорбции хорошо описывают модели Ленгмюра и Флори-Хаггинса. Методом инфракрасной спектроскопии с Фурье-преобразованием подтверждено, что происходит взаимодействие между ионами и активными функциональными группами биомассы *F. oxysporum* [17].

Показано, что через 1 сутки экспозиции живого мицелия *F. culmorum* в растворе нитрата свинца (II) с концентрацией 10^{-4} моль/л происходило снижение концентрации Pb^{2+} в растворе и накопление элемента в мицелии (23,2 мг/г сухой массы) [18, 19]. Кинетика сорбции ионов свинца(II) и меди(II) сухим мицелием *F. culmorum* хорошо описывается уравнением псевдо-второго порядка. Способность к сорбции у микромицета значительно выше по сравнению с активированным углем и цеолитом [19, 21].

Целью данной работы было дать сравнительную характеристику сорбционной способности различных видов микромицетов р. *Fusarium* по отношению к ионам меди(II), свинца(II) и кадмия.

Объекты и методы исследования

При проведении опытов по сорбции ионов ТМ использовали четыре вида микромицетов рода *Fusarium*: *F. oxysporum* Schltdl. Г-15 (вы-

делен из корней гороха), *F. poae* (Peck) Wollenw PK-15 (выделен из корней озимой ржи), *F. sporotrichioides* Sherb. (Т-О 7/3) (выделен из зерна озимой ржи), *F. culmorum* (Smith) Sacc. (музейный штамм из Вятской ГСХА). Культивирование мицелия грибов проводили в чашках Петри в течение 3 месяцев на агаризованной среде Чапека [22].

Перед проведением эксперимента по изучению кинетики сорбции ионов ТМ мицелий микромицетов тщательно отмывали от питательной среды дистиллированной водой, высушивали до постоянной массы, измельчали и растирали в фарфоровой ступке. Измерение содержания ионов свинца(II), меди(II) и кадмия в растворе проводили потенциометрическим методом на иономере «Эксперт-001», подключённом к персональному компьютеру, с ионоселективными электродами, чувствительными к концентрации ионов ТМ в водном растворе. Опыт проводили с использованием магнитной мешалки при температуре 23 ± 1 °С. Перед работой электроды калибровали.

В стакан наливали 50 мл раствора нитрата ТМ (нитрат свинца(II), меди(II), кадмия) с концентрацией $1 \cdot 10^{-4}$ моль/л (М), погружали в раствор магнит, ионоселективный электрод, рН-электрод и двухключевой электрод сравнения, включали мешалку [1]. Запускали программу приёма данных с иономера «Эксперт-001». Пробы сухих сорбентов взвешивали (средняя масса сорбента 0,0500 г), затем быстро вносили в стакан с раствором нитрата ТМ. Для приёма и обработки данных использовали программу EXP2PR, разработанную ООО «ЭКОНИКС-ЭКСПЕРТ» (версия от 26.03.2018), которая позволяет в режиме реального времени записывать кривые кинетики сорбции ионов ТМ.

При описании кинетики сорбции использовали модели псевдо-первого и псевдо-второго порядков, модифицированную модель второго порядка и модель Еловича [23–25]. Значения параметров кинетических моделей, усреднённые за полное время каждого измерения, были найдены методом наименьших квадратов при помощи надстройки «Поиск решения» программного пакета Microsoft Office Excel. При подборе уравнения модели кинетики рассчитывали коэффициент детерминации r^2 по формуле:

$$r^2 = 1 - \frac{D_1}{D_2} \quad (1),$$

где D_1 – дисперсия разности экспериментальных и расчётных данных; D_2 – дисперсия экспериментальных данных.

Результаты и обсуждение

В ходе исследования получены экспериментальные кривые сорбции ионов меди(II), свинца(II) и кадмия. На рисунках 1–3 приведены кривые кинетики сорбции ионов свинца(II), меди(II) и кадмия различными видами микромицетов р. *Fusarium* из растворов нитратов ТМ.

Для сравнительной характеристики сорбционной способности различных видов подбирали математическую модель [23, 24], оптимально описывающую кинетику сорбции. Подбор модели осуществляли по максимальным значениям коэффициента детерминации r^2 (табл. 1). На рисунке 4 приведён пример иллюстрации подбора математической модели для описания кинетики сорбции меди(II) микромицетом *F. culmorum*. В данном случае кинетику сорбции наиболее точно описывает модель псевдо-первого порядка ($r^2 = 0,9934$).

В целом, следует отметить, что для половины сорбентов и ионов ТМ наиболее приемлемо уравнение псевдо-первого порядка, для другой половины – уравнение модифицированного второго порядка и лишь для *F. poae* сорбция кадмия хорошо описывается уравнением Еловича (табл. 1).

Так как кинетика сорбции ионов ТМ исследованными видами микромицетов р. *Fusarium* описывается различными моделями, то для сравнения видов использовали такие параметры сорбентов, как равновесную удельную массу сорбата (a_e), начальную скорость сорбции ($v_{нач.}$) и время сорбции 95% и 99% от значения a_e ($t_{95\%}/t_{99\%}$) (рис. 5). Начальную скорость сорбции рассчитывали по формуле:

$$v_{нач.} = \frac{a_{t_1} - a_{t_0}}{t_1 - t_0}, \quad (2)$$

где t – время (с): $t_0 = 0$ с, $t_1 = 1,123$ с; a_i – удельная масса сорбата по наиболее оптимальной модели (ммоль/г): a_{t_0} при $t = t_0$, a_{t_1} при $t = t_1$.

Под временем $t_{95\%}/t_{99\%}$ понимали время, за которое происходило достижение в растворе 95% и 99% соответственно от значения равновесной (предельной) удельной масса сорбата a_e по наиболее оптимальной для сорбента модели.

Значения равновесной удельной массы сорбата, характеризующей ёмкость сорбента,

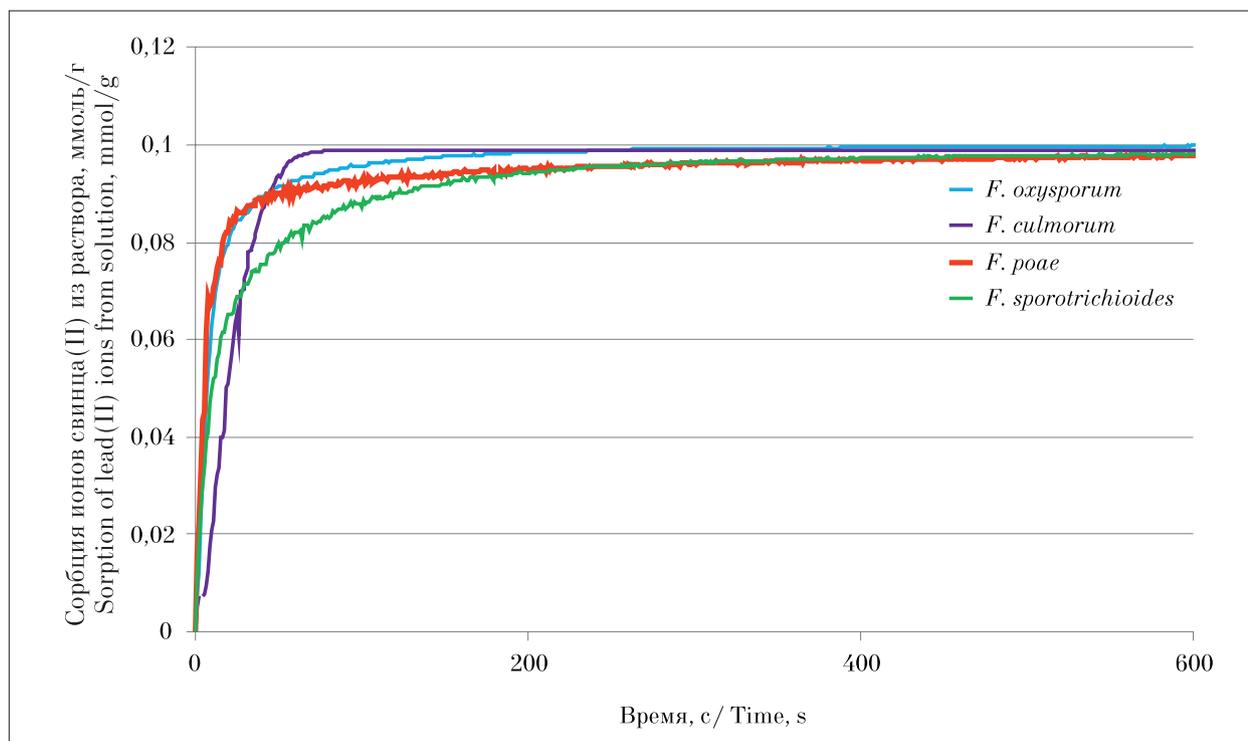


Рис. 1. Кривые кинетики сорбции ионов свинца(II) из растворов микромицетами р. *Fusarium*, ммоль/г
Fig. 1. Kinetic curves of the sorption of lead(II) ions from solutions by micromycetes of the genus *Fusarium*, mmol/g

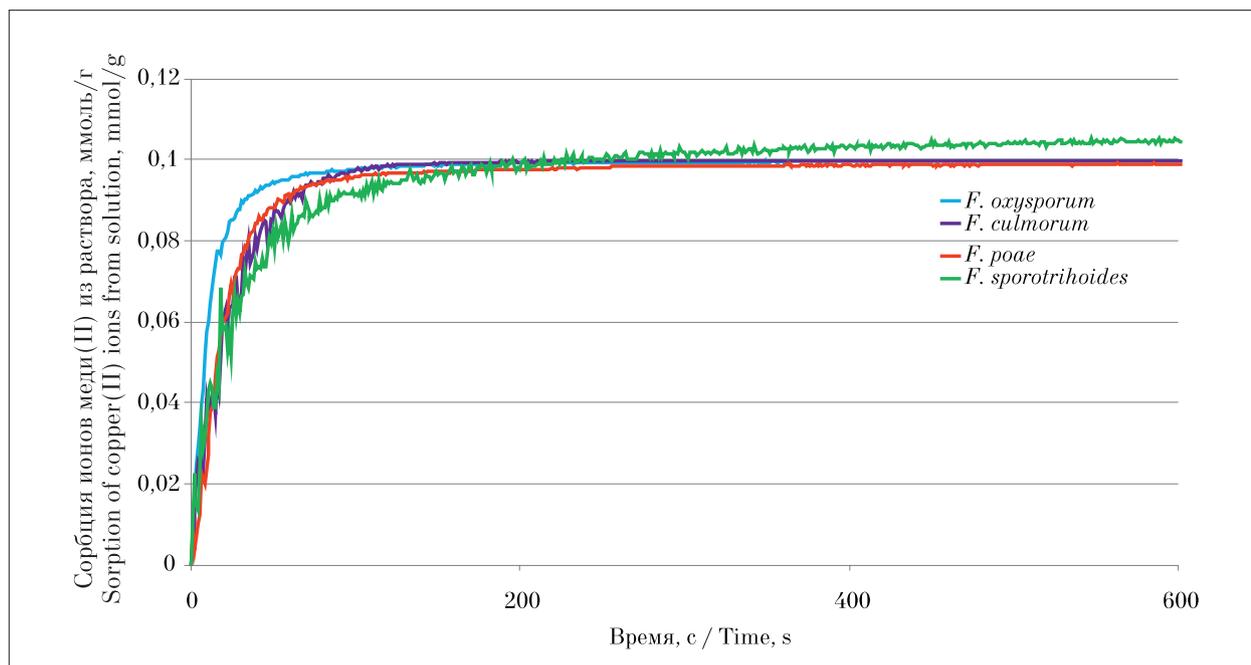


Рис. 2. Кривые кинетики сорбции ионов меди(II) из растворов микромицетами р. *Fusarium*, ммоль/г
Fig. 2. Kinetic curves of the sorption of copper(II) ions from solutions of micromycetes by the genus *Fusarium*, mmol/g

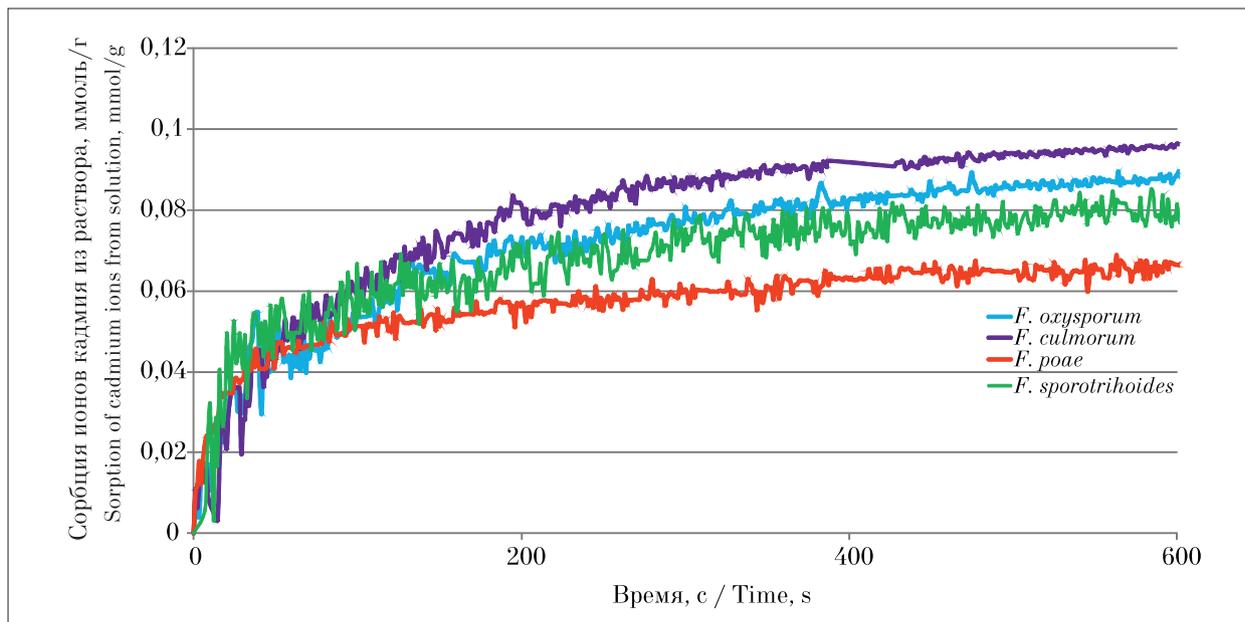


Рис. 3. Кривые кинетики сорбции ионов кадмия из растворов микромицетами р. *Fusarium*, ммоль/г
Fig. 3. Kinetic curves of the sorption of cadmium ions from solutions by micromycetes of the genus *Fusarium*, mmol/g

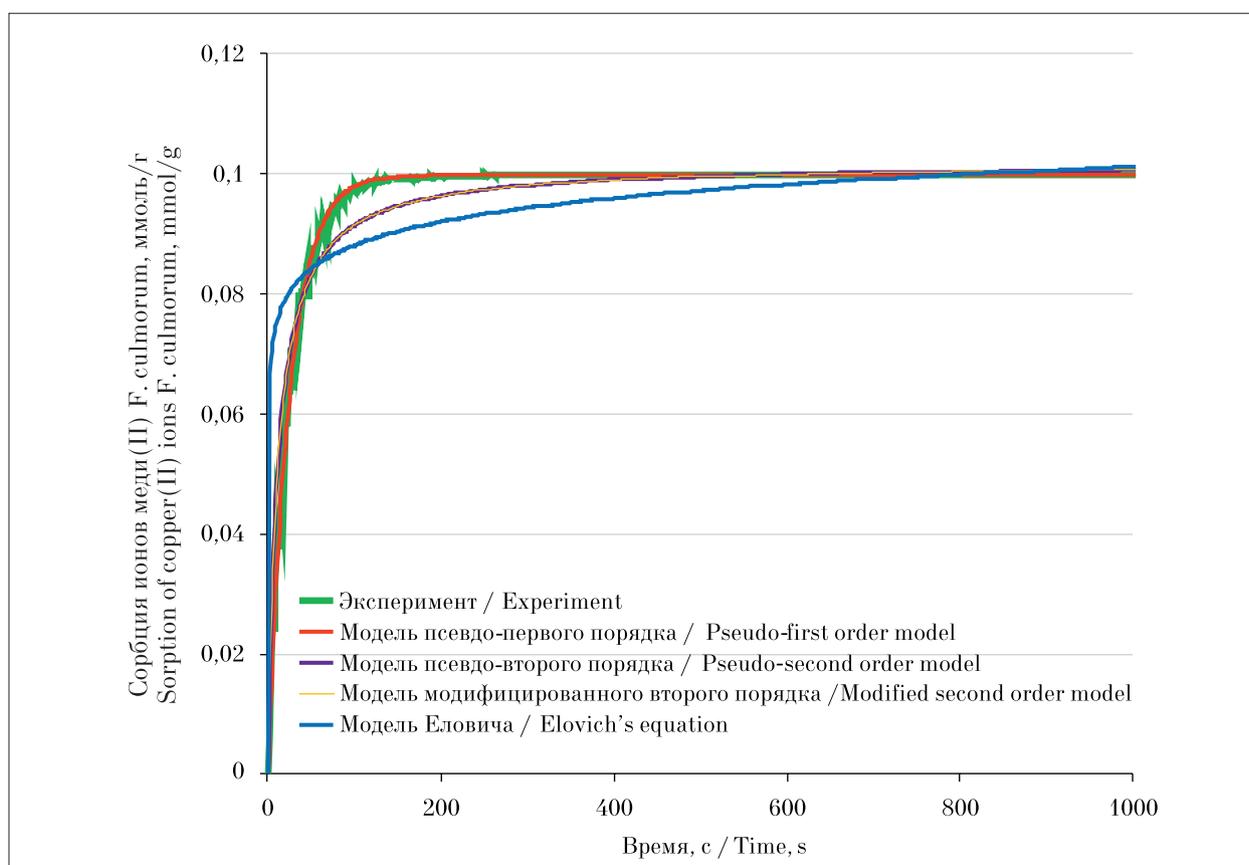


Рис. 4. Подбор моделей для описания кинетики сорбции ионов меди(II) *F. culmorum*
Fig. 4. Selection of models for describing the kinetics of sorption of copper(II) ions by *F. culmorum*

Таблица 1 / Table 1

Результаты статистической обработки (r^2) кинетических кривых сорбции тяжёлых металлов микромицетами р. *Fusarium* моделями химической кинетики
 Results of statistical processing (r^2) of kinetic curves of sorption of heavy metals by micromycetes of the genus *Fusarium* using chemical kinetics models

Вид микромицета Species of micromycete	Модель / Model			
	псевдо-первого порядка pseudo-first order	псевдо-второго порядка pseudo-second order	модифицированного второго порядка modified second order	Модель Еловича Elovich's equation
Cu ²⁺				
<i>F. oxysporum</i>	<u>0,9877</u>	0,9543	0,9543	0,4921
<i>F. culmorum</i>	<u>0,9934</u>	0,9274	0,9274	0,4979
<i>F. poae</i>	<u>0,9893</u>	0,9298	0,9298	0,5967
<i>F. sporotrichioides</i>	0,9341	<u>0,9905</u>	<u>0,9905</u>	0,8323
Pb ²⁺				
<i>F. oxysporum</i>	<u>0,9949</u>	0,9829	0,9829	0,5704
<i>F. culmorum</i>	<u>0,9728</u>	0,8487	0,8487	0,4013
<i>F. poae</i>	0,8751	<u>0,9782</u>	<u>0,9782</u>	0,6915
<i>F. sporotrichioides</i>	0,8791	<u>0,9954</u>	<u>0,9963</u>	0,7442
Cd ²⁺				
<i>F. oxysporum</i>	0,9170	0,9774	<u>0,9845</u>	0,9569
<i>F. culmorum</i>	0,9593	<u>0,9875</u>	<u>0,9876</u>	0,9066
<i>F. poae</i>	0,6768	0,8860	0,9498	<u>0,9787</u>
<i>F. sporotrichioides</i>	0,9305	<u>0,9899</u>	<u>0,9899</u>	0,6042

Примечание/Note: жирным шрифтом с подчеркиванием выделены максимальные значения / maximum values are highlighted in bold with underline.

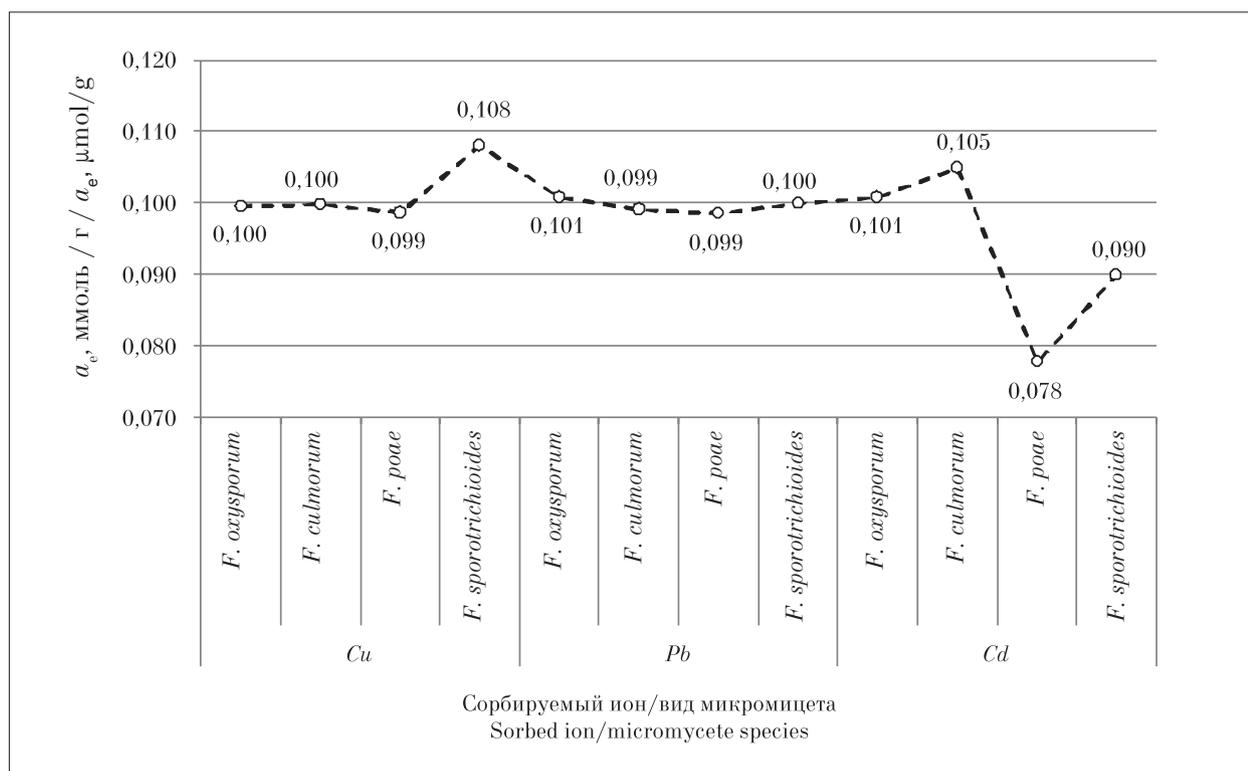


Рис. 5. Равновесная удельная масса сорбата a_e при сорбции ТМ микромицетами р. *Fusarium*
 Fig. 5. The equilibrium relative mass of the sorbate a_e during the sorption of heavy metals by micromycetes of the genus *Fusarium*

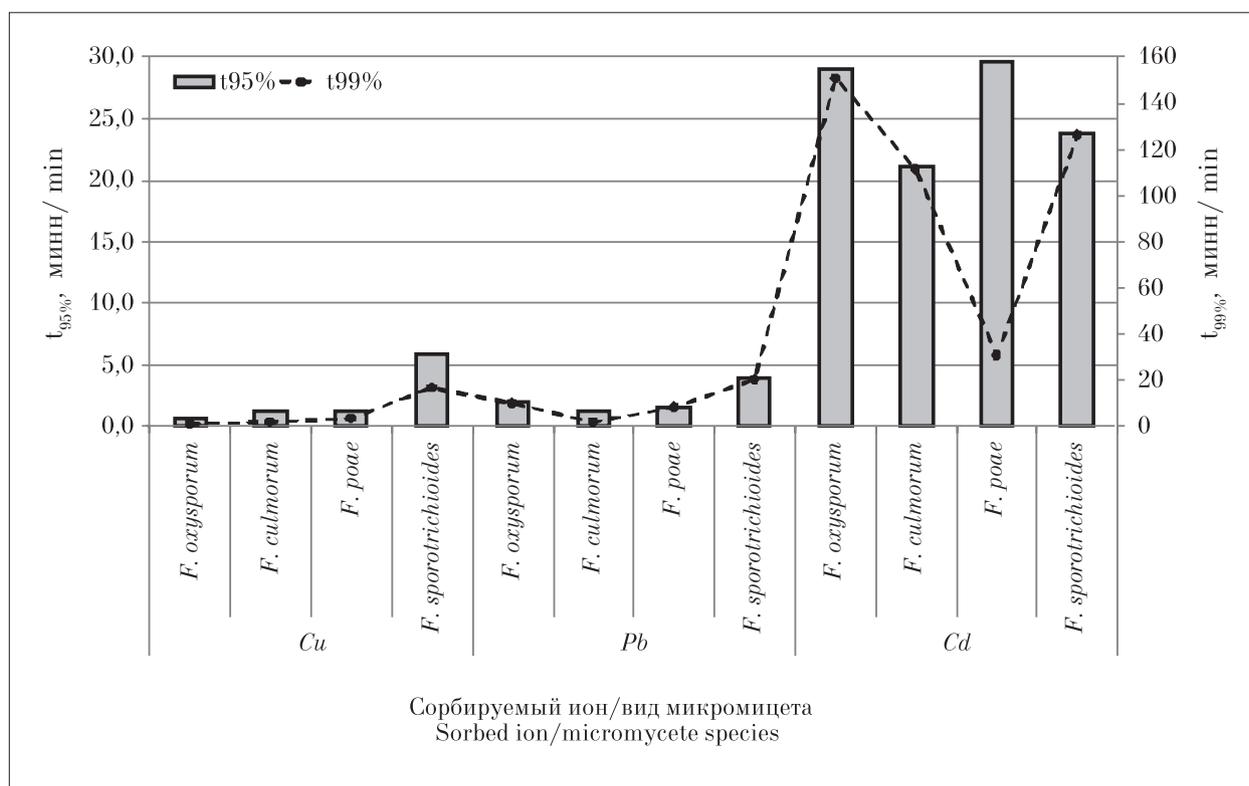


Рис. 6. Время сорбции ионов ТМ $t_{95/99\%}$, мин
 Fig. 6. The time of sorption of TM ions $t_{95/99\%}$, min

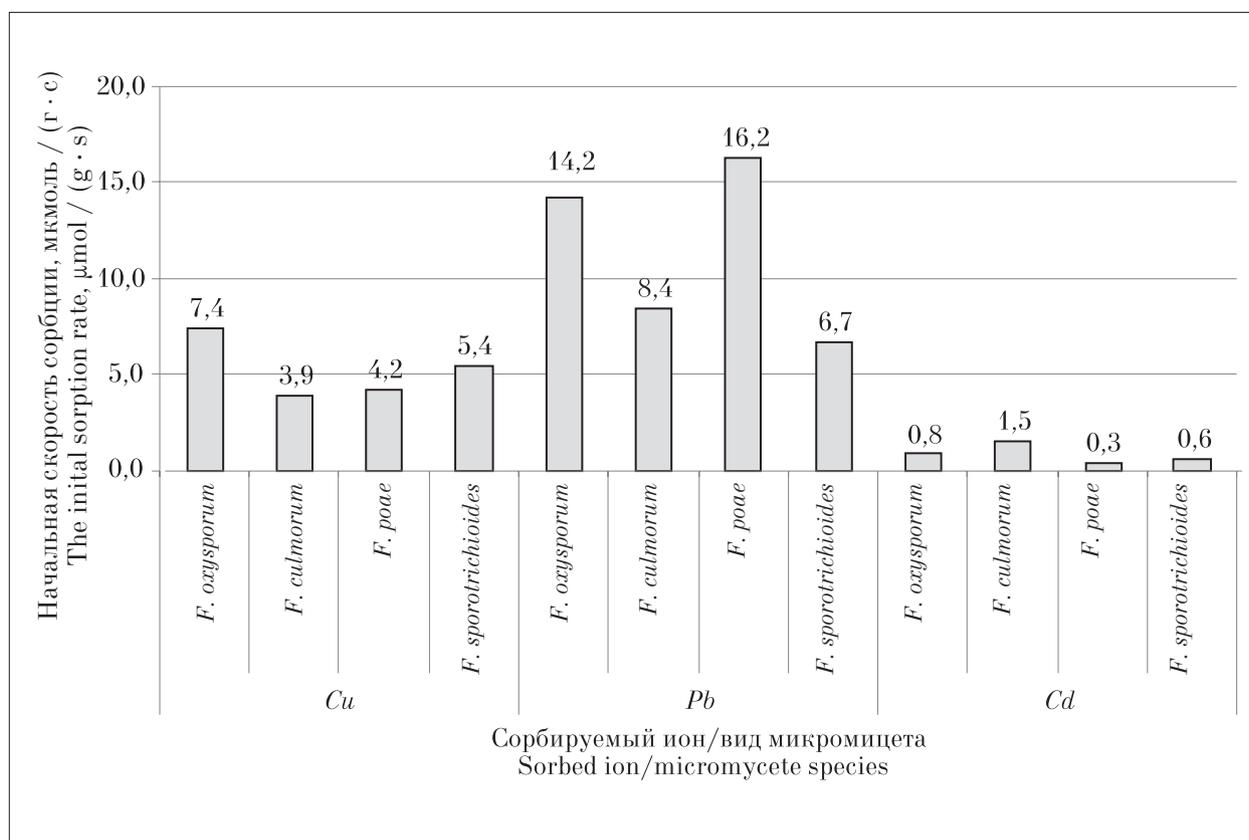


Рис. 7. Начальная скорость сорбции ионов ТМ микромицетами рода *Fusarium*
 Fig. 7. The initial rate of sorption of HM ions by micromycetes of the genus *Fusarium*

Таблица 2 /Table 2

Кислотность раствора (рН) раствора при сорбции ТМ микромицетами р. *Fusarium*: изменение и связь с р(ТМ²⁺) /Acidity of the solution (pH) during sorption of TM by micromycetes genus of *Fusarium*: change and pH–p(ТМ²⁺) relationship

Сорбируемый ион Sorbed ion	Вид микромицета Species of micromycete	Снижение рН в начале сорбции, ед. The decrease in pH at the beginning of sorption, units	Коэффициент корреляции (r) между рН и р(ТМ ²⁺) в ходе сорбции Correlation coefficient (r) between pH and p(ТМ ²⁺) during sorption
Cu ²⁺	<i>F. oxysporum</i>	0,52	0,9422
	<i>F. culmorum</i>	0,09	0,9821
	<i>F. poae</i>	0,95	0,8939
	<i>F. sporotrichioides</i>	0,54	0,9821
Pb ²⁺	<i>F. oxysporum</i>	0,54	0,9397
	<i>F. culmorum</i>	0,36	0,9802
	<i>F. poae</i>	0,76	0,4512
	<i>F. sporotrichioides</i>	0,42	0,9919
Cd ²⁺	<i>F. oxysporum</i>	0,25	0,5963
	<i>F. culmorum</i>	0,07	0,8866
	<i>F. poae</i>	0,16	0,9826
	<i>F. sporotrichioides</i>	0,19	0,6818

в основном варьировали в интервале от 0,099 до 0,108 ммоль/г сорбента, лишь только для двух видов *F. poae* и *F. sporotrichioides* при сорбции ионов кадмия она несколько ниже: 0,078 и 0,090 ммоль/г (рис. 5).

На рисунке 6 представлены сравнительные данные параметров сорбции для разных видов фузариума и разных ионов ТМ. Для большинства видов время $t_{95\%}$ для ионов меди(II) и свинца(II) варьировало от 0,7 до 1,9 мин. Для *F. sporotrichioides* оно было несколько выше, чем для других видов и составило 5,9 и 3,9 мин для меди и свинца соответственно. При сорбции кадмия $t_{95\%}$ было на порядок больше по сравнению с сорбцией других ионов и колебалось в пределах от 21,1 до 29,6 мин. При анализе времени $t_{99\%}$ в целом отмечали такую же тенденцию, что и для времени $t_{95\%}$. С увеличением исходной концентрации ионов кадмия в растворе время сорбции $t_{95\%} / t_{99\%}$ увеличивалось. Только для одного вида *F. poae* при сорбции кадмия различия во времени были незначительны: $t_{95\%}$ составляло 29,7 мин, $t_{99\%}$ – 30,7 мин. Данный факт может быть обусловлен тем, что в данном случае сорбция хорошо описывается уравнением Еловича, которое, в отличие от моделей псевдо-первого и псевдо-второго порядка, не предполагает насыщения сорбента.

Максимальные значения начальной скорости сорбции отмечали при сорбции микромицетами ионов свинца (6,7–17,2 мкмоль/(г·с)),

немного ниже были значения при сорбции меди (3,9–7,4 мкмоль/(г·с)), при сорбции кадмия установлены минимальные значения $v_{нач}$ (0,3–1,5 мкмоль/(г·с)) (рис. 7).

Если совместить используемые параметры скорости сорбции (время очистки раствора и начальную скорость сорбции), то наибольшая сорбционная способность к ионам свинца и меди характерна для *F. oxysporum* и *F. poae*, а к ионам кадмия – *F. culmorum* и *F. sporotrichioides*.

При проведении опытов по сорбции производили измерение рН раствора. Выявлено, что добавка биомассы микромицета приводила к снижению рН на 0,07–0,95 ед. рН (табл. 2). Наименьшее изменение было характерно для *F. culmorum* (0,07–0,36 ед. рН), наибольшее – для *F. poae* (0,16–0,95 ед. рН). Затем постепенно в процессе сорбции значение рН раствора несколько возрастало. При этом в большинстве случаев между показателем концентрации иона ТМ в растворе р(ТМ²⁺) и рН наблюдалась достаточно тесная корреляционная связь. Другими словами, в ходе сорбции наряду со снижением концентрации ионов ТМ в растворе происходило снижение концентрации протонов. Данный факт может быть обусловлен ионно-обменным механизмом сорбции ТМ не с протонами, а с другими катионами, например, ионами калия, магния или кальция, которые содержатся в сорбенте-микромицете, что требует дальнейшего изучения.

Заключение

В ходе эксперимента изучена кинетика сорбции ионов меди(II), свинца(II) и кадмия из растворов их нитратов с концентрацией $1 \cdot 10^{-4}$ моль/л четырьмя видами микромицетов р. *Fusarium*. Установлено, что в большинстве случаев кинетика сорбции части сорбентов хорошо описывается уравнением псевдо-первого порядка, другой части – и псевдо-второго и модифицированного второго порядка.

Для сравнения сорбционных возможностей различных видов фузариума по отношению к ТМ использовали a_e – равновесную удельную массу сорбата, $v_{нач}$ – начальную скорость сорбции и $t_{95\%}/t_{99\%}$ – время сорбции 95%/99% от значения a_e .

Выявлено, что сорбция ионов кадмия протекает с заметно более низкой скоростью по сравнению с ионами меди(II) и свинца(II): начальная скорость сорбции была в 2,6–12,3 раза и 5,6–48,1 раза меньше по сравнению с медью и свинцом соответственно; время $t_{95\%}$ в 4,0–25,4 и 6,1–18,9 раза больше; время $t_{99\%}$ – в 7,6–148,2 и 3,8–61,2 раза больше.

Значения равновесной массы сорбата, которая характеризуют ёмкость сорбента, варьировали в интервале от 0,099 до 0,108 ммоль/г, при сорбции ионов кадмия *F. roae* и *F. sporotrichioides* значения были несколько ниже и составили 0,078 и 0,090 ммоль/г. Наибольшей скоростью сорбции по отношению к ионам свинца и меди характеризовались *F. oxysporum* и *F. roae*, а к ионам кадмия – *F. culmorum* и *F. sporotrichioides*.

Работа выполнена в рамках государственного задания Института биологии Коми НЦ УрО РАН по теме «Оценка и прогноз отсроченного техногенного воздействия на природные и трансформированные экосистемы подзоны южной тайги» № 0414-2018-0003.

References

1. Skugoreva S.G., Ashihmina T.Ya., Fokina A.I., Lyalina E.I. Chemical groups of toxic effect of heavy metals (review) // Theoretical and Applied Ecology. 2016. No. 1. P. 4–13. doi: 10.25750/1995-4301-2016-1-014-019 (in Russian).
2. Fu F., Wang Q. Removal of heavy metal ions from wastewaters: a review // J. Environ. Manag. 2011. V. 92. P. 407–418. doi: 10.1016/j.jenvman.2010.11.011
3. Matheickal J.T., Yu Q. Biosorption of lead(II) and copper(II) from aqueous solutions by pre-treated biomass of Australian marine algae // Bioresour. Technol. 1999. V. 69. P. 223–229.

4. Papirio S., Frunzo L., Mattei M.R., Ferraro A., Race M., D'Acunto B., Pirozzi F., Esposito G. Heavy metal removal from wastewaters by biosorption: mechanisms and modeling // Sustainable heavy metal remediation. V. 1: Principles and processes. P. 25–64 / Eds. E.R. Rene, E. Sahinkaya, A. Lewis, P.N.L. Lens // Environmental chemistry for a sustainable world. Springer International Publishing AG. 2017. V. 8. doi: 10.1007/978-3-319-58622-9
5. Gadd G.M. Biosorption: critical review of scientific rationale, environmental importance and significance for pollution treatment // J. Chem. Technol. Biotechnol. 2009. V. 84. P. 13–28. doi: 10.1002/jctb.1999
6. Tyupa D.V., Kalenov S.V., Suyasov N.A. Biosorbents of heavy metals based on micromycetes of active sludge // Butlerovskiesoobshcheniya. 2017. V. 50. No. 5. P. 57–64 (in Russian).
7. Volesky B. Biosorbent materials // Biotechnol. Bioeng. Symp. 1986. V. 16. P. 121–126.
8. Das N., Vimala R., Karthika P. Biosorption of heavy metals – an overview // Indian J. Biotechnol. 2008. V. 7. P. 159–169.
9. Merrin J.S., Sheela R., Saswathi N., Prakasham R.S., Ramakrishna S.V. Biosorption of chromium(VI) using *Rhizopus arrhizus* // Ind. J. Exp. Biol. 1998. V. 36. P. 1052–1055.
10. Babel S., Kurniawan T.A. Low-cost adsorbents for heavy metals uptake from contaminated water: a review // J. Hazard. Mater. 2003. V. 97. P. 219–243.
11. Skugoreva S.G., Kantor G.Ya., Domracheva L.I. Biosorption of heavy metals by micromycetes: specificity of the process, mechanisms, kinetics // Theoretical and Applied Ecology. 2019. No. 2. P. 14–31. doi: 10.25750/1995-4301-2019-2-014-031 (in Russian).
12. Litovka Yu.A., Savitskaya A.G., Ryazanova T.V. Species composition and phytotoxic properties micromycetes of the genus *Fusarium*, distributed in forest kennels of Middle and South Siberia // Khvoynye borealnoy zony. 2011. V. XXIX. No. 3–4. P. 232–236 (in Russian).
13. Domracheva L., Trefilova L., Fokina A. *Fusarium*: biological control, sorption possibilities. Lap Lambert Academic Publishing, 2013. 183 p. (in Russian).
14. Artamonova V.C. Microbiological features of anthropogenically transformed soils of Western Siberia. Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 2002. 225 p. (in Russian).
15. Marfenina O.E. Anthropogenic ecology of soil mushrooms. Moskva: Meditsina dlya vseh, 2005. 156 p. (in Russian).
16. Fokina A.I., Zlobin S.S., Domracheva L.I., Trefilova L.V. Properties of some types of fungi of the genus *Fusarium* – the basis for the creation of biosorbent of heavy metals // Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2012. No. 2. P. 49–52 (in Russian).
17. Abdel-Galil E.A., Abdel Aziz O.A., Mostafa Zhran, Amin M. Characterization and sorption behavior of some toxic metal ions on *Fusarium oxysporum* as biomass adsorbent // Desalination and water treatment. 2018. V. 133. P. 134–145. doi: 10.5004/dwt.2018.23010

18. Skugoreva S.G., Domracheva L.I. Investigation of sorption of lead ions by fungus mycelium *Fusarium culmorum* from lead nitrate solution // Biodegradation of natural and natural-technogenic systems: Materialy XV Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem. Kirov: VyatGU, 2017. V. 2. P. 122–126 (in Russian).

19. Skugoreva S.G., Kantor G.Ya., Domracheva L.I., Fokina A.I. Sorption of lead(II) ions by the mycelium of the fungus *Fusarium culmorum* // Successes in medical mycology. 2018. V. XIX. P. 56–61 (in Russian).

20. Kantor G.Ya., Skugoreva S.G., Domracheva L.I. A comparative analysis of the kinetics of sorption of lead(II) ions by various sorbents // Ecology of the native land: problems and solutions: Materialy XIII Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem. Kniga 2. Kirov: Vyatskiy gosudarstvennyy universitet, 2018. P. 96–100 (in Russian).

21. Skugoreva S.G., Kantor G.Ya., Domracheva L.I., Kut'yavina 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. P. 12–18. doi: 10.25750/1995-4301-2018-3-012-018 (in Russian).

22. Workshop on microbiology / Ed. A.I. Netrusov. Moskva: Academiya, 2005. 608 p.

23. Ho Y.S., Ng J.C.Y., McKay G. Kinetics of pollutant sorption by biosorbents: review // Separ. Purif. Methods. 2000. V. 29. No. 2. P. 189–232. doi: 10.1018/SPM-100100009

24. 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. No. 5. P. 562–571. doi: 10.1002/jctb.836

25. Neudachina L.K., Petrova Yu.S., Zasukhin A.S., Osipova V.A., Gorbunova E.M., Larina T.Yu. Kinetics of sorption of heavy metal ions by pyridylethylated aminopropyl polysiloxane // Analitika i kontrol. 2011. V. 15. No. 1. P. 87–95 (in Russian).