

<https://doi.org/10.47612/2079-3928-2022-1-157-165>
УДК 582.284:66.081.3

Поступила в редакцию 7.04.2022
Received 7.04.2022

СВЯЗЫВАНИЕ ИОНОВ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ МИЦЕЛИЕМ ГРИБОВ РОДА *ASPERGILLUS*, КОЛОНИЗИРУЮЩИХ КАРТОН

А. Э. Томсон¹, Т. В. Соколова¹, И. А. Гончарова²,
А. А. Арашкова³, Н. Е. Сосновская¹, В. С. Пехтерева¹

¹Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь;

²Белорусский научно-исследовательский институт

документоведения и архивного дела, Минск, Беларусь;

³Институт микробиологии НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Аннотация. Изучено влияние антисептической обработки и высушивания на сорбционную способность ксеротолерантных грибов *A. niger*, *A. ochraceus* и *A. versicolor*, выделенных из очагов плесневого поражения картонных архивных коробок. Воздействие 2%-го раствора бензалкония хлорида (ВАС), приводящее к быстрой потере жизнеспособности мицелия, повысило сорбционную емкость грибного мицелия по отношению к ионам меди, цинка и свинца, а обработка 0,5%-м раствором биоцида, замедляющая рост грибов без полного ингибирования, несколько снижала связывание тяжелых металлов. Значительное снижение сорбционной емкости наблюдалось лишь после снижения влажности сорбентов до 12–15 %. У высушенной (после обработки 0,5%-м ВАС) биомассы *A. versicolor* сорбционная емкость по отношению к ионам меди, цинка и свинца снизилась по сравнению с влажной биомассой после обработки 2,0%-м ВАС в 17,4, 18,7 и 24,6 раза соответственно.

Ключевые слова: плесневые грибы; картон; тяжелые металлы; сорбция; влажность сорбента.

Для цитирования. Томсон А. Э., Соколова Т. В., Гончарова И. А., Арашкова А. А., Сосновская Н. Е., Пехтерева В. С. Связывание ионов тяжелых металлов мицелием грибов рода *Aspergillus*, колонизирующих картон // Природопользование. – 2022. – № 1. – С. 157–165.

BINDING OF HEAVY METAL IONS BY ASPERGILLUS MYCELIUM COLONIZING CARDBOARD

A. E. Tomson¹, T. V. Sokolova¹, I. A. Gontcharova²,
A. A. Arashkova³, N. E. Sosnovskaya¹, V. S. Pekhtereva¹

¹Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus;

²Belarusian Research Institute of Records Management and Archival Studies, Minsk, Belarus;

³Institute of Microbiology of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Abstract. The effect of antiseptic treatment and drying on the sorption capacity of xerotolerant fungi *A. niger*, *A. ochraceus* and *A. versicolor* isolated from mold lesions in cardboard archival boxes was studied. Exposure to a 2 % solution of benzalkonium chloride (BAC), leading to a rapid loss of mycelium viability, increased the sorption capacity of the fungal mycelium with respect to copper, zinc, and lead ions, and treatment with a 0.5 % biocide solution, which slowed down the growth of fungi without complete inhibition, somewhat reduced binding of heavy metals. A significant decrease in the sorption capacity was observed only after the moisture content of the sorbents was reduced to 12–15 %. In dried (after treatment with 0.5 % BAC) *A. versicolor* biomass, the sorption capacity in relation to copper, zinc and lead ions decreased compared to wet biomass (after treatment with 2.0 % BAC) by 17.4, 18.7 and 24.6 times respectively.

Keywords: mould fungi; cardboard; heavy metals; sorption; sorbent moisture.

For citation. Tomson A. E., Sokolova T. V., Gontcharova I. A., Arashkova A. A., Sosnovskaya N. E., Pekhtereva V. S. Binding of heavy metal ions by aspergillus mycelium colonizing cardboard. *Nature Management*, 2022, no. 1, pp. 157–165.

Введение. Одним из направлений экологической политики, направленной на сохранение биоресурсов, является повышение уровня регенерации макулатуры, 1 т которой заменяет 2–3 м³ древесины. Использование макулатуры, вывозимой на свалки, может на четверть уменьшить объем твердых бытовых отходов. Предприятия, перерабатывающие макулатуру, потребляют значительно

меньше воды, химикатов, энергоносителей, чем производства полного цикла [1]. Однако наряду с очевидными экологическими и экономическими преимуществами при использовании макулатуры возникает и ряд сложностей. Необходимым условием безаварийной работы оборудования и получения продукции требуемого качества является контроль загрязненности макулатуры [2].

Вопросы, связанные со сбором и утилизацией макулатуры, регулирует ГОСТ 10700-97. В перечне загрязнений, которых не должно быть в макулатуре, включены минералы, удобрения, краски, детергенты, однако их количество, химический состав и способы контроля не конкретизируются [3].

Экологичность макулатурного сырья, учитывая возможность его многократного использования, оказывает решающее влияние на безопасность конечной продукции. При выборочных проверках во вторичной упаковке пищевых продуктов неоднократно выявляли высокое содержание токсичных металлов [4, 5]. Опасность ухудшения экологической безопасности картона значительно возрастает в присутствии плесневых грибов, обладающих высокой сорбирующей активностью по отношению к ионам тяжелых металлов [6]. Способность биомассы грибов связывать ионы металлов широко варьирует между различными грибами и для различных металлов. На протекание процесса биосорбции влияет целый спектр факторов: структура клеточной стенки, pH раствора, концентрация ионов металлов, тип иона, его молекулярная масса, заряд и др.

Целлюлозные материалы являются природным питательным субстратом для грибов. Основным фактором, регулирующим их активность, является влажность. Для предотвращения роста микроорганизмов на картонно-бумажных отходах влажность макулатуры согласно ГОСТ 10700-97 должна быть не более 15 %. Бактерии в таких условиях развиваться не могут, в то время как микроскопические грибы благодаря генетическому потенциалу обладают способностью адаптироваться к экстремальным условиям внешней среды. Гриб *Aspergillus carbonarius*, выделенный из толщи картона средств архивного хранения, обладает возможностью выживания в условиях низкой влажности за счет синтеза меланина и выделения в окружающую среду значительного количества меланизированного экссудата, увлажняющего целлюлозный субстрат. Мицелий гриба и экзомеланин характеризуются высокой сорбционной способностью по отношению к ионам металлов, содержащимся в пигментах типографских красок [7].

Плесневые грибы, способные развиваться в условиях низкой влажности, представляют особую опасность для объектов библиотечного, музейного и архивного хранения. Для их защиты от внешних воздействий широко используют картонные коробки, которые при форс-мажорных обстоятельствах или нарушении температурно-влажностного режима колонизируются микроскопическими грибами [8]. Пораженные коробки, которые больше не могут быть использованы для хранения документов, обычно сдают в макулатуру, предварительно обработав антисептическими растворами с последующим высушиванием.

Цель работы – оценить сорбирующую способность по отношению к ионам тяжелых металлов сырой и высушенной биомассы ксеротолерантных плесневых грибов после биоцидного воздействия.

Методы исследования. Объектами исследования служили грибные изоляты, выделенные из пылевидных налетов на архивных коробках. Культивирование грибов проводили в жидкой или агаризованной среде Чапека – Докса.

Активность воды (a_w) регулировали внесением в среду различных концентраций хлорида натрия [9]. Ксеротолерантность плесневых грибов определяли по способности расти в широком диапазоне a_w , включая экстремально низкие значения ($a_w = 0,85$), создаваемые путем внесения в среду 17%-го раствора NaCl [10]. Критерием ростовой активности служил выход биомассы в газонной культуре. Мицелий отделяли от агаризованной среды горячим фильтрованием после 1-минутного кипячения в большом количестве воды. Выход биомассы рассчитывали как отношение абсолютно сухих веществ мицелия к единице площади агаризованной среды.

Устойчивость грибного мицелия к токсическому действию биоцидов оценивали по длительности лаг-фазы, определяемой по времени от посева до видимого проявления жизнедеятельности. Инокулятом служили пеллеты 5-суточной глубинной культуры, перенесенные из жидкой питательной среды в водные растворы бензилдиметилалкиламмоний хлорида (ВАС). После определенного времени экспозиции пеллеты извлекали, промывали в стерильной воде и помещали в чашки Петри с агаризованной питательной средой. За окончание лаг-фазы принимали появление на пеллете опушенности. При длительности лаг-фазы более 10 сут считали, что гриб утратил свою жизнеспособность.

Высушивание грибных пеллет при оценке влияния влажности мицелия на выживаемость проводили с соблюдением стерильности, помещая их на сухие бумажные фильтры, находящиеся в чашках Петри. Влажность рассчитывали по отношению к абсолютно сухому мицелию, который получали путем высушивания до постоянной массы при температуре 105 °С. При изучении сорбционных свойств мицелий высушивали аналогичным образом в нестерильных условиях, влажность сырого мицелия составляла 50–60 %, сухого – 12–15 %.

Сорбцию тяжелых металлов грибным мицелием оценивали после 5 сут культивирования грибов в колбах Эрленмейера по статической обменной емкости (СОЕ) из растворов сернокислых солей меди, никеля, свинца и цинка. 0,5 г биомассы заливали 50 мл раствора сорбата с концентрацией 100 мг/л, выдерживали 1 ч при периодическом перемешивании при комнатной температуре. Содержание ионов металлов в пробах до и после сорбции анализировали методом атомно-абсорбционной спектроскопии. Сорбционную емкость рассчитывали по формуле

$$S = (C_{\text{исх.}} - C_{\text{равн.}}) V_{\text{раст.}} / m_{\text{сорб.}} \quad (1)$$

где S – сорбционная емкость, мг/г; $C_{\text{исх.}}$ и $C_{\text{равн.}}$ – исходная и равновесная концентрации соответственно, мг/мл; $V_{\text{раст.}}$ – объем исследуемого раствора, мл; $m_{\text{сорб.}}$ – масса сорбента, г. Навеску сорбента пересчитывали на абсолютно сухую массу.

При снижении концентрации сорбата до 10 мг/л, в качестве сорбционной характеристики использовали коэффициент распределения, мг/г:

$$K_d = S / C_{\text{равн.}}$$

Приведенные данные являются средними арифметическими 3–5 повторностей опытов.

Результаты и их обсуждение. Микологические обследования средств архивного хранения показали, что картонные коробки, оклеенные сверху декоративной бумагой, легко подвержены колонизации микроскопическими грибами. Обширные колонии формировали чаще всего представители рода *Aspergillus*, светлый мицелий которых было сложно отличить от обычных пылевых налетов.

Ксерофильных штаммов, способных развиваться исключительно в условиях низкой доступности воды, среди изолятов данного рода выявлено не было. Ксеротолерантными свойствами обладали изоляты, отнесенные к видам *A. versicolor*, *A. ochraceus* и *A. niger*. Они проявили способность расти и формировать генеративные органы в присутствии 17%-го раствора NaCl, хотя максимальный выход биомассы с единицы площади газонной культуры был на среде с более низкими значениями соли. Наиболее высокую степень ксеротолерантности проявил *A. versicolor*, у которого на среде 12%-го раствора NaCl наблюдался максимальный выход биомассы газона (рис. 1).

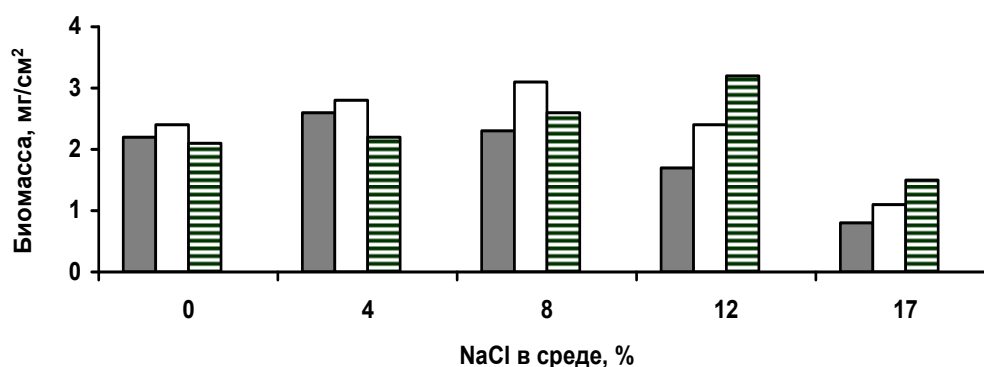


Рис. 1. Выход биомассы газонной культуры *A. niger* (■), *A. ochraceus* (□), *A. versicolor* (≡), выделенных из очагов плесневого поражения архивных коробок после 7 сут культивирования при 28 °С на среде Чапека – Докса с различным содержанием NaCl

Fig. 1. Yield of lawn culture biomass of *A. niger* (■), *A. ochraceus* (□), *A. versicolor* (≡) isolated from mold lesions of archival boxes after 7 days of cultivation at 28 °C on Czapek – Dox medium with different NaCl content

Для борьбы с плесневыми грибами чаще всего используют химическую обработку. Широкое распространение получили составы, антимикробная активность которых обусловлена присутствием четвертичного аммониевого соединения (ЧАС) бензалкониум хлорида в концентрации 1–2 %. Покоящиеся споры микроскопических грибов, в отличие от вегетативного мицелия, характеризуются высокой устойчивостью к негативному воздействию факторов внешней среды, включая биоциды. Проведенные ранее исследования выявили, что даже при экстремально высоких концентрациях ЧАС некоторые грибные споры сохраняют свою жизнеспособность. В 10%-м растворе бензалкониум хлорида 99,5 % спор *A. niger* погибло уже после 1-минутной экспозиции, но 0,5 % сохранили жизнеспособность и при длительном

воздействии биоцида. При этом происходила селекция резистентных штаммов с высокой повреждающей способностью и устойчивостью к внешним воздействиям [11].

Чтобы избежать возможных негативных последствий биоцидной обработки, пораженные поверхности следует тщательно очищать от плесневых спор, которые обычно находятся на поверхности и могут быть удалены механически. В отличие от спор мицелиальные гифы проникают вглубь картона, оплетая целлюлозные волокна.

Токсический эффект антисептических составов, зависящий от концентрации биоцида и длительности контакта, проявляется в увеличении длительности лаг-фазы, во время которой происходит незаметная внешне перестройка метаболизма гриба, направленная на преодоление организмом негативного воздействия. При обработке картона, как и других пористых материалов, исследованы концентрации, которые реально будут воздействовать на мицелий, находящийся в глубине, где он будет ослабевать. Поэтому концентрацию биоцида варьировали от 0,1 до 2,0 %, а время экспозиции – от 20 до 60 мин.

Результаты исследования показали, что при воздействии 2,0%-й концентрации ВАС мицелий теряет жизнеспособность уже через 20 мин контакта, а при 0,5%-й концентрации ВАС сохраняет ее даже после 60 мин экспозиции. Вышеуказанные условия воздействия считали ингибирующими и субингибирующими соответственно (табл. 1).

Таблица 1. Влияние концентрации бензалкониум хлорида (ВАС) и длительности воздействия на жизнеспособность плесневых грибов

Table 1. Influence of benzalkonium chloride (BAC) concentration and duration of exposure on mold viability

Гриб	Лаг-фаза, сут							
	0,1%-ая ВАС		0,5%-ая ВАС		1,0%-ая ВАС		2,0%-ая ВАС	
	20 мин	60 мин	20 мин	60 мин	20 мин	60 мин	20 мин	60 мин
<i>A. niger</i>	<3	4	3	<10	7	>10	>10	>10
<i>A. ochraceus</i>	<3	5	4	10	10	>10	>10	>10
<i>A. versicolor</i>	<3	4	3	7	4	>10	>10	>10

Биоцидная обработка приостанавливает развитие грибов, но для предотвращения их развития на картоне в дальнейшем он должен быть подвергнут сушке. Опытным путем было установлено, что при снижении влажности ниже 15 % мицелий исследованных грибов полностью теряет способность к прорастанию во всех вариантах.

В исследовании влияния антисептической обработки и высушивания на аккумуляцию ионов тяжелых металлов в качестве сорбата использовали соли меди, цинка и свинца. Ионы этих металлов больше других мигрируют в воду из сдаваемых в макулатуру одноразовых бумажных стаканчиков [12], школьных тетрадей [13], издательской продукции для детей [14].

Результаты экспериментов показали, что сорбционная емкость сырого мицелия грибов-контаминантов по отношению к ионам меди после обработки биоцидом в ингибирующей концентрации увеличилась по сравнению с контролем, а в субингибирующей концентрации незначительно уменьшилась (рис. 2).

Механизмы связывания металлов живой биомассой грибов существенно отличаются от процессов, происходящих в мертвой биомассе. Если в живом мицелии работают два различных механизма: поверхностная сорбция металлов и их энергозависимое внутриклеточное связывание, то в нежизнеспособной биомассе наблюдаются только физико-химические процессы сорбции металлов поверхностными структурами [15]. В основе поверхностной сорбции ионов тяжелых металлов грибной биомассой лежит их взаимодействие с биополимерами клеточной стенки, которая имеет оптимальную структуру для физико-химического связывания катионов тяжелых металлов [16].

Вероятно, при высокой токсической нагрузке у грибов быстро прекращается жизнедеятельность, но клеточная стенка в основном сохраняет свою пространственную структуру и свойства. Грибная биомасса, утрачивая защитные функции живого организма, начинает выполнять функцию химического сорбента, в котором обменные процессы протекают более интенсивно, чем в биологических системах. Это предположение подтвердили результаты изучения сорбции ионов меди биомассой *A. niger* в динамике. При использовании в качестве сорбента нативного мицелия система достигала состояния динамического равновесия через 25 мин, а после его обработки 2%-м раствором бензалкониум хлорида – через 15 мин. После уменьшения концентрации биоцида до 0,5 % сорбционная активность обработанного мицелия снизилась, динамическое равновесие в системе сорбент – сорбат наступило лишь через 40 мин.

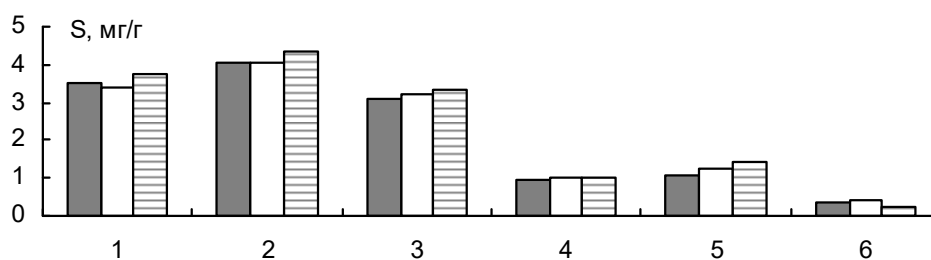


Рис. 2. Сорбционная емкость по отношению к ионам меди биомассы *A. niger* (■), *A. ochraceus* (□), *A. versicolor* (▨) до и после обработки бензалкониум хлоридом (BAC): 1 – сырой нативный мицелий; 2 – сырой мицелий после 2,0%-го раствора BAC; 3 – сырой мицелий после 0,5%-го раствора BAC; 4 – сухой мицелий; 5 – сухой мицелий после 2,0%-го раствора BAC; 6 – сухой мицелий после 0,5%-го раствора BAC

Fig. 2. Sorption capacity with respect to copper ions of biomass *A. niger* (■), *A. ochraceus* (□), *A. versicolor* (▨) before and after treatment with benzalkonium chloride (BAC): 1 – raw native mycelium; 2 – raw mycelium after 2.0 % BAC solution; 3 – raw mycelium after 0.5 % BAC solution; 4 – dry mycelium; 5 – dry mycelium after 2.0 % BAC solution; 6 – dry mycelium after 0.5 % BAC solution

Высушивание биомассы снизило ее сорбирующую способность очень значительно. Сорбционная емкость по иону меди мицелия *A. versicolor*, *A. ochraceus*, *A. niger*, высушенного после 1-часового воздействия 0,5%-м раствором бензалкониум хлорида, уменьшилась по сравнению с нативной биомассой в 11,7, 8,5 и 12,3 раза соответственно (см. рис. 2).

Способность биомассы грибов связывать ионы металлов широко варьирует между различными грибами и для различных металлов. Если *A. versicolor* сорбировал ионы меди лучше, чем другие грибы, то по отношению к ионам цинка наибольшая сорбционная емкость выявлена у *A. ochraceus*, однако закономерности воздействия биоцидной обработки и высушивания были аналогичными (рис. 3).

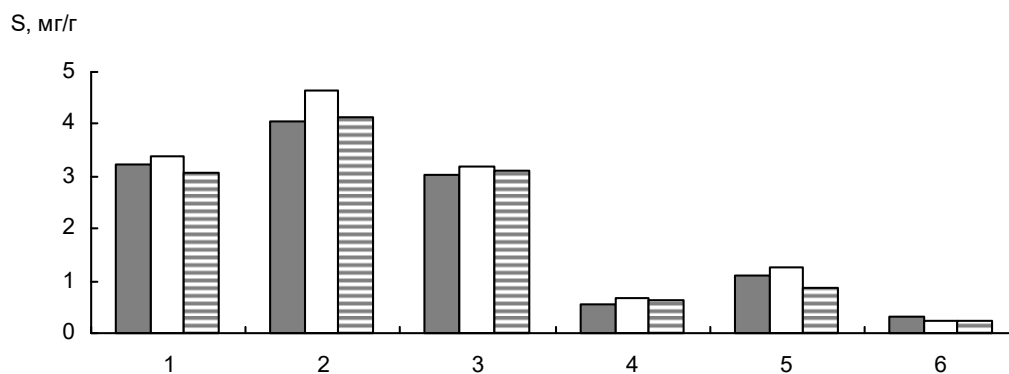


Рис. 3. Сорбционная емкость по отношению к ионам цинка биомассы *A. niger* (■), *A. ochraceus* (□), *A. versicolor* (▨) до и после обработки бензалкониум хлоридом (BAC): 1 – сырой нативный мицелий; 2 – сырой мицелий после 2,0%-го раствора BAC; 3 – сырой мицелий после 0,5%-го раствора BAC; 4 – сухой мицелий; 5 – сухой мицелий после 2,0%-го раствора BAC; 6 – сухой мицелий после 0,5%-го раствора BAC

Fig. 3. Sorption capacity with respect to zinc ions of biomass *A. niger* (■), *A. ochraceus* (□), *A. versicolor* (▨) before and after treatment with benzalkonium chloride (BAC): 1 – raw native mycelium; 2 – raw mycelium after 2.0 % BAC solution; 3 – raw mycelium after 0.5 % BAC solution; 4 – dry mycelium; 5 – dry mycelium after 2.0 % BAC solution; 6 – dry mycelium after 0.5 % BAC solution

Сорбционные процессы зависят не только от химического состава грибной клеточной стенки, но и от плотности упаковки макромолекул, соотношения кристаллических и аморфных областей. Кристаллические области практически недоступны для ионов металлов. Структурные биополимеры клеточной стенки не только химически связывают ионы металлов, но и улавливают их в межфибриллярные капилляры. Обработка биомассы, дезорганизующая биополимеры клеточной стенки с нару-

шением химических связей, в первую очередь водородных, может освободить функциональные группы и сделать их реакционноспособными. Вероятно, аналогичный процесс является причиной того, что «убитая» биомасса, сорбирует ионы меди и цинка лучше, чем нативный мицелий [17].

Сорбционная способность мицелия по отношению к ионам свинца после биоцидной обработки изменилась незначительно, а после высушивания значительно снизилась (рис. 4).

Так как в поглощении ионов свинца большую роль играет не только химическое связывание, но физическая сорбция, можно предположить, что при высушивании происходят существенные изменения капиллярно-пористой структуры клеточной стенки грибов.

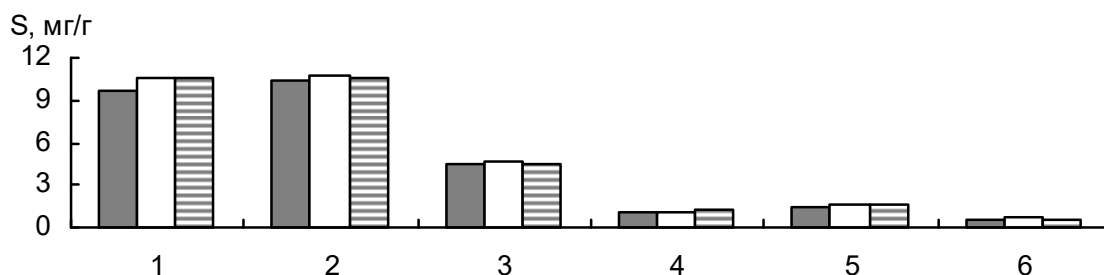


Рис. 4. Сорбционная емкость по отношению к ионам свинца биомассы *A. niger* (■), *A. ochraceus* (□), *A. versicolor* (▨) до и после обработки бензалкониум хлоридом (BAC): 1 – сырой нативный мицелий; 2 – сырой мицелий после 2,0%-го раствора BAC; 3 – сырой мицелий после 0,5%-го раствора BAC; 4 – сухой мицелий; 5 – сухой мицелий после 2,0%-го раствора BAC; 6 – сухой мицелий после 0,5%-го раствора BAC

Fig. 4. Sorption capacity with respect to lead ions of biomass *A. niger* (■), *A. ochraceus* (□), *A. versicolor* (▨) before and after treatment with benzalkonium chloride (BAC): 1 – raw native mycelium; 2 – raw mycelium after 2.0 % BAC solution; 3 – raw mycelium after 0.5 % BAC solution; 4 – dry mycelium; 5 – dry mycelium after 2.0 % BAC solution; 6 – dry mycelium after 0.5 % BAC solution

В процессе ионного обмена биосорбентам присуща избирательность, заключающаяся в том, что сорбирующая способность зависит не только от числа функциональных групп, способных вступать во взаимодействие с ионами металлов, но и от свойств самих катионов. Важной характеристикой селективности сорбции металлов является объемный коэффициент распределения K_d , показывающий отношение концентрации сорбируемого вещества в сорбенте к его концентрации в растворе в состоянии равновесия. Из разбавленных растворов солей тяжелых металлов (концентрация 10 мг/л) мицелий *A. niger* извлекал в первую очередь ионы свинца, при этом после обработки 2%-м BAC K_d повысился с 862 до 1497 мл/г. Предпочтительность сорбции свинца сохранилась и после высушивания мицелия, но на достаточно низком уровне (табл. 2).

Таблица 2. Коэффициенты распределения в системах мицелий *A. niger* – ионы тяжелых металлов, мл/г

Table 2. Distribution coefficients in systems: *A. niger* mycelium – heavy metal ions, ml/g

Обработка	K_d сырого мицелия			K_d сухого мицелия		
	Cu^{2+}	Zn^{2+}	Pb^{2+}	Cu^{2+}	Zn^{2+}	Pb^{2+}
Без обработки	516	480	862	68	36	84
2,0%-й раствор BAC	724	631	1497	85	45	106
0,5%-й раствор BAC	340	284	729	35	22	68

Клеточная стенка грибов проявляет высокое сродство к ионам тяжелых металлов, катионы калия, натрия, кальция и магния (5 мг/л), не оказывают существенного влияния на извлечение ионов тяжелых металлов из разбавленных растворов биомассой изученных грибов. У целлюлозных сорбентов, к которым относят и отходы целлюлозно-бумажной промышленности, сорбция ионов тяжелых металлов протекает по конкурентному механизму. В присутствии NaCl происходит довольно значительное уменьшение коэффициента распределения в системе целлюлозный сорбент – ионы тяжелых металлов, т. е. наблюдается процесс десорбции катионов металлов с сорбента ионами натрия. Ионы Na^+ занимают сорбционные центры сорбента и вытесняют с них ионы тяжелых металлов в раствор [18].

Заключение. В решении проблем загрязнения окружающей среды существенное внимание уделяется расширению масштабов использования упаковки из биоразлагаемых материалов и ее рециклингу. Следует учитывать, что бумажная и картонная упаковка легко подвержены колонизации плесневыми грибами. Основным способом борьбы с плесневением в настоящее время является использование биоцидов, что также может иметь негативные экологические последствия. Пораженные целлюлозные материалы после антисептической обработки могут приобрести нежелательные свойства, в числе которых усиление аккумуляции ионов тяжелых металлов. Минимизировать негативные последствия использования пораженного картона для вторичной переработки позволяет механическая очистка от грибных спор в сочетании с высушиванием мицелия до потери его жизнеспособности. Все этапы борьбы с плесневым поражением картонных коробок от выявления очагов до оценки эффективности их деконтаминации перед сдачей в макулатуру должны проводиться в сочетании с микологическим контролем.

Список использованных источников

1. Дьякова, Е. В. Переработка макулатуры : учеб. пособие / Е. В. Дьякова, Д. А. Дулькин, В. И. Комаров // Архангельск : Изд-во АГТУ, 2009. – 172 с.
2. Технология и оборудование переработки макулатуры : учеб. пособие / М. В. Ванчаков [и др.]. – СПб., 2019. – Ч. I. – 107 с.
3. ГОСТ 10700–1997. Макулатура бумажная и картонная. Технические условия. Межгосударственный стандарт. – Минск, 2002. – 12 с.
4. Duran, A. Evaluation of metal concentration in food packaging materials. Relation to human health / A. Duran, M. Tuzen, M. Soylak // Atomic spectroscopy. – 2013. – Vol. 34, № 2–3. – P. 99–103.
5. Mertoglu-Elmas, G. Toxic Metals in Paper and Paperboard Food Packagings BioResurces / G. Mertoglu-Elmas // BioResurces. – 2017. – Vol. 13, № 4. – P. 7560–7580.
6. Heavy metal contaminants removal from wastewater using the potential filamentous fungi biomass : a review / S. Siddiquee [et al.] // J. Microb. Biochem. Technol. – 2015. – Vol. 7, № 6. – P. 384–393.
7. Сорбция тяжелых металлов плесневым грибом *Aspergillus carbonarius*, меланизирующим картон / А. Э. Томсон [и др.] // Природопользование. – 2021. – № 1. – С. 221–228.
8. Тригубович, А. М. Рост микромицетов, выделенных из очагов плесневого поражения архивохранилища, при пониженной температуре и влажности / А. М. Тригубович, И. А. Гончарова, А. А. Арашкова // Микробные биотехнологии: фундаментальные и прикладные аспекты : сб. науч. тр. – Минск : Беларуская навука, 2019. – Т. 11. – С. 189–199.
9. ГОСТ Р ИСО 21807-2012 Микробиология пищевых продуктов и кормов для животных. Определение активности воды. – Введ. 01.07.2013. – М. : Стандартинформ, 2013. – 8 с.
10. Ребрикова, Н. Л. Экстремально ксерофильные грибы, обнаруженные в музейных фондах / Н. Л. Ребрикова, В. Б. Понизовская // Современная микология в России. – 2015. – Т. 4. – С. 298–300.
11. Марфенина, О. Е. Экологические условия развития потенциально патогенных мицелиальных грибов / О. Е. Марфенина, Г. М. Фомичева, А. Б. Кулько // Успехи медицинской микологии : материалы III Всерос. конгр. по мед. микологии, Москва, 24–25 марта, 2005 г. – Т. 5. – М. : Национальная академия микологии, 2005. – С. 74–77.
12. Брайкова, А. М. Миграция тяжелых металлов из одноразовых бумажных стаканчиков / А. М. Брайкова, С. К. Протасов, М. С. Мулёва // Изв. ТулГУ. – 2021. – № 3. – С. 3–13.
13. Матвейко, Н. П. Исследование миграции тяжелых металлов из школьных тетрадей / Н. П. Матвейко, А. М. Брайкова, Н. А. Циркунова // Вестн. ВГТУ. – 2019. – № 2 (37) – С. 89–96.
14. Матвейко, Н. П. Миграция тяжелых металлов из издательской продукции для детей / Н. П. Матвейко, А. М. Брайкова, В. В. Садовский // Вестн. ВГТУ. – 2018. – № 1 (34). – С. 88–95.
15. Аккумуляция тяжёлых металлов микробным сорбентом / А. Б. Таширев [и др.] // Микробиол. журн. – 1997. – Т. 59, № 3. – С. 70–79.
16. Горовой, Л. Ф. Клеточная стенка грибов – оптимальная структура для биосорбции / Л. Ф. Горовой, В. Н. Косяков // Биополимеры и клетка. – 1996. – Т. 12, № 4. – С. 49–60.
17. Феофилова, Е. П. Сорбция ионов свинца *Aspergillus niger*. Влияние предварительной обработки мицелия / Е. П. Феофилова, А. П. Марьин, В. М. Терешина // Прикл. биохим. и микробиол. – 1994. – Т. 30, № 1. – С. 149–155.
18. Никифорова, Т. Е. Особенности распределения катионов тяжелых металлов в гетерофазной системе водный раствор – целлюлозный сорбент / Т. Е. Никифорова [и др.] // Вестн. Казан. технолог. ун-та. – 2010. – № 2. – С. 116–121.

References

1. Dyakova E. V., Dulkan D. A., Komarov V. I. *Pererabotka makulatury : ucheb. posobie* [Waste paper recycling: textbook. allowance]. Arkhangelsk, Publishing House of ASTU, 2009, 172 p. (in Russian)
2. Vanchakov M. V., Kuleshov A. V., Aleksandrov A. V., Gause A. A. *Tekhnologiya i oborudovanie pererabotki makulatury : ucheb. posobie* [Technology and equipment for waste paper processing : a textbook]. SPb., 2019, part I, 107 p. (in Russian)
3. GOST 10700–1997. *Makulatura bumazhnaya i kartonnaya. Tekhnicheskie usloviya. Mezhgosudarstvennyj standart* [State Standard 10700–1997. Waste paper and cardboard. Specifications]. Minsk, 2002, 12 p. (in Russian)
4. Duran A., Tuzen M., Soylak M. Evaluation of metal concentration in food packaging materials. Relation to human health. *Atomic spectroscopy*, 2013, vol. 34, no. 3, pp. 99–103.
5. Mertoglu-Elmas G. Toxic Metals in Paper and Paperboard Food Packagings BioResurces. *BioResources*, 2017, vol. 13, no. 4, pp. 7560–7580.
6. Siddiquee S., Rovina K., Al Azad S., Naher L., Suryani S., Chaikaew P. Heavy metal contaminants removal from wastewater using the potential filamentous fungi biomass: a review. *J. Microb. Biochem. Technol.*, 2015, vol. 7, no. 6, pp. 384–393.
7. Thomson A. E., Goncharova I. A., Trigubovich A. M., Sokolova T. V., Sosnovskaya N. E., Navosha Yu. Yu., Pekhtereva V. S. *Sorbciya tyazhelykh metallov plesnevym gribom Aspergillus carbonarius, melaniziruyushchim karton* [Sorption of heavy metals by the mold *Aspergillus carbonarius*, melanizing cardboard]. *Nature Management*, 2021, no. 1, pp. 221–228. (in Russian)
8. Trigubovich A. M., Goncharova I. A., Arashkova A. A. *Rost mikromicetov, vydelennykh iz ochagov plesnevogo porazheniya arkhivokhranilishcha, pri ponizhennoj temperature i vlazhnosti* [Growth of micromycetes isolated from foci of mold damage in the archives at low temperature and humidity]. *Mikrobynye biotekhnologii: fundamental'nye i prikladnye aspekty* [Proc. Microbial biotechnologies: fundamental and applied aspects]. Minsk, Belarusian Science Publ., 2019, vol. 11, pp. 189–199. (in Russian)
9. GOST R ISO 21807-2012 *Mikrobiologiya pishchevykh produktov i kormov dlya zhivotnykh. Opredelenie aktivnosti vody*. [State Standard R ISO 21807-2012. Microbiology of food and animal feed. Determination of water activity]. Introduction 07/01/2013. Moscow, Standartinform Publ., 2013, 8 p. (in Russian)
10. Rebrikova N. L., Ponizovskaya V. B. *Ehkestremal'no kserofil'nye griby, obnaruzhennyye v muzejnykh fondakh* [Extremely xerophilic fungi found in museum collections]. *Modern Mycology in Russia*, 2015, vol. 4, pp. 298–300. (in Russian)
11. Marfenina O. E., Fomicheva G. M., Kulko A. B. *Ehkologicheskie usloviya razvitiya potencial'no patogennykh micelial'nykh gribov* [Ecological conditions for the development of potentially pathogenic filamentous fungi]. *Uspekhi medicinskoj mikologii: materialy III Vserossijskogo kongressa po medicinskoj mikologii* [Proc. III All-Russian Congress "Progress in medical mycology"]. Moscow, 24–25 March, 2005, vol. 5. Moscow, National Academy of Mycology Publ., 2005, pp. 74–77. (in Russian)
12. Braikova A. M., Protasov S. K., Muleva M. S. *Migraciya tyazhelykh metallov iz odnorazovykh bumazhnykh stakanchikov* [Migration of heavy metals from disposable paper cups]. *News of TuSU*, 2021, no. 3, pp. 3–13. (in Russian)
13. Matveiko N. P., Braikova A. M., Tsirkunova N. A. *Issledovanie migracii tyazhelykh metallov iz shkol'nykh tetradej* [Study of the migration of heavy metals from school notebooks]. *Bulletin of VSTU*, 2019, no. 2 (37), pp. 89–96. (in Russian)
14. Matveiko N. P., Braikova A. M., Sadovsky V. V. [Migration of heavy metals from publishing products for children]. *Bulletin of VSTU*, 2018, no. 1 (34), pp. 88–95. (in Russian)
15. Tashirev A. B., Smirnova G. F., Yanover S. B., Samchuk A. P. *Akkumulyaciya tyazhyolykh metallov mikrobnym sorbentom* [Accumulation of heavy metals by microbial sorbent]. *Microbiol. well.*, 1997, vol. 59, no. 3, pp. 70–79. (in Russian)
16. Gorovoy L. F., Kosyakov V. N. *Kletochnaya stenka gribov – optimal'naya struktura dlya biosorbicii* [The cell wall of fungi – the optimal structure for biosorption]. *Biopolymers and cells*, 1996, vol. 12, no. 4, pp. 49–60. (in Russian)
17. Feofilova E. P., Maryin A. P., Tereshina V. M. *Sorbciya ionov svinca Aspergillus niger. Vliyanie predvaritel'noj obrabotki miceliya* [Sorption of lead ions by *Aspergillus niger*. Influence of pretreatment of mycelium]. *Applied biochem. and microbiol.*, 1994, vol. 30, no. 1, pp. 149–155. (in Russian)
18. Nikiforova T. E., Kozlov V. A., Modina E. A., Rodionova M. V., Gagina A. N. *Osobennosti raspredeleniya kationov tyazhelykh metallov v geterofaznoj sisteme vodnyj rastvor – cellyuloznyj sorbent* [Features of the distribution of heavy metal cations in a heterophase system aqueous solution – cellulose sorbent]. *Bulletin of the Kazan Technological University*, 2010, no. 2, pp. 116–121. (in Russian)

Информация об авторах

Томсон Алексей Эммануилович – кандидат химических наук, доцент, заместитель директора по научной работе, заведующий Центром по торфу и сапропелям, заведующий лабораторией экотехнологий, Институт природопользования НАН Беларуси, (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: altom@nature-nas.by

Соколова Тамара Владимировна – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: tomsok49@tut.by

Гончарова Инесса Адамовна – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, Белорусский научно-исследовательский институт документоведения и архивного дела (ул. Кропоткина, 55, 220002, г. Минск, Беларусь). E-mail: gontcharova.mould@gmail.com

Арашкова Алина Александровна – научный сотрудник, Институт микробиологии НАН Беларуси (ул. Купревича, 2, 220141, г. Минск, Беларусь). E-mail: sorbis@mbio.basnet.by

Сосновская Наталия Евгеньевна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси, (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: natalisosnov@mail.ru

Пехтерева Виктория Станиславовна – научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: pehvik@yandex.ru

Information about the authors

Alexey E. Tomson – Ph. D. (Chemistry), Assistant Professor, Deputy Director, Head of the Center of Peat and Sapropel, Head of Lab. of Ecotechnology, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: altom@nature-nas.by

Tamara V. Sokolova – Ph. D. (Technical), Assistant Professor, Senior Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: tomsok49@tut.by

Inessa A. Gontcharova – Ph. D. (Biology), Leading Researcher, Institute of Microbiology of the National Academy of Sciences of Belarus (55, F. Kropotkina Str., 220002, Minsk, Belarus). E-mail: gontcharova.mould@gmail.com

Alina A. Arashkova – Researcher, Institute of Microbiology of the National Academy of Sciences of Belarus (2, Kuprevich Str. 220141, Minsk, Belarus). E-mail: sorbis@mbio.basnet.by

Nataliya E. Sosnovskaya – Ph. D. (Technical), Senior Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: natalisosnov@mail.ru

Victoriya S. Pehtereva – Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: pehvik@yandex.ru