



ЭКОЛОГИЯ/ECOLOGY

DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2026.67.3>

EDN: RCIRZH

ЛИГНИНЫ ИЗ ОТХОДОВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР: ХАРАКТЕРИСТИКА И СОРБЦИОННЫЕ СВОЙСТВА В ОТНОШЕНИИ МИКОТОКСИНА Т-2

Статья с данными

Карманов А.П.^{1,*}, Кочева Л.С.², Канарский А.В.³, Семенов Э.И.⁴¹ ORCID : 0000-0001-6871-5684;² ORCID : 0000-0002-4701-3453;³ ORCID : 0000-0002-3541-2588;¹ Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН, Сыктывкар, Российская Федерация² Институт геологии Коми научного центра Уральского отделения РАН, Сыктывкар, Российская Федерация³ Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Российская Федерация⁴ Федеральный центр токсикологической, радиационной и биологической безопасности, Казань, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (apk0948[at]yandex.ru)

Аннотация

Микотоксин Т-2 относится к числу наиболее токсичных представителей группы трихотеценовых микотоксинов, синтезируемых плесневыми грибами рода *Fusarium*. В рамках настоящей работы было проведено исследование процессов адсорбции этого микотоксина образцами лигнинов, выделенных из различных сельскохозяйственных отходов. Объектами исследования являлись лигнины, полученные из соломы различных злаковых культур, а также ксилемы топинамбура и капусты. Экспериментальные исследования проводили в водных средах, моделирующих *in vitro* условия в желудочно-кишечном тракте. Установлены особенности химической и поверхностно-пористой структуры образцов лигнинов. В ходе исследования были установлены корреляционные связи между процессами адсорбции микотоксина и показателями химической и поверхностной структуры лигнинов различного ботанического происхождения. Результаты анализа свидетельствуют о том, что хемосорбционные взаимодействия играют определяющую роль в процессах адсорбции токсина Т-2, в то время как поверхностно-пористые свойства адсорбентов оказывают лишь незначительное влияние на этот процесс.

Ключевые слова: лигнины, микотоксин Т-2, адсорбция, химическая структура.**LIGNINS FROM AGRICULTURAL WASTE: CHARACTERIZATION AND SORPTION PROPERTIES IN RELATION TO MYCOTOXIN T-2**

Data paper

Karmanov A.P.^{1,*}, Kocheva L.S.², Kanarskii A.V.³, Semenov E.I.⁴¹ ORCID : 0000-0001-6871-5684;² ORCID : 0000-0002-4701-3453;³ ORCID : 0000-0002-3541-2588;¹ Institute of biology Komi scientific center Ural branch Russian Academy of science, Syktyvkar, Russian Federation² Institute of geology Komi scientific center Ural branch Russian Academy of science, Syktyvkar, Russian Federation³ Kazan National Research Technological University (KNRTU), Kazan, Russian Federation⁴ Federal Center of Toxicological Radiological and Biological Safety, Kazan, Russian Federation

* Corresponding author (apk0948[at]yandex.ru)

Abstract

Mycotoxin T-2 is one of the most toxic representatives of the group of trichothecene mycotoxins synthesized by molds of the genus *Fusarium*. In the framework of this work, the processes of adsorption of this mycotoxin by samples of lignins isolated from various agricultural waste were studied. The objects of the study were lignins from the straw of various cereals, as well as xylem Jerusalem artichoke and cabbage. Experimental studies were conducted in aqueous media simulating *in vitro* conditions in the mammalian gastrointestinal tract. The features of the chemical and surface-porous structure of the studied lignins have been established. In the course of the study, correlations were established between the processes of mycotoxin adsorption and the parameters of the chemical and surface structure of lignins. The results of the analysis indicate that chemisorption interactions play a crucial role in the processes of T-2 toxin adsorption, while the surface-porous properties of the studied adsorbents have only a minor effect on this process.

Keywords: lignins, mycotoxin T-2, adsorption, chemical structure.**Введение**

Микотоксины – вторичные метаболиты плесневых грибов, накапливающиеся в зерновых кормах и продуктах питания при хранении. Они являются биогенными ядами и поэтому при потреблении таких кормов и продуктов у животных и человека могут возникать весьма серьезные заболевания – микотоксикозы. Существует целый ряд мер профилактики микотоксикозов, однако не всегда они приводят к нужным результатам, поэтому в настоящее время большое внимание уделяется поиску препаратов – энтеросорбентов, способных выводить микотоксины из организма животных и человека [1], [2]. К числу наиболее перспективных энтеросорбентов можно отнести различные препараты,

получаемые из киселемы растений. Технические отходы пищевой и мукомольной промышленности, содержащие большие количества растительных биополимеров – полисахаридов и лигнинов, представляют собой, на наш взгляд, весьма ценное сырье для различных отраслей промышленности, включая химическую и фармацевтическую. Значительный интерес представляют лигнины – полифункциональные ароматические биополимеры, построенные из структурных единиц гваяцильного, сирингильного и п-кумарового типов. В последние годы было показано, что лигнинные биополимеры – это перспективные природные соединения для создания нового класса биомедицинских препаратов полифункционального назначения, например, антиоксидантов, онко- и геропротекторов, а также энтеросорбентов [3]. Следует отметить, что лигнины достаточно устойчивы к воздействию пищеварительных ферментов желудочно-кишечного тракта, практически не деполимеризуются и поэтому не всасываются в кровь.

Одним из наиболее токсичных продуктов жизнедеятельности плесневых грибов является Т-2 токсин, продуцируемый грибами рода *Fuzarium* [4]. Необходимо отметить, что в 20-м веке были зафиксированы случаи массового отравления животных и людей зерном и хлебом, содержащим этот токсин [5]. В работе [6] на примере технических препаратов (сульфатный лигнин, гидролизный лигнин) показано, что лигнины действительно обладают адсорбционной способностью в отношении микотоксина Т-2. Однако возможность практического использования технических лигнинов проблематична. К числу недостатков энтеросорбентов на основе технических лигнинов относятся изменчивость и вариабельность состава препаратов, обусловленная технологическими параметрами производственных процессов, и наличие нежелательных примесей в виде соединений серы и золы. В связи с этим представляет интерес оценка сорбционных свойств так называемых малоизмененных препаратов лигнина. Как известно [7], лигнины, входящие в состав различных видов растений, отличаются по своей химической и топологической структуре, поэтому не исключено, что свойства лигнина как адсорбента будут зависеть от таксономического происхождения растений. В данной работе представлены результаты исследования химической структуры лигнинов, выделенных из некоторых видов растительных отходов, и проведена оценка их адсорбционной способности в отношении микотоксина Т-2.

Методы и принципы исследования

В качестве источника лигнинов использовали различные отходы сельскохозяйственных культур, заготовленные на опытных плантациях Сысольской сортоиспытательной станции (Республика Коми) после уборки урожая. Препараты лигнинов выделяли методом Пеппера [8], обрабатывая растительный материал водным диоксаном (9:1) в присутствии HCl (0,7 %) при температуре кипения. Обозначения препаратов диоксанлигнина: Л-1 (стебли топинамбура), Л-2 (кочерыжка капустная), Л-3 (солома пшеничная), Л-4 (солома ржаная), Л-5 (смесь соломы трех злаков: канареечника тростниковидного *Phalaroides arundinacea*, мятлика болотного *Poa palustris* и вейника седеющего *Calamagrostis canescens* при соотношении 1:1:1 по массе).

Определение функциональных групп проводили по стандартным методикам, принятым в химии лигнина [9]:

Элементный анализ проводили в экоаналитической лаборатории «Экоаналит» Института биологии Коми НЦ УрО РАН методом газовой хроматографии (Анализатор элементный EA 1110 (CHNS-O), Италия, CE Instruments).

Инфракрасные спектры образцов с преобразованием Фурье регистрировали на спектрофотометре IRPrestige-21 Shimadzu, оснащенный детектором DLATGS, в диапазоне волновых чисел 400-4000 см⁻¹ с разрешением 4 см⁻¹.

Качественное и количественное определение Т-2 токсина проводили методом хроматографии с биоавтографическим завершением, используя культуру *Candida pseudotropicalis* [10]. На первом этапе определяли показатель адсорбции микотоксина (S) при pH 2.0 и температуре 37±0,2°C при постоянном встряхивании в течение 30 минут. Значения pH и температура проведения испытания взяты нами для имитации кислотности желудка, её температуры, перистальтики и времени нахождения пищи в желудке млекопитающих. Десорбцию микотоксина (D) проводили при pH 8.0 и температуре 37±0,2°C в течение 120 минут. Эти условия были выбраны для имитации кислотности кишечника, его температуры, перистальтики и времени нахождения в нем пищи. В целом, эти условия моделировали среду желудочно-кишечного тракта (ЖКТ) свиней, как одних из наиболее чувствительных к микотоксинам видов с/х животных. Количество прочно (необратимо) адсорбированного микотоксина (S_F) вычисляли исходя из разности показателя адсорбции S и десорбции D. Для обеспечения статистической достоверности результатов, эксперименты были проведены в пятикратной повторности

Определение характеристик пористой структуры адсорбентов проводили методом низкотемпературной адсорбции азота на анализаторе удельной поверхности и пористости ASAP 2020 mp (Micromeritics, USA). Образцы адсорбента предварительно дегазировали в порту дегазации прибора при 100°C до остаточного давления 7·10⁻⁴ Па с выдерживанием при заданных условиях в течение 2 часов. Навеска образцов составляла от 20 до 160 мг в зависимости от предполагаемой структуры образца. Далее в порту анализа проводили адсорбцию и десорбцию газа в интервале давлений от 0 до 101,3 кПа. Используя программное обеспечение прибора, по полученным изотермам рассчитывали параметры пористой структуры. Объем мезопор V_{мез} определяли с помощью метода Баррета-Джойнера-Халенды. Показатели удельной площади поверхности (УПП) определяли методом Брунауэра-Эммета-Теллера (БЭТ).

Основные результаты и их обсуждение

В таблице 1 представлены результаты определения адсорбционных свойств образцов лигнина в отношении микотоксина Т-2. Наиболее высокой сорбционной активностью обладает препарат Л-3, выделенный из соломы пшеницы, показатель прочной (необратимой) адсорбции S_F которого достигает 69,8%. Чуть ниже этот показатель для препарата Л-5 – 68,3%. Наименьшей сорбционной способностью характеризуется препарат Л-1, полученный из стеблей топинамбура.

Как было далее установлено, сорбционные свойства образцов варьируются в зависимости от числа реакционноспособных функциональных групп, таких как фенольные и карбоксильные. Для образца Л-1 суммарное число этих групп S(OH_ф+OH_{ск}) оказалось наименьшим (таблица 1), что объясняет наиболее низкие по значению

сорбционные показатели. Следует также отметить, что особенностью этого образца является высокий показатель десорбции D, то есть значительное количество микотоксина связано с поверхностью адсорбента непрочными связями, которые разрываются при pH 8. Очевидно, что низкая сорбционная способность образца, полученного из стеблей топинамбура, обусловлена ограниченным числом активных функциональных групп, способных взаимодействовать с микотоксином.

Представляет интерес сопоставление данных по сорбционной способности исследуемых образцов с коммерческими энтеросорбентами. В табл. 1 представлены данные по сорбции-десорбции микотоксина Т-2 для минерального «Токсипол» и органического энтеросорбента «Микосорб». Как следует из этих результатов, препараты на основе лигнинов не уступают по сорбционным показателям указанным выше коммерческим препаратам, причем образец Л-3 характеризуется даже более высокими значениями как показателя S, так и показателя «истинной» адсорбции S_F .

Таблица 1 - Химическая характеристика образцов лигнина

DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2026.67.3.1>

Образец	S, %	D, %	S_F , %	C*, %	H*, %	ОН _ф **	S(ОН _ф +ОН _{ск}), %	ОСН ₃ , %
Л-1	58,3	47,6	30,5	59,1±1,4	6,5±0,4	1,76	3,21	18,5
Л-2	66,6	5,1	63,2	59,6±1,5	6,6±0,6	2,18	4,33	20,5
Л-3	73	4,3	69,8	60,3±1,9	5,7±0,5	2,06	5,19	15,8
Л-4	68,3	35,8	43,9	58,7±1,2	5,5±0,5	1,59	3,38	15,5
Л-5	74,2	8,4	68,3	60,1±1,1	6,1±0,6	2,41	5,27	16,0
Токсипол [11]	66,7	1,2	65,6	-	-	-	-	-
Микосорб [12]	54,4	11,0	43,4	-	-	-	-	-

Примечание: * – границы интервала абсолютной ошибки при $P=0,95$, ** – мэкв/г

Как известно, показатели адсорбции могут быть обусловлены как поверхностными свойствами сорбентов, так и структурно-химическими особенностями макромолекул, влияющими на хемосорбцию. В табл. 1 представлены данные, характеризующие химическое строение исследуемых лигнинов. Элементный состав всех препаратов различен: содержание углерода находится в интервале 58-60%, водорода – 5,5-6,6%. Соответственно, по количеству атомов кислорода препараты также несколько различаются. Как уже было указано выше, к числу активных кислородсодержащих функциональных групп, способных образовать достаточно прочные связи с молекулами микотоксина Т-2, следует отнести фенольные и карбоксильные группы. Наименьшее количество фенольных гидроксидов ОН_ф обнаружено в препарате Л-4, выделенном из ржаной соломы. Существенно больше фенольных гидроксидов выявлено в образце лигнина, который получен из набора трех видов соломы (образец Л-5).

Суммарное количество кислых функциональных групп S(ОН_ф+ОН_{ск}), обладающих высокой реакционной способностью, также существенно различается, что не может не повлиять на сорбционную способность исследуемых образцов лигнина. Анализ взаимосвязи показателей сорбции и количества ОН-групп, позволяет утверждать, что существует тесная корреляция между количеством ионогенных групп и адсорбционными показателями S и S_F (рис. 1).

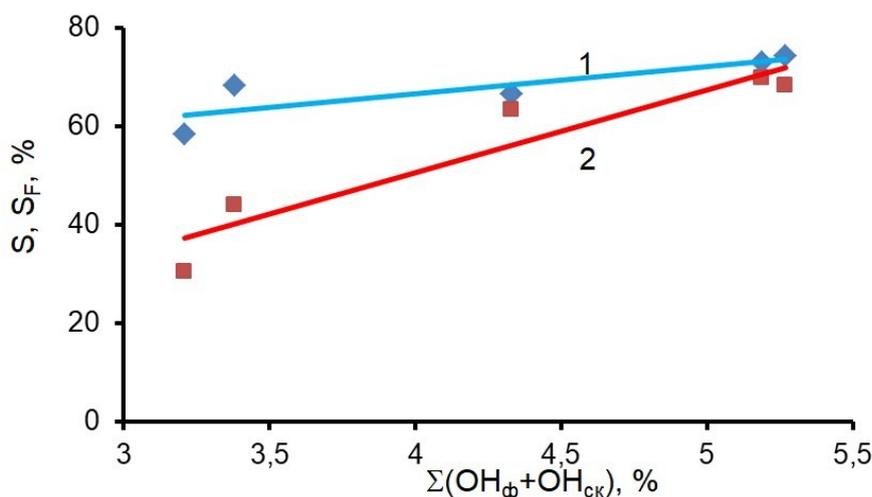


Рисунок 1 - Зависимости адсорбционных показателей S (1) и S_F (2) от общего количества кислых OH-групп
DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2026.67.3.2>

В частности, коэффициент линейной корреляции $S(\text{OH}_\phi + \text{OH}_{\text{ск}}) - S_F$ составляет 0,95. Взаимосвязь между количеством фенольных OH-групп и показателем прочной (необратимой) адсорбции выражается уравнением: $S_F = 42,5[\text{OH}_\phi] - 29,8$ при коэффициенте линейной корреляции $R=0,81$ (сильная корреляционная связь). Таким образом, полученные результаты анализа свидетельствуют о том, что хемосорбционные взаимодействия играют важную роль в процессах адсорбции токсина Т-2. Следует отметить, что различия исследуемых образцов по количеству высокоактивных гидроксильных групп достаточно наглядно проявляются при анализе ИК-Фурье спектров, в частности образцов Л-1 и Л-3 (рис. 2).

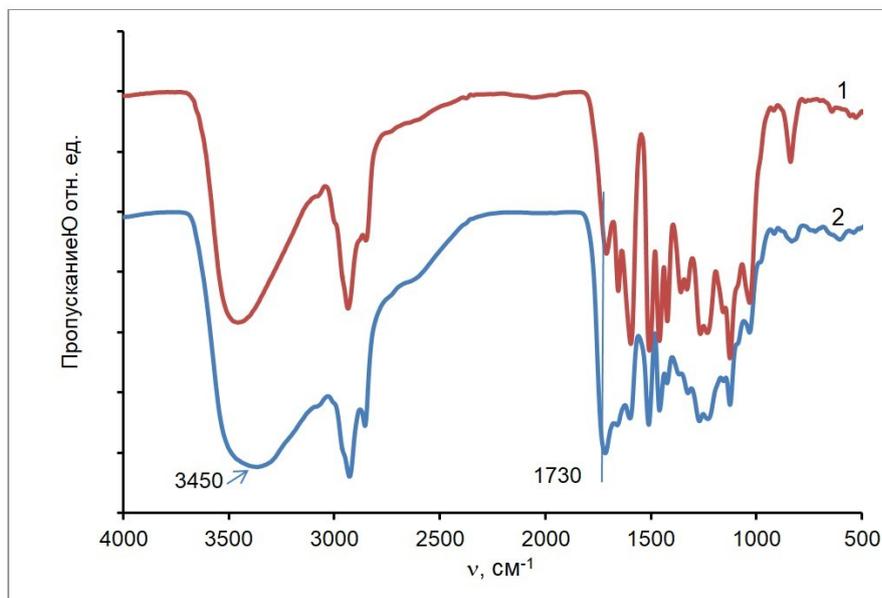


Рисунок 2 - ИК-Фурье спектры образцов лигнина:
1 – Л-1; 2 – Л-3

DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2026.67.3.3>

Полоса поглощения при 1730 см^{-1} обусловлена, как известно, валентными колебаниями $\text{C}=\text{O}$ -связей, входящих в карбоксильные группы. С учетом данных химического анализа (табл. 1) вполне логично, что для образца Л-3 эта полоса намного более интенсивна, чем для образца Л-1. Аналогичный вывод следует при анализе полосы поглощения валентных колебаний OH-групп (3430 см^{-1}). Низкочастотное плечо этой полосы заметно шире именно для образца Л-3, что подтверждает результаты химического анализа количества фенольных OH-групп (таблица 1).

Считается, что сорбционные свойства материалов в значительной степени зависят от поверхностно-пористой структуры. Поэтому были проведены исследования образцов с помощью метода низкотемпературной адсорбции азота, который выявляет все специфические особенности адсорбционных материалов. На рис. 3 приведены изотермы адсорбции азота для образцов адсорбентов, характеризующихся наиболее низкой (образец Л-5) и наиболее высокими показателями УПП (образцы Л-3 и Л-4).

Следует отметить, что изотермы всех исследованных образцов имеют типичную S-образной форму. Характерной особенностью изотерм такого типа является наличие петли гистерезиса, которая обусловлена процессами капиллярной конденсации в мезопорах, а также наличие максимума адсорбции в области высоких значений P/P_0 .

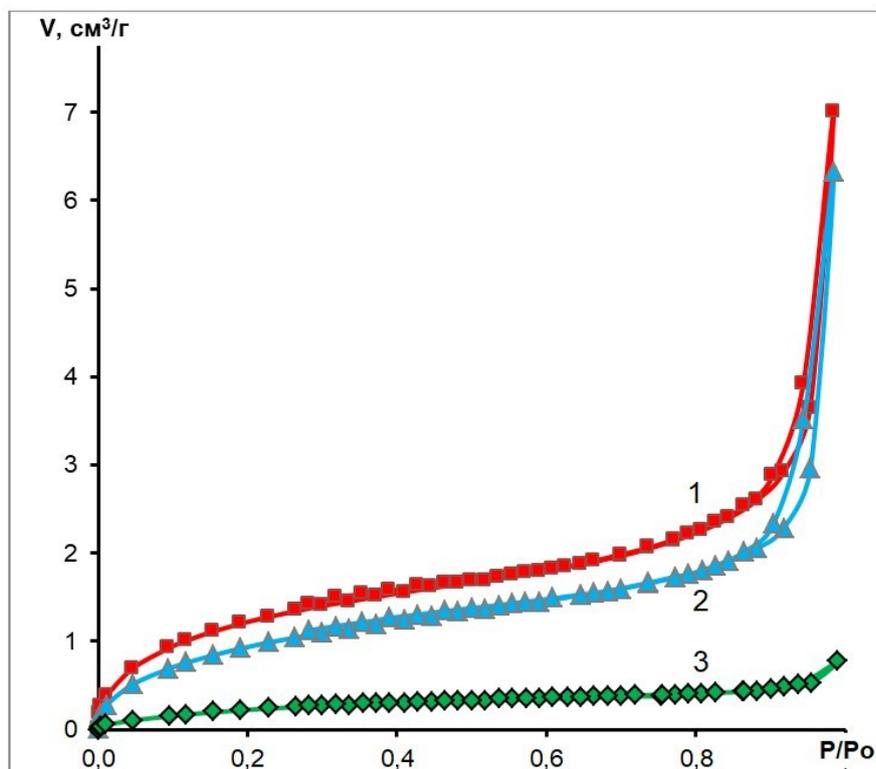


Рисунок 3 - Изотермы адсорбции азота: образцов лигнинов:

1 – Л-4; 2 – Л-3; 3 – Л-5

DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2026.67.3.4>

Поэтому рассматриваемые изотермы следует отнести к типу IV (а), что согласуется с современной классификацией [13]. Как показал детальный анализ данных, исследуемые адсорбенты следует отнести к мезопористому типу, что подтверждается расчетами различных характеристик, включая УПП и объемов пористых элементов (таблица 2).

Таблица 2 - Характеристика поверхностных свойств образцов

DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2026.67.3.5>

Образец	УПП, м ² /г	УПП-микропор, м ² /г	УПП-мезопор, м ² /г	V _Σ , см ³ /г	V _{мезопор} , см ³ /г
Л-1	24,5	1,59	15,8	0,13	0,07
Л-2	26,1	2,84	14,2	0,06	0,03
Л-3	13,9	0,01	9,9	0,05	0,03
Л-4	36,0	1,19	34,8	0,26	0,14
Л-5	4,65	1,02	2,8	0,02	0,01

Установлено, что наиболее высокие характеристики имеет препарат Л-4: величина общей удельной поверхности, рассчитанная по методу Брунауэра-Эммета-Теллера дает величину 36,0 м²/г. Наименьшая удельная поверхность наблюдается для образца лигнина Л-5. Поскольку общая удельная поверхность формируется за счет поверхности мезо- и микропор, то вполне ожидаемо, что препарат Л-4 превосходит другие образцы и по общему объему пор (0,26 см³/г) и по их удельной поверхности. Несмотря на это, данный препарат является далеко не лучшим с точки зрения адсорбционной способности в отношении микотоксина Т-2. Наиболее эффективным адсорбентом оказался образец Л-3, хотя он уступает образцу Л-4 по величине УПП в 2,5 раза. Следует отметить, что и другие показатели поверхности препарата Л-3 заметно ниже, чем образца Л-4. Анализ корреляционных зависимостей (таблица 3) свидетельствует о том, что, ни высокая удельная площадь поверхности, ни объем пор не оказывает положительного влияния на процесс адсорбции микотоксина. Так взаимосвязь между удельной поверхностью и показателем прочной адсорбции



описывается корреляционным уравнением $S_F = 74,4 - (0,92 \cdot \text{УПП})$ с коэффициентом линейной корреляции $R = -0,64$ (рис. 4). Таким образом, сопоставление показателей адсорбции микотоксина Т-2 и параметров пористой структуры различных препаратов лигнинов приводит к однозначному выводу о том, что вклад механизмов физической адсорбции в данном случае является несущественным.

Итак, полученные результаты свидетельствуют о потенциальной возможности создания препаратов на основе природных лигнинов, имеющих перспективы практического применения. Безусловно, в первую очередь речь идет о возможности производства эффективных лигниновых энтеросорбентов ветеринарного назначения для применения в животноводстве. Использование малоизмененных лигнинов вместо технических гидролизных (препараты Полифепан, Фильтрум) позволят исключить примеси серы и золы и создать более безопасные и экологически чистые энтеросорбенты. Одним из перспективных практически-значимых направлений НИР является создание БАДов на основе лигнинов для профилактики микотоксикозов и уменьшения риска отравлений микотоксинами. Стоит также упомянуть об экологических и экономических выгодах использования препаратов на основе природных лигнинов. Это связано с утилизацией сельскохозяйственных отходов и созданием сорбентов из доступного и недорогого растительного сырья.

Таблица 3 - Коэффициенты линейной корреляции R и стандартного отклонения S_D для уравнений $y = a + bx$, связывающих параметры адсорбционной способности S , S_F и некоторые характеристики лигнина

DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2026.67.3.6>

Соотношение	a	b	R	S_D
$OH_\phi - S$	45,8	11,2	0,59	4,5
$OH_\phi - S_F$	-29,8	42,5	0,81	5,2
$S(OH_\phi + OH_{ck}) - S$	44,5	5,50	0,85	3,9
$S(OH_\phi + OH_{ck}) - S_F$	-16,7	16,8	0,95	6,4
$OCH_3 - S$	97,6	-1,7	-0,59	5,9
$OCH_3 - S_F$	75,8	-1,19	-0,15	19,7
$УПП - S$	74,3	-0,30	-0,57	6,0
$УПП - S_F$	74,4	-0,92	-0,64	15,3
$V_\Sigma - S$	70,7	-25,7	-0,40	6,7
$V_\Sigma - S_F$	67,8	-123,6	-0,70	14,1

Заключение

Проведено исследование процессов сорбции-десорбции микотоксина Т-2 в условиях, имитирующих среду желудочно-кишечного тракта млекопитающих. В качестве биосорбентов использованы диоксановые лигнины, выделенные из отходов сельскохозяйственных культур – соломы различных злаков, а также ксилемы топинамбура и капусты. Установлены количественные данные о пористо-пористой структуре, элементному и функциональному составу лигнинов. Показано, что наиболее высокими показателями прочной адсорбции характеризуется лигниновый сорбент, полученный из пшеничной соломы, а наиболее низкими сорбционными свойствами обладает лигнин из стеблей топинамбура. Установлены корреляционные соотношения между характеристиками сорбентов различного ботанического происхождения и сорбционной способностью в отношении микотоксина Т-2. Показано, что хемосорбционные взаимодействия между функциональными группами лигнинов и микотоксина играют определяющую роль в процессах его удаления из водных сред.

Финансирование

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-13-00196-П, <https://rscf.ru/en/project/22-13-00196/>.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Funding

The study was carried out at the expense of a grant from the Russian Science Foundation № 22-13-00196-P, <https://rscf.ru/en/project/22-13-00196/>.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.



Список литературы / References

1. Berillo D. The review of oral adsorbents and their properties / D. Berillo, A. Ermukhambetova // *Adsorption*. — 2024. — Vol. 30, № 6. — P. 1505–1527. — DOI: 10.1007/s10450-024-00515-1.
2. Huwig A. Mycotoxin detoxication of animal feed by different adsorbents / A. Huwig, S. Freimund, O. Käppeli et al. // *Toxicology Letters*. — 2001. — Vol. 122. — P. 179–188. — DOI: 10.1016/S0378-4274(01)00360-5.
3. Verdini F. Lignin as a Natural Carrier for the Efficient Delivery of Bioactive Compounds: From Waste to Health / F. Verdini, E. Calcio Gaudino, E. Canova et al. // *Molecules*. — 2022. — Vol. 27, № 11. — P. 3598. — DOI: 10.3390/molecules27113598.
4. Li Y. T-2 toxin, a trichothecene mycotoxin: review of toxicity, metabolism, and analytical methods / Y. Li, Z. Wang, R. Beier, J. Shen et al. // *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. — 2011. — Vol. 59, № 8. — P. 3441–3453. — DOI: 10.1021/jf200767q.
5. Adhikari M. T-2 mycotoxin: toxicological effects and decontamination strategies / M. Adhikari, B. Negi, N. Kaushik, A. Adhikari et al. // *Oncotarget*. — 2017. — Vol. 8, № 20. — P. 33933–33952. — DOI: 10.18632/oncotarget.15422.
6. Канарская З.А. Адсорбция микотоксинов техническими лигнинами / З.А. Канарская, А.В. Канарский, Ю.Г. Хабаров, С.Б. Селянина и др. // *Химия растительного сырья*. — 2011. — № 1. — С. 59–63.
7. Karmanov A.P. Structure and Biomedical Properties of Lignins (A Review) / A.P. Karmanov, A.V. Ermakova, O.V. Raskosha et al. // *Russian Journal of Bioorganic Chemistry*. — 2024. — Vol. 50, № 7. — P. 2657–2674. — DOI: 10.1134/S106816202407001X.
8. Pepper J.M. The isolation and properties of lignin obtained by the acidolysis of spruce and aspen woods in dioxane-water / J.M. Pepper, P. Baylis, E. Adler // *Canadian Journal of Chemistry*. — 1959. — Vol. 37, № 8. — P. 1241–1245.
9. Zakis G.F. Functional analysis of lignins and their derivatives / G.F. Zakis. — Riga : Zinatne, 1994. — 230 p.
10. Возняковский А.П. Сорбенты графенового типа для элиминации микотоксина Т-2 / А.П. Возняковский, А.П. Карманов, А.Ю. Неверовская, Л.С. Кочева и др. // *Журнал технической физики*. — 2024. — Т. 94, № 9. — С. 1489–1494. — DOI: 10.61011/JTF.2024.09.58669.71-24.
11. Тарасова Е.Ю. Поиск эффективных адсорбентов Т-2 токсина / Е.Ю. Тарасова, Э.И. Семенов, А.Р. Валиев и др. // *Вестник Марийского государственного университета. Серия: Сельскохозяйственные науки*. — 2019. — Т. 5, № 3(19). — С. 322–328.
12. Тарасова Е.Ю. Сорбционная активность энтеросорбентов различных групп по отношению к Т-2 токсину / Е.Ю. Тарасова, В.П. Коростелева, В.И. Пономарев // *Вестник Казанского технологического университета*. — 2012. — Т. 15, № 21. — С. 115–116.
13. Thommes M. Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report) / M. Thommes, K. Kaneko, A.V. Neimark, et al. // *Pure and Applied Chemistry*. — 2015. — Vol. 87, № 9–10. — P. 1051–1069. — DOI: 10.1515/pac-2014-1117.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Berillo D. The review of oral adsorbents and their properties / D. Berillo, A. Ermukhambetova // *Adsorption*. — 2024. — Vol. 30, № 6. — P. 1505–1527. — DOI: 10.1007/s10450-024-00515-1.
2. Huwig A. Mycotoxin detoxication of animal feed by different adsorbents / A. Huwig, S. Freimund, O. Käppeli et al. // *Toxicology Letters*. — 2001. — Vol. 122. — P. 179–188. — DOI: 10.1016/S0378-4274(01)00360-5.
3. Verdini F. Lignin as a Natural Carrier for the Efficient Delivery of Bioactive Compounds: From Waste to Health / F. Verdini, E. Calcio Gaudino, E. Canova et al. // *Molecules*. — 2022. — Vol. 27, № 11. — P. 3598. — DOI: 10.3390/molecules27113598.
4. Li Y. T-2 toxin, a trichothecene mycotoxin: review of toxicity, metabolism, and analytical methods / Y. Li, Z. Wang, R. Beier, J. Shen et al. // *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. — 2011. — Vol. 59, № 8. — P. 3441–3453. — DOI: 10.1021/jf200767q.
5. Adhikari M. T-2 mycotoxin: toxicological effects and decontamination strategies / M. Adhikari, B. Negi, N. Kaushik, A. Adhikari et al. // *Oncotarget*. — 2017. — Vol. 8, № 20. — P. 33933–33952. — DOI: 10.18632/oncotarget.15422.
6. Kanarskaya Z.A. Adsorbtsiya mikotoksinov tekhnicheskimi ligni [Adsorption of mycotoxins by technical lignins] / Z.A. Kanarskaya, A.V. Kanarsky, Yu.G. Khabarov, S.B. Selyanina et al. // *Khimiya rastitel'nogo syr'ya* [Chemistry of Plant Raw Materials]. — 2011. — № 1. — P. 59–63. [in Russian]
7. Karmanov A.P. Structure and Biomedical Properties of Lignins (A Review) / A.P. Karmanov, A.V. Ermakova, O.V. Raskosha et al. // *Russian Journal of Bioorganic Chemistry*. — 2024. — Vol. 50, № 7. — P. 2657–2674. — DOI: 10.1134/S106816202407001X.
8. Pepper J.M. The isolation and properties of lignin obtained by the acidolysis of spruce and aspen woods in dioxane-water / J.M. Pepper, P. Baylis, E. Adler // *Canadian Journal of Chemistry*. — 1959. — Vol. 37, № 8. — P. 1241–1245.
9. Zakis G.F. Functional analysis of lignins and their derivatives / G.F. Zakis. — Riga : Zinatne, 1994. — 230 p.
10. Voznyakovsky A.P. Sorbenty grafenovogo tipa dlya eliminatsii mikotoksina T-2 [Graphene-type sorbents for the elimination of mycotoxin T-2] / A.P. Voznyakovsky, A.P. Karmanov, A.Yu. Neverovskaya, L.S. Kocheva et al. // *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki* [Technical Physics Journal]. — 2024. — Vol. 94, № 9. — P. 1489–1494. — DOI: 10.61011/JTF.2024.09.58669.71-24. [in Russian]
11. Tarasova E.Yu. Poisk effektivnykh adsorbentov T-2 toksina [Search for effective adsorbents of T-2 toxin] / E.Yu. Tarasova, E.I. Semenov, A.R. Valiev et al. // *Vestnik of Mari State University. Chapter: Agriculture*. — 2019. — Vol. 5, № 3(19). — P. 322–328. [in Russian]



12. Tarasova E.Yu. Sorbtionnaya aktivnost' enterosorbentov razlichnykh grupp po otnosheniyu k T-2 toksinu [Sorption activity of different groups of enterosorbents in relation to T-2 toxin] / E.Yu. Tarasova, V.P. Korosteleva, V.I. Ponomarev // Vestnik of Kazan Technological University. — 2012. — Vol. 15, № 21. — P. 115–116. [in Russian]

13. Thommes M. Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report) / M. Thommes, K. Kaneko, A.V. Neimark, et al. // Pure and Applied Chemistry. — 2015. — Vol. 87, № 9–10. — P. 1051–1069. — DOI: 10.1515/pac-2014-1117.