



## ЭКОЛОГИЯ/ECOLOGY

DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2026.70.7>

EDN: YBMOBN

## СТРУКТУРНО-ХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА, АНТИОКСИДАНТНЫЕ И СОРБЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ЛИГНИНОВ ИЗ СОЛОМЫ ОДНОЛЕТНИХ ЗЛАКОВ

Научная статья

Карманов А.П.<sup>1,\*</sup>, Кочева Л.С.<sup>2</sup><sup>1</sup> ORCID : 0000-0001-6871-5684;<sup>2</sup> ORCID : 0000-0002-4701-3453;<sup>1</sup> Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН, Сыктывкар, Российская Федерация<sup>2</sup> Институт геологии Коми научного центра Уральского отделения РАН, Сыктывкар, Российская Федерация

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

Предложена: 12.04.2026; Принята: 10.06.2026; Опубликовано: 19.06.2026

## Аннотация

Методами элементного и функционального анализа, а также ИК-Фурье- и ЭПР-спектроскопии исследована химическая структура лигнинов, выделенных из соломы однолетних злаковых растений пшеницы *Triticum* (SL-T) и овса *Avena sativa* (SL-A) водно-диоксановым методом Пеппера. Установлено, что лигнины из соломы злаков относятся к GSH типу и отличаются от древесных лигнинов повышенным содержанием фенольных гидроксиллов и более высокой антиоксидантной активностью (АОА). Показатели АОА составили:  $71,4 \times 10^{-2}$  Кл/г для образца SL-A и  $63,3 \times 10^{-2}$  Кл/г для образца SL-T. Обнаружена корреляция между величиной АОА и количеством фенольных ОН групп ( $R=0,96$ ). Показано, что лигнины содержат стабильные феноксильные радикалы в количестве  $0,12 \times 10^{18}$  спин/г (SL-T) и  $0,22 \times 10^{18}$  спин/г (SL-A). В сорбционных экспериментах проведена оценка степени извлечения урана-238 из водных растворов с низкой концентрацией радионуклида ( $<1$  мкг/мл). Установлено, что исследуемые образцы SL-A и SL-T имеют различную сорбционную способность по отношению к урану, причем оба препарата показали более высокие показатели сорбции, чем березовый лигнин. Показатели прочной адсорбции урана составили 72,6% для лигнина из соломы овса и 65,9% для лигнина из пшеничной соломы. Полученные данные подтверждают перспективность использования лигнинов из соломы злаковых в качестве основы для получения энтеросорбционных препаратов и природных антиоксидантов.

**Ключевые слова:** лигнины, химическая структура, антиоксидантная активность, уран-238, адсорбция.

## STRUCTURAL AND CHEMICAL CHARACTERISTICS, ANTIOXIDANT AND SORPTION PROPERTIES OF LIGNINS FROM STRAW OF ANNUAL CEREALS

Research article

Karmanov A.P.<sup>1,\*</sup>, Kocheva L.S.<sup>2</sup><sup>1</sup> ORCID : 0000-0001-6871-5684;<sup>2</sup> ORCID : 0000-0002-4701-3453;<sup>1</sup> Institute of biology Komi scientific center Ural branch Russian Academy of science, Syktывkar, Russian Federation<sup>2</sup> Institute of geology Komi scientific center Ural branch Russian Academy of science, Syktывkar, Russian Federation

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

Suggested: 12.04.2026; Accepted: 10.06.2026; Published: 19.06.2026

## Abstract

The chemical structure of lignins isolated from the straw of annual cereal plants of wheat *Triticum* (SL-T) and oats *Avena sativa* (SL-A) by the Pepper water-dioxane method has been studied using elemental and functional analysis, as well as IR-Fourier and EPR spectroscopy. It has been established that lignins from grain straw belong to the GSH type and differ from wood lignins by an increased content of phenolic hydroxyls and a higher antioxidant activity (AOA). The AOA values were  $71,4 \times 10^{-2}$  C/g for the SL-A sample and  $63,3 \times 10^{-2}$  C/g for the SL-T sample. A correlation was found between the value of AOA and the number of phenolic OH groups ( $R=0,96$ ). It has been shown that lignins contain stable phenoxyl radicals in the amount of  $0,12 \times 10^{18}$  spin/g (SL-T) and  $0,22 \times 10^{18}$  spin/g (SL-A). In sorption experiments, the degree of extraction of uranium-238 from aqueous solutions with a low concentration of radionuclide ( $<1$  mg/ml) was estimated. It was found that the studied samples SL-A and SL-T have different sorption capacity with respect to uranium, and both preparations showed higher sorption rates than birch lignin. The rates of strong adsorption of uranium were 72,6% for lignin from oat straw and 65,9% for lignin from wheat straw. The data obtained confirm the prospects of using lignins from cereal straw as a basis for obtaining enterosorption preparations and natural antioxidants.

**Keywords:** lignins, chemical structure, antioxidant activity, uranium-238, adsorption.

## Введение

Лигнины представляют собой природные высокомолекулярные соединения [1], которые попадают в организм человека вместе с пищевыми продуктами. Эти ароматические биополимеры, построенные из структурных единиц гваяцильного (G) сиригильного (S) и *p*-кумарового (H) типов, входят в состав клеточных стенок как культурных, так

и дикорастущих пищевых растений. В настоящее время препараты с торговыми названиями *Полифепан* и *Фильтрум-СТИ*, произведенные из гидролизного лигнина, применяются в лечебной практике в качестве энтеросорбента. Следует отметить, что возможные области применения природных лигнинов не ограничиваются производством сорбционных материалов [2]. Определенные перспективы открываются сегодня для использования водорастворимых природных лигнинов в качестве антиоксидантов и геропротекторов и многих других препаратов биомедицинского назначения, поскольку, согласно последним данным, продукты на основе природных лигнинов обладают иммуностимулирующими, онкопротекторными, антирадикальными, адаптогенными и противовирусными свойствами [3]. Показано, что солома злаковых культур представляет собой ценный возобновляемый источник различных пищевых растительных полимеров, в том числе лигнинов [4]. Однако до настоящего времени сведения о структурной организации злаковых лигнинов немногочисленны, что лимитирует сферы рационального использования этого биополимера. Необходимо проведение новых исследований структуры и адсорбционных свойств природных лигнинов, выделенных из соломенного сырья для создания новых энтеросорбционных препаратов, в том числе сорбентов радионуклидов.

Цель данной работы исследование химической структуры и антиоксидантных свойств лигнинов, выделенных из некоторых растений семейства злаковых. В число решаемых задач входила также оценка сорбционных свойств лигнинов из соломы пшеницы и овса в отношении тяжелого радионуклида урана-238.

### Методы и принципы исследования

Лигнины выделяли из соломы пшеницы *Triticum* и овса *Avena sativa*, заготовленной на посевных площадях Сысольского сортоиспытательного участка (с. Визинга, республика Коми). Компонентный состав стеблей овса: лигнин — 22–24%, целлюлоза — 47–49%, легкогидролизующие полисахариды ~20–22%, зола ~4–5%. Компонентный состав стеблей пшеницы: лигнин — 21–23%, целлюлоза — 48–50%, легкогидролизующие полисахариды ~20–22%, зола ~3–4%. Препараты лигнинов овса (SL-A) и пшеницы (SL-T) получены водно-диоксановой обработкой по методу Пеппера [5]. Выход SL-A ~20%, SL-T ~25% от количества лигнина в исходном сырье.

Элементный анализ выделенных препаратов проводили на анализаторе фирмы Hewlett Packard (США). Для количественной оценки функциональных групп использовали методы, принятые в химии древесины [6].

ЭПР-спектры соединений снимали на радиоспектрометре SE/X-2547 (RadioPAN, Poland) в X-частотном диапазоне с ВЧ модуляцией 100 кГц и мощностью СВЧ поля — 2,2 мВт. Применяли резонатор RX102 с модой TE102. Оценку концентрации свободных радикалов производили с помощью эталонных образцов дифенилпикрилгидразила. Погрешность определения концентрации радикалов — 15%. Оценку длины L системы сопряженных C–C связей, по которой происходит делокализация неспаренного электрона, проводили по формуле:  $n \geq 1 + \Delta N_0 / \Delta N_{pp}$ , где  $\Delta N_0 = 2,25$  мТл — величина расщепления, характеризующая взаимодействие электрона с протоном на группе C–H.

ИК-фурье спектры регистрировались на спектрофотометре IRPrestige-21 фирмы Shimadzu (Япония), оснащенном детектором DLATGS, в диапазоне волновых чисел 400–4000 см<sup>-1</sup> с разрешением 2 см<sup>-1</sup>. Для съемок использовали прессованные таблетки KBr. Отношение сигнал/шум >40000: 1.

Антиоксидантную активность (АОА) определяли с помощью кулонометрического анализатора Expert-006 производства «Эконикс-Эксперт» (Россия). ( $n=5$ ;  $p=0,95$ ) методом кулонометрического титрования анализируемых растворов электрогенерированными соединениями;  $n=5$ ,  $p=0,95$ . Концентрация водных растворов лигнина 2%. Определение проводят при комнатной температуре. Электрогенерация брома осуществляется на потенциостате П-5827М из 0,2 М раствора бромида калия в 0,1 М водном растворе серной кислоты на платиновом электроде при постоянной силе тока 5,0 мА.

Пиролитическая хромато-масс-спектрометрия (ПХМС). Для проведения пиролиза использовали газовый хромато-масс-спектрометр GCMS-QP2010 Plus, оснащенный пиролизером EGA/PY-3030D (Frontier Laboratories Ltd.). Образцы лигнинов, взятые в количестве около 100 мкг, помещали в камеру пиролизера. Затем температуру поднимали со скоростью 50 °С/мин до 723 градусов Кельвина. Продукты пиролиза анализировали с использованием колонки из плавленного кремнезёма производства компании Agilent (США). Детектор MS функционировал в режиме ионизации электронным ударом. Анализ продуктов деструкции образцов проводили с использованием известных библиотек масс-спектров (NIST 2011 и Wiley electronic MS).

Сорбционные характеристики образцов в отношении U(VI) определяли в статических условиях при комнатной температуре (23±1 °С). Для изучения процессов сорбции использовали стандартный раствор урана-238 с концентрацией  $0,80 \times 10^{-6}$  г/мл и pH 6,0. Гидро модуль 1:20. Время экспозиции 24 часа. После контакта с раствором нитрата уранила исследуемые сорбенты отделяли от жидкой фазы фильтрованием. В фильтрате определяли активность радионуклидов, по убыли которых рассчитывали показатель первичной сорбции A (%) урана из водных растворов. Способность образцов удерживать сорбированные радионуклиды оценивали методом последовательных вытяжек. Для этого определяли степень десорбции (%) в дистиллированной воде ( $D_{H_2O}$ ), 1 М растворе ацетата аммония ( $D_{CH_3COONH_4}$ ) и 1 М растворе соляной кислоты ( $D_{HCl}$ ). Показатель прочной адсорбции радионуклида  $A_F$  (%) определяли исходя из данных по суммарной десорбции элементов. Уран определяли люминесцентным методом как в работе [7].

### Основные результаты и их обсуждение

Лигнины, наряду с целлюлозой, являются главными компонентами растительных пищевых волокон. Уникальной особенностью лигнинов является наличие кислых гидроксильных — фенольных групп, а также стабильных феноксильных радикалов, что является предпосылкой для проявления антиоксидантных свойств. Для количественной оценки интегральной антиоксидантной активности использовали кулонометрический способ, позволяющий определять суммарное содержание антиоксидантов в различных субстанциях. Метод основан на кулонометрическом титровании исследуемых образцов электрогенерированными соединениями брома ( $Br_3^-$ ,  $Br_2$ ,  $Br^-$ ), которые обладают способностью вступать в различные окислительно-восстановительные реакции [8]. В таблице 1 представлены

результаты измерения показателей АОА образцов лигнинов из соломы пшеницы SL-T и овса SL-A, а также для сравнения хвойного (*Picea abies*) и лиственного (*Robinia pseudoacacia*) лигнинов.

Таблица 1 - Количество фенольных гидроксиллов и антиоксидантная активность (АОА) лигнинов

DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2026.70.7.1>

Растительное сырье	ОН <sub>фен.</sub> , %	АОА, 10 <sup>-2</sup> , Кл/г	
		X±S	S <sub>r</sub>
Солома <i>Avena sativa</i>	2,8	71,4±3,2	0,03
Солома <i>Triticum</i>	2,6	63,3±2,4	0,05
Ель <i>Picea abies</i>	2,1	52,1±2,3	0,07
Акация <i>Robinia pseudoacacia</i>	2,2	55,1±2,0	0,05
Лигнин гидролизный	1,5	2,5±0,2	0,08
Митофен	–	108,1±3,1	0,07

Как показали измерения, величина антиоксидантной активности препарата SL-T составляет 63,3·10<sup>-2</sup> Кл/г. Более высокое значение АОА — 71,4·10<sup>-2</sup> Кл/г установлено для образца лигнина из соломы овса SL-A. Для лигнинов, выделенных из древесины акации и ели, антиоксидантная активность оказалась заметно ниже. Наиболее высоким показателем АОА 108,1·10<sup>-2</sup> Кл/г характеризуется митофен — синтетическое производное полифенолов, структурно-химический аналог коэнзима Q10; и это не удивительно, так как этот препарат является одним из самых признанных антигипоксикант-антиоксидантов пролонгированного действия, и широко используется в медицинской практике. К числу минусов митофена можно отнести его синтетическое происхождение. Таким образом, лигнины, как природные соединения, могут представлять значительный интерес для разработок новых фармакологических препаратов онко- и геропротекторного действия. В этом контексте стоит обратить внимание на исследование [9], в котором на примере мелких млекопитающих (мышей) показано, что лигнинный препарат улучшает репродуктивную функцию животных обоих полов и повышает когнитивные способности самцов.

Очевидно, что высокие антиоксидантные свойства лигнинов SL-T и SL-A обусловлены особенностями строения молекул этого биополимера. Лигнины, в отличие от других биополимеров, характеризуются поливариантностью химической структуры макромолекул [10], что обусловлено многообразием мономерных предшественников и уникальностью механизма биосинтеза, в частности, отсутствием генетического контроля процесса на стадии сборки макромолекул из монолигнолов. В настоящее время все природные лигнины в соответствии с таксономической классификацией подразделяют на три класса: хвойные, лиственные и травянистые. Одной из актуальных задач химии лигнина на современном этапе является выявление структурных особенностей лигнинов в рамках отдельных таксономических групп в ботанической классификации. В связи с этим необходимо сравнить химический состав и химическое строение макромолекул SL-T и SL-A. В таблице 2 приведен их элементный и мономерный составы и количество функциональных групп. Число мономерных единиц гваяцильного (G), сиригильного (S) и *p*-кумарового (H) типов определили, как указано в экспериментальной части, методом пиролизической хромато-масс-спектрометрии.

Таблица 2 - Элементный и мономерный составы и количество функциональных групп

DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2026.70.7.2>

Образец	C, %	H, %	COOH, %	OCH <sub>3</sub> , %	G, %	S, %	H, %
SL-A	59,2±0,1	5,26±0,10	4,3±0,2	16,3±0,3	44,7	49,1	6,3
SL-T	60,3±0,2	5,66±0,2	3,2±0,1	15,4±0,4	67,3	27,9	4,8

Результаты элементного анализа образцов показывают, что по содержанию углерода они отвечают гваяцисирингильным лигнинам, для которых определен интервал значений содержания углерода от 57% до 61%. Однако по степени метоксилированности SL-A и SL-T следовало бы отнести к классу гваяцильных лигнинов, так как число OCH<sub>3</sub>-групп в расчете на фенилпропановую единицу не превышает 1,1, что следует из расчета усредненных брутто-формулы мономерного звена: SL-A C<sub>9</sub>H<sub>9,7</sub>O<sub>3,5</sub>(OCH<sub>3</sub>)<sub>1,1</sub>; SL-T C<sub>9</sub>H<sub>10,2</sub>O<sub>3,3</sub>(OCH<sub>3</sub>)<sub>1,0</sub>. Тем не менее, противоречия между этими данными не существуют, поскольку в макромолекулах исследуемых лигнинов преобладают мономерные единицы гваяцильного типа при заметном количестве *p*-кумаровых звеньев. При этом лигнины злаков характеризуются сравнительно высоким содержанием таких кислородсодержащих функциональных групп, как фенольные гидроксилы (табл. 1). В лигнине овса количество фенольных групп равняется 2,8%, тогда как в древесных лигнинах их количество не превышает 2,2%. Ранее было выдвинуто предположение [11], что между антиоксидантной активностью и количеством фенольных гидроксиллов в лигнинах существует корреляционная взаимосвязь. Данные, приведенные в таблице 1, подтверждают эту гипотезу, поскольку уравнение АОА=f(ОН<sub>фен.</sub>) соблюдается с коэффициентом линейной корреляции R=0,96.

ИК-фурье спектры исследуемых лигнинов содержат ряд характерных полос:  $3440\text{ см}^{-1}$ ,  $1710\text{ см}^{-1}$ ,  $1600\text{ см}^{-1}$ ,  $1510\text{ см}^{-1}$ ,  $1470\text{ см}^{-1}$ ,  $1430\text{ см}^{-1}$ ,  $1325\text{ см}^{-1}$ ,  $1225$ ,  $1270\text{ см}^{-1}$ ,  $1170\text{ см}^{-1}$ ,  $1035\text{ см}^{-1}$ ,  $840\text{ см}^{-1}$ . Анализ спектров показывает, что лигнин SL-A содержит больше карбоксильных групп, на что указывает более высокая интенсивность полосы  $1710\text{ см}^{-1}$ , что согласуется с результатами химического анализа (рис. 1).

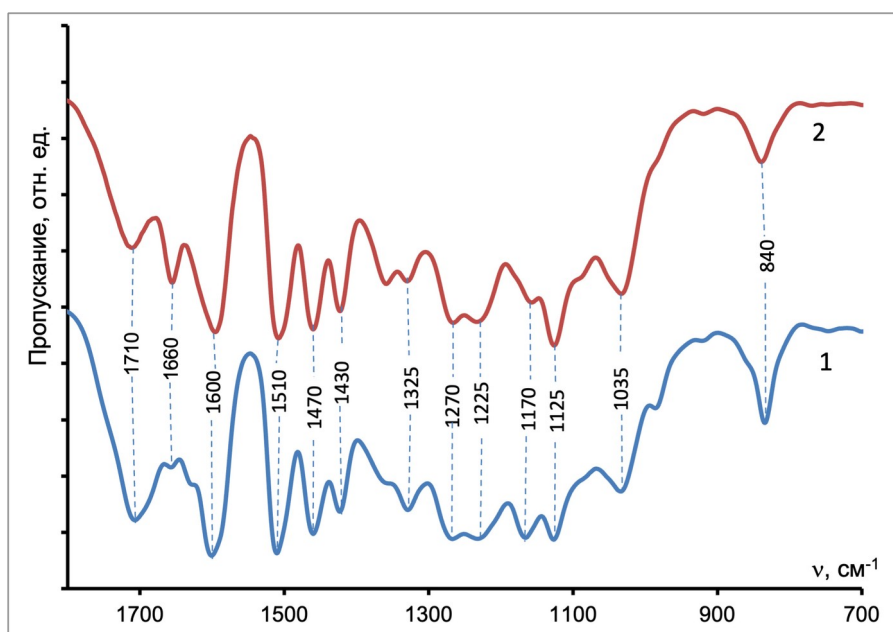


Рисунок 1 - ИК-фурье спектры образцов SL-A (1) и SL-T (2)

DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2026.70.7.3>

Можно отметить различия препаратов по содержанию сопряженных C=O-групп, входящих в кониферилальдегидные группировки ( $1660\text{ см}^{-1}$ ), что находится в согласии с результатами определения количества гваяцильных структур методом пиролитической хромато-масс-спектрометрии (ПХМС) (табл. 2). Соотношение интенсивностей полос  $1500$ ,  $1470$ ,  $1430\text{ см}^{-1}$  часто используют для хемотаксономической идентификации лигнинов. В данном случае выполняется зависимость, характерная не для гваяцилсирингильных, а, напротив, для гваяцильных, т.е. хвойных лигнинов:  $A_{1500} > A_{1470} > A_{1425}\text{ см}^{-1}$ . Кроме того, как видно из спектров,  $A_{1270} \sim A_{1225}$  для обоих образцов, хотя в соответствии с хемотаксономической классификацией Kawamura-Higuchi [12] можно было бы ожидать другого соотношения интенсивностей этих полос:  $A_{1270} < A_{1225}$ . На основе анализа всех критериев можно констатировать, что лигнины овса и пшеницы следует отнести GSH-типу, что однозначно подтверждается объективной оценкой количества G-, S-, H- структур с помощью ПХМС (табл. 2).

Как известно, интенсивность полос при  $1325\text{ см}^{-1}$  в спектрах лигнинов характеризует количество ароматических структур S-типа, тогда как полоса  $1270\text{ см}^{-1}$  является маркером присутствия ароматического кольца G-типа. По ИК-фурье спектрам можно подтвердить вывод о более высоком содержании гваяцильных структур в лигнине пшеницы ( $1270\text{ см}^{-1}$ ). А для лигнина овса можно отметить сравнительно более высокое содержание H-единиц. На это указывает интенсивность полосы в области  $1170\text{ см}^{-1}$ , которая является маркером ароматических структур H-типа. Таким образом, полученные данные свидетельствуют о том, что исследуемые лигнины имеют свои характерные особенности, отличающие их друг от друга и от лигнинов других таксономических классов.

Специфической особенностью лигнина как природного полимера является наличие парамагнитных свойств, обусловленных присутствием стабильных свободных радикалов. Спектры электронного парамагнитного резонанса могут быть охарактеризованы интенсивностью сигнала, значением электроскопического g-фактора и формой спектральной линии. Как показали исследования, сигналы ЭПР лигнинов SL-A и SL-T представляют собой изотропные синглеты с g-фактором  $2.0042\text{--}2.0044$  (табл. 3). Это свидетельствует о том, что парамагнитные свойства лигнинов обусловлены наличием неспаренных электронов — парамагнитных центров (ПМЦ) с системой сопряженных углерод-углеродных связей.

Таблица 3 - Параметры спектров ЭПР и концентрация ПМЦ

DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2026.70.7.4>

Образцы	g-фактора	$\Delta H_{pp}$ , мТл	Концентрация ПМЦ, $10^{18}$ спин/г	L, у.а.
SL-A	2,0044	0,78	0,22	12
SL-T	2,0042	0,81	0,12	11



Для лигнина SL-A ширина спектральной линии по точкам экстремумов  $\Delta H_{pp}$  составляет 0,78 мТл, что практически совпадает с  $\Delta H_{pp}$  для образца SL-T. Ширина сигнала ЭПР-спектра лигнинов из древесных растений обычно заметно меньше (0,5–0,65 мТл), что связано со спецификой распределения межмономерных связей в макромолекулах. Как известно, ширина синглетной линии определяется степенью делокализации спиновой плотности, поэтому значения  $\Delta H_{pp}$  свидетельствуют о различных размерах системы сопряженных C–C связей макромолекул лигнинов. Делокализация спиновой плотности неспаренного электрона осуществляется по фенилпропановым единицам, имеющим в боковой цепочке олефиновые фрагменты (двойная связь  $C_{\alpha}=C_{\beta}$ ). Число L для системы сопряженных углеродных атомов, по которым делокализован неспаренный электрон, достигает 12 углеродных атомов (у.а.).

Следующий этап исследований посвящен оценке сорбционных свойств лигнинов из соломы пшеницы и овса в отношении тяжелого естественного радионуклида урана-238. Очистка водных объектов от урана-238 представляет собой актуальную задачу, обусловленную загрязнением ряда природных водоемов этим радионуклидом. Концентрации урана в подземных водах может достигать 2 г/л при ПДК 15 мкг/л [13]. Для дезактивации сточных вод промышленных предприятий с высокой концентрацией радионуклидов созданы весьма эффективные технологии и методы, включая адсорбционные с применением разнообразных минеральных и органических сорбентов. Однако при очистке воды с микроконцентрациями природных радионуклидов прогнозировать эффективность известных сорбционных материалов, и оценить их пригодность как энтеросорбентов особенно сложно. В таком случае необходимо измерять не только показатель первичной адсорбции S, но и оценить уровень десорбционных процессов в водных средах разного состава. В таблице 4 представлены результаты исследования сорбции–десорбции урана для образцов SL-A и SL-T, а также для сравнения образца лигнина из древесины березы.

Таблица 4 - Показатели сорбции-десорбции урана-238

DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2026.70.7.5>

Образец	A, %	$D_{H_2O}$	$D_{CH_3COONH_4}$	$D_{HCl}$	$A_F$
SL-A	58,1	8,0	3,6	15,7	72,7
SL-T	46,8	8,7	5,2	20,2	65,9
Березовый лигнин	30,1	25,0	6,5	18,2	50,3

Как следует из полученных результатов, образец SL-A характеризуется весьма высоким показателем первичной адсорбции A, достигающим почти 60%. Березовый лигнин сорбирует в два раза меньше урана-238. Выдерживание отработанных образцов в водных средах приводит к вымыванию из них определенного количества первоначально адсорбированного радионуклида. Наличие в жидкой фазе примесей, особенно электролитов, может оказывать существенное влияние на прочность его фиксации в фазе сорбента. Согласно полученным результатам для SL-A, дистиллированная вода приводит к десорбции около 8% U-238, водно-солевой раствор ( $CH_3COONH_4$ ) десорбирует еще 3,6%, а разбавленный раствор соляной кислоты вымывает дополнительно еще 15% радионуклида. В конечном итоге, показатель прочной адсорбции  $A_F$  для лигнина SL-A равняется 72,7%. Следует отметить, что, согласно литературным данным [14], [15], это вполне приемлемый результат, указывающий на перспективность апробации этого вида лигнина в качестве энтеросорбента в экспериментах с использованием млекопитающих. Несколько более скромная величина показателя  $A_F$  получена для образца SL-T, что обусловлено во многом довольно сильной десорбцией урана в растворе HCl. Березовый лигнин характеризуется сравнительно невысоким значением величины  $A_F$  50,3%. Полученные результаты показывают, что лигнины из отходов сельскохозяйственных культур — соломы злаков пригодны для использования в качестве сорбционных материалов для извлечения урана из водных сред с его низкой (менее 1 мкг/мл) концентрацией, что представляет интерес с точки зрения создания энтеросорбционных препаратов.

### Заключение

Проведено исследование лигнинов, выделенных из соломы пшеницы *Triticum sp* и овса *Avena sativa*. Установлено, что они относятся к GSH-типу, содержат повышенное количество функциональных групп  $OH_{фен.}$  (2,6–2,8%) и обладают высокой антиоксидантной активностью ( $63,3–71,4 \times 10^{-2}$  Кл/г), коррелирующей с содержанием фенольных гидроксидов ( $R=0,96$ ). Выявлено наличие стабильных феноксильных радикалов ( $0,12–0,22 \times 10^{18}$  спин/г) с делокализацией неспаренного электрона по системе из ~12 атомов углерода. В сорбционных экспериментах с U-238 показано, что лигнин овса характеризуется высокими показателями адсорбции радионуклида, значительно превосходя березовый лигнин. Полученные результаты обосновывают перспективность использования лигнинов из соломы злаков для разработки энтеросорбентов и природных антиоксидантов.

**Финансирование**

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-13-00196, <https://rscf.ru/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, <https://rscf.ru/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 на английском языке / References in English**

1. Zhao J. A comprehensive review of unlocking the potential of lignin-derived biomaterials: from lignin structure to biomedical application / J. Zhao, M. Zhu, W. Jin [et al.] // *Journal of Nanobiotechnology*. — 2025. — Vol. 23. — DOI: 10.1186/s12951-025-03604-7.
2. Kalita P. Lignin Has Future: A Review on Valorization Approaches of Lignin from Biomass / P. Kalita, A. Sikdar, T. Bharali [et al.] // *Food and Bioprocess Technology*. — 2026. — Vol. 19. — DOI: 10.1007/s11947-026-04210-7.
3. Sadeghifar H. Lignin as a natural antioxidant: chemistry and applications / H. Sadeghifar, A. Ragauskas // *Macromol.* — 2025. — Vol. 5. — № 1. — DOI: 10.3390/macromol5010005.
4. Selvam T. Agricultural waste-derived biopolymers for sustainable food packaging: challenges and future prospects / T. Selvam, N.M.M.A. Rahman, F. Olivito [et al.] // *Polymers*. — 2025. — Vol. 17. — № 14. — DOI: 10.3390/polym17141897.
5. Pepper J. The isolation and properties of lignin obtained by the acidolysis of spruce and aspen woods in dioxane-water / J. Pepper, P. Baylis, E. Adler // *Canadian Journal of Chemistry*. — 1959. — Vol. 37. — № 8. — P. 1241–1245.
6. Zakis G. Functional analysis of lignins and their derivatives / G. Zakis. — 1994. — 102 p.
7. Kocheva L.S. Nanocarbon Materials as New Generation Bio-Sorbents for the Extraction of Trace Uranium from Aqueous Media / L.S. Kocheva, A.P. Karmanov, A.P. Vozniakovskii [et al.] // *Russian Journal of General Chemistry*. — 2025. — Vol. 95. — P. S512–S521. — DOI: 10.1134/S1070363225140051.
8. He Z.K. Coulometric microflow titrations with chemiluminescent and amperometric equivalence point detection: Bromimetric titration of low concentrations of hydrazine and ammonium / Z.K. He, B. Fuhrmann, U. Spohn // *Analytica Chimica Acta*. — 2000. — Vol. 409. — Issues 1–2. — P. 83–91. — DOI: 10.1016/S0003-2670(99)00890-9.
9. Raskosha O. Evaluation of safety and biomedical potential of water-soluble oat lignin *Avena sativa* L. / O. Raskosha, A. Karmanov, A. Ermakova [et al.] // *International Journal of Biological Macromolecules*. — 2024. — Vol. 283. — DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2024.137609.
10. Ralph J. Lignin structure and its engineering / J. Ralph, C. Lapierre, W. Boerjan // *Current Opinion in Biotechnology*. — 2019. — Vol. 56. — P. 240–249. — DOI: 10.1016/j.copbio.2019.02.019.
11. Karmanov A. Investigation of the structure and properties of lignins of some agricultural plants / A. Karmanov, L. Kocheva, O. Raskosha [et al.] // *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*. — 2023. — Vol. 53. — DOI: 10.1016/j.bcab.2023.102848.
12. Higuchi T. Differences in biosyntheses of guaiacyl and syringyl lignins in woods / T. Higuchi, M. Shimada, F. Nakatsubo [et al.] // *Wood Science and Technology*. — 1977. — Vol. 11. — P. 153–167. — DOI: 10.1007/BF00350993.
13. Ferronsky V.I. *Isotopes of the Earth's Hydrosphere* / V.I. Ferronsky, V.A. Polyakov. — Dordrecht-Heidelberg : Springer Science & Business Media, 2012. — 630 p.
14. Tatarchuk T. A review on removal of uranium (VI) ions using titanium dioxide based sorbents / T. Tatarchuk, A. Shyichuk, I. Mironyuk [et al.] // *Journal of Molecular Liquids*. — 2019. — Vol. 293. — DOI: 10.1016/j.molliq.2019.111563.
15. Aly M. A review: studies on uranium removal using different techniques. Overview / M. Aly, M. Hamza // *Journal of Dispersion Science and Technology*. — 2013. — Vol. 34. — № 2. — P. 182–213. — DOI: 10.1080/01932691.2012.657954.