



научный электронный журнал
ПРИНЦИПЫ ЭКОЛОГИИ

<http://ecopri.ru>

ПЕТРОЗАВОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ



<http://petrsu.ru>

Издатель

ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет»
Российская Федерация, г.Петрозаводск, пр.Ленина,33

Научный электронный журнал

ПРИНЦИПЫ ЭКОЛОГИИ

<http://ecopri.ru>

№ 3 (61). Сентябрь, 2026

Главный редактор

А. В. Коросов

Редакционный совет

В. Н. Большаков
А. В. Воронин
Н. Н. Немова
Г. С. Розенберг
А. Ф. Титов
Г. С. Антипина
В. В. Вапиров
А. М. Макаров

Редакционная коллегия

Т. О. Волкова
Е. П. Иешко
В. А. Илюха
Н. М. Калинкина
J. P. Kurhinen
А. Ю. Мейгал
J. B. Jakovlev
B. Krasnov
A. Gugolek
В. Н. Якимов
А. В. Сони́на

Службы поддержки

Н. А. Марфицына
Е. В. Голубев
С. Л. Смирнова
Н. Д. Чернышева
М. Л. Киреева

ISSN 2304-6465

Адрес редакции

185910, Республика Карелия, г.Петрозаводск, пр. Ленина, 33. Каб. 453

E-mail: ecopri@psu.karelia.ru

<http://ecopri.ru>



© ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет»



УДК 57.033+574.24+577.34

ОЦЕНКА ЗАЩИТНЫХ СВОЙСТВ ЛИГНИНОВ ПРИ ХРОНИЧЕСКОМ ПОСТУПЛЕНИИ УРАНА В ОРГАНИЗМ МЕЛКИХ МЛЕКОПИТАЮЩИХ

РАСКОША

Оксана Вениаминовна

кандидат биологических наук, Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук (ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН), 167982, Республика Коми, Сыктывкар, ул. Коммунистическая, 28, raskosha@ib.komisc.ru

РАЧКОВА

Наталья Гелиевна

кандидат биологических наук, Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук (ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН), 167982, Республика Коми, Сыктывкар, ул. Коммунистическая, 28, rachkova@ib.komisc.ru

КАРМАНОВ

Анатолий Петрович

доктор химических наук, Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук (ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН), 167982, Республика Коми, Сыктывкар, ул. Коммунистическая, 28, apk0948@ib.komisc.ru

КОЧЕВА

Людмила Сергеевна

доктор химических наук, Институт геологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук (ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН), 167982, г. Сыктывкар, ул. Первомайская, 54, lskocheva@geo.komisc.ru

Ключевые слова:

уран

Avena sativa

Rhodiola rósea

мелкие млекопитающие

бионакопление

выживаемость

защитный эффект

Аннотация: Проведена оценка защитных свойств лигнинов, полученных из стеблей овса *Avena sativa* и родиолы розовой *Rhodiola rósea*, при хроническом пероральном поступлении урана-238 в организм мышей линии СВА. Животные в течение 30 суток получали растворы нитрата уранила с концентрациями урана 2.03, 6.1 и 12.2 мг/л. Установлено, что накопление урана в организме мышей возрастало непропорционально его концентрации, что может указывать на физиологические барьеры аккумуляции радионуклида. После профилактического приема растворов лигнинов в качестве антидотов к бионакоплению урана (12.2 мг/л) смертность мышей снижалась: у самок – на 20 % (лигнин родиолы) и на 30 % (лигнин овса), у самцов – на 10 % (оба лигнина). Защитный эффект (20-кратное снижение содержания урана) зафиксирован в организме самок старшей возрастной группы (7–12 месяцев), тогда как у самцов того же возраста и у более молодых (4–6 месяцев) особей обоего пола барьерные свойства лигнинов не проявлялись. Полученные результаты открывают перспективы для разработки специализированных антидотных пищевых добавок с учетом половозрастных характеристик животных, а также могут быть полезными для дальнейшего углубленного изучения механизмов детоксикации организмов от радионуклидов.

© Петрозаводский государственный университет

© Раскоша О. В., Рачкова Н. Г., Карманов А. П., Кочева Л. С.

Получена: 05 июня 2026 года

Подписана к печати: 29 сентября 2026 года

Введение

Проблема загрязнения окружающей среды ураном, обусловленная деятельностью ядерного топливного цикла и добывающей промышленности, создает серьезную экологическую угрозу, поскольку этот радиоактивный элемент, накапливаясь в трофических цепях, способен вызывать интоксикацию млекопитающих, включая человека. Для некоторых групп организмов безопасность урана нельзя гарантировать даже при его концентрациях в среде обитания, значительно более низких, чем рекомендовано для питьевых вод Всемирной организацией здравоохранения (ВОЗ) (Sheppard, Sheppard, 2005; Guidelines..., 2022). Уран – поливалентный химический радиоактивный элемент, ионы которого характеризуются высокой плотностью заряда и склонны к разнообразным физико-химическим реакциям: гидратации, комплексообразования и гидролиза. Эти свойства в значительной мере определяют биологические эффекты воздействия его радионуклидов на животных. Важно отметить, что изотопы урана, в частности уран-238 и уран-235, которые являются родоначальниками двух природных рядов, обладают не только радиоактивностью, но и высокой токсичностью, которая проявляется в оксидативном стрессе и дисбалансе в редокс-системах живых клеток, нарушая регуляторные механизмы в органах-мишенях (Domingo, 2001; Sheppard, Sheppard, 2005; Garmash et al., 2014; Kudyasheva et al., 2021; Tan et al., 2024; Li et al., 2026). В организм млекопитающих уран может поступать разными путями (через кожу, раны или ротовую полость) и тем самым определять особенности депонирования и скорости всасывания радионуклидов в различные органы (Tracy et al., 1992). Пероральный путь (через желудочно-кишечный тракт) является основным маршрутом поступления урана в организм при потреблении загрязненной питьевой воды (Frelon et al., 2005). Известно, что абсорбция урана в желудочно-кишечном тракте не превышает 0.2–6 % от поступившей дозы (Konietzka, 2015; Bolt et al., 2018). Из системного кровотока основная масса урана быстро выводится с мочой, однако, будучи депонированным в костной ткани и почках, он медленно покидает организм, что может вызывать острую почечную недостаточность (Tracy et al., 1992; Domingo, 2001; Li et al., 2026; Wang et al., 2026). Острая токсичность урана для некоторых млекопитающих про-

является при употреблении ацетата уранила в диапазоне доз от 20 до 1280 мг/кг массы тела (Domingo et al., 1987). При этом суммарная доза после 14-дневного употребления урана, при которой достигается 50 % гибель лабораторных мышей, составляет 242 мг/кг. Выявлено, что ионы уранила даже в микромолярных концентрациях усиливают радиационно-индуцированный окислительный стресс и значительно увеличивают смертность мышей, подвергшихся сублетальным дозам рентгеновских лучей (Garmash et al., 2014).

В настоящее время поиск эффективных средств защиты при урановой интоксикации остается актуальной задачей (Cao et al., 2024; Li et al., 2026), решение которой требует использования стандартизированных животных в строго контролируемых токсикологических условиях, моделирующих хроническое поступление урана в организм животных разного возраста и пола (Bolt et al., 2018; Kudyasheva et al., 2021). Среди препаратов на основе известных классов протекторов (ферментативные антиоксиданты, фенольные соединения, миметики ферментов, содержащие амино- или гидроксильные функциональные группы соединения и др.) для защиты живых организмов от токсического воздействия урана рассматривают в качестве перспективных некоторые хелатирующие препараты (деферипрон (L1), 1-(2-гидрокси-этокси)-метил-2-метил-3-гидрокси-4-пиридинон (HEML1), углеводные полимеры (β - (1, 3)- D-глюкан), ионы цинка, галловая кислота, фосфорилированные пептиды и другие соединения (Гудков и др., 2014; Du et al., 2024; Tan et al., 2024; Li et al., 2026).

Существует гипотеза, что защитную роль при урановой интоксикации млекопитающих могут сыграть препараты на основе лигнинов, обладающие широким биомедицинским потенциалом (Karmanov et al., 2024). Прежде всего уникальные свойства лигнинов обусловлены комплексом их физико-химических (сложная структура, реактивность) и биологических (биоразложение, биосовместимость) характеристик наряду с низкой токсичностью. Биомедицинские эффекты этих природных биополимеров многие авторы (Houpert et al., 2005; Кочева и др., 2007; Barapatre et al., 2016; Hasegawa et al., 2015; Vinardell et al., 2017; Karmanov et al., 2024; Raskosha et al., 2024) связывают с тем, что они служат источником природных полифенолов, которые обладают доказанным

благоприятным воздействием на здоровье животных и человека: защищают от окислительного стресса, сердечно-сосудистых заболеваний, диабета, астмы, нейродегенеративных болезней и замедляют старение. Наряду с различными аспектами биологической активности преимуществами препаратов лигнинов перед другими антиоксидантами являются растворимость в водных средах, длительный срок годности, природное происхождение, а также способность к взаимодействию с ураном по нескольким механизмам (Karmanov et al., 2024).

Целью данного исследования была оценка защитных свойств лигнинов овса *Avena sativa* и родиолы розовой *Rhodiola rosea* при хроническом пероральном поступлении урана-238 в организм мелких млекопитающих.

Материалы

Исследования проводили на половозрелых самцах и самках мышей линии СВА из УНУ «Научная коллекция экспериментальных животных» Института биологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН (<http://www.ckp-rf.ru/usu/471933/>) в весенний период (апрель – май 2025 г.). Все манипуляции с мышами осуществляли в соответствии с требованиями директивы 2010/63/EU Европейского парламента о защите животных, используемых в научных целях (Directive 2010/63/EU, 2022). Протокол исследования рассмотрен и одобрен Комитетом по биоэтике Института биологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН (Протокол № 4 от 11 апреля 2024 г.).

Для проведения экспериментов выбрали лигнины, выделенные из стеблей овса (*Avena sativa*) и родиолы розовой (*Rhodiola rosea*), поскольку для этих биополимеров ранее нами были установлены высокая антиоксидантная активность и биомедицинский потенциал (Karmanov et al., 2023, 2024; Raskosha et al., 2024). Химическая характеристика образцов приведена в (Кочева и др., 2007). Растительный материал заготовлен в Ботаническом саду Института биологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН (г. Сыктывкар, Республика Коми). В работе применяли водорастворимую (гидратированную) форму лигнинов (Карманов и др., 2006), поскольку их растворимость в воде критически важна для биодоступности и усвояемости животными. Для этого лигнинсодержащее сырье обрабатывали водным диоксаном в присутствии соляной кислоты при температуре кипения с последующей обработкой диоксанлигнина

раствором щелочи до полного растворения, настаиванием щелочного раствора с катионитом до pH = 7. Вследствие таких химических манипуляций существенно повышалась растворимость лигнина, были получены лигнинные препараты, наиболее близкие по химической структуре и свойствам к нативному биополимеру. Растворы лигнинов животные получали перорально в концентрации 0.01 % в профилактическом режиме в течение 14 суток до употребления токсиканта.

Методы

Для оценки защитных свойств лигнинов в отношении урана было проведено три эксперимента на 230 половозрелых мышах линии СВА (масса тела на начало экспериментов 22–29 г). В первом эксперименте для предварительной оценки уровня бионакопления урана использовали самцов (45 особей, возраст 7–12 мес, $n = 9$ на каждую группу) с применением в качестве питья в течение 30 суток растворов нитрата уранила ($\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) с концентрациями – 4.29 мг/л (2.03 мг урана/л), 12.85 мг/л (6.1 мг урана/л) и 25.74 мг/л (12.2 мг урана/л) (опытные группы I, II и III соответственно) (табл. 1). Эти концентрации могут характеризоваться как высокие, поскольку они превышают на несколько порядков не только рекомендованные ВОЗ содержания урана в питьевых водах (0.015 мг/л), но и типичный диапазон его варьирования в природных поверхностных резервуарах мира (Guidelines..., 2022). Для приготовления растворов использовали гексагидрат нитрата уранила квалификации ХЧ. Контролем служили группы животных, употреблявших водопроводную воду (Сан-ПиН 1.2.3685-21) (группа «Контроль») или раствор лигнина (группа «Контроль 1»). Во втором эксперименте оценивали выживаемость животных обоего пола (120 животных, возраст 7–12 мес, $n = 10$ на каждую группу) в течение 30 суток при раздельном и сочетанном пероральном употреблении растворов лигнинов (0.01 %) в профилактическом режиме и нитрата уранила с концентрацией 25.74 мг/л (12.2 мг урана/л) (табл. 2). Согласно расчетам, суточное поступление урана-238 с питьем на особь составило 0.061 мг (2.4 мг/кг/сут), суммарное поступление за весь эксперимент составило 1.8 мг на особь (73 мг/кг массы тела). В третьем эксперименте оценивали различия показателей бионакопления урана в организме самцов и самок двух возрастных групп (65 особей, возраст 4–6 и 7–12 месяцев, $n = 6–9$ на каж-

дую группу), принимавших в течение 30 суток раствор с содержанием нитрата уранила 25.74 мг/л после предварительного 14-дневного приема лигнинов (табл. 3). Выбор возрастных групп основывался на различиях в метаболизме у животных разного возраста, что может влиять на процессы бионакопления тяжелых металлов и эффективность действия антидотов (Domingo et al., 1987).

Животных опытных и контрольных групп содержали в одинаковых условиях вивария в поликарбонатных клетках (размер 35 × 22 × 90 см; Tecniplast, Италия) при температуре 20–22 °С и влажности воздуха 40–55 %, при естественном освещении. Рацион питания мышей состоял из сбалансированных брикетированных кормов («Чара» ООО Фаворит, Россия), доступ к пище и воде, а также к исследуемым веществам был *ad libitum*.

Концентрацию урана в животных образцах определяли высокочувствительным люминесцентным методом на фотометре ЛЮФ-57 (Россия), в котором содержание урана оценивается путем сравнения интенсивности свечения счетного образца и внутренних, встроенных в конструкцию прибора, стандартных образцов, содержащих известное количество радиоактивного элемента. Измерение их люминесценции позволяет определить 10–11 г урана при ошибке не выше 15 %.

Статистический анализ данных по выживаемости животных проводили с применением программной среды R. Кривые выживаемости строили по методу Каплана – Майера с использованием пакета survival (Therneau, 2026). Показатели бионакопления урана представлены в таблицах как среднее значение и его ошибка ($X \pm SD$), а также указан диапазон значений (min – max). Данные проверяли на нормальность распределения с применением критерия Шапиро – Уилка. Для выявления статистически значимых различий между опытными и контрольными группами животных использовали непараметрический критерий Манна – Уитни. Статистически значимыми считались различия при $p \leq 0.05$.

Результаты

Оценка интенсивности бионакопления урана при потреблении животными растворов нитрата уранила с концентрациями 4.29, 12.87 и 25.74 мг/л (I, II и III опытные группы

соответственно) показала (см. табл. 1), что после 30 суток воздействия раствора с концентрацией 25.74 мг/л среднее содержание токсиканта в организме достигало 0.13 мг/кг массы тела. Это на 42 % больше, чем при употреблении животными раствора соли урана с концентрацией 12.87 мг/л. Также было установлено, что животные групп «Контроль» и «Контроль I», не получавшие с питьем уран, и особи опытной группы I, употреблявшей его из раствора с концентрацией 4.29 мг/л, по уровню среднего содержания радиоактивного элемента в организме не отличались друг от друга. В целом это подтвердило чистоту исходного сырья для получения лигнинов в отношении содержания урана, а также продемонстрировало, что интенсивность его аккумуляции животными из питьевых растворов имеет сложный характер. При увеличении концентрации радиоактивного элемента в питье поступательно возрастал абсолютный уровень его накопления в организме животных. При этом степень абсорбции урана была не прямо пропорциональна исходной концентрации раствора нитрата уранила. Так, при двукратном возрастании исходной концентрации нитрата уранила в питье от 12.87 до 25.74 мг/л его содержание в организме животных увеличивалось гораздо менее интенсивно.

Во втором эксперименте защитное профилактическое действие лигнинов, выделенных из овса и родиолы розовой, оценивали по показателям выживаемости (рис. 1) и общей смертности (см. табл. 2) самцов и самок мышей, употреблявших уран из растворов с концентрацией нитрата уранила 25.74 мг/л. Полученные данные продемонстрировали 100 % выживаемость животных разного пола, получавших в качестве питья растворы лигнинов. Употребление раствора нитрата уранила (III опытная группа) вызывало 50 % смертность самок, что было статистически значимо выше по сравнению с интактным контролем ($p = 0.005$), и 20 % смертность самцов. Предварительный прием растворов лигнинов на фоне урановой интоксикации повышал выживаемость животных, причем наиболее выраженный эффект наблюдали у самок; лигнин родиолы розовой снижал их смертность на 20 %, лигнин овса – на 30 %. У самцов оба лигнинных препарата были менее эффективны в отношении урана, снижая смертность на 10 %.

Таблица 1. Бионакопление урана половозрелыми самцами при пероральном хроническом поступлении растворов лигнина и нитрата уранила

Опытная группа	Условия эксперимента	Среднее содержание урана в сырой биомассе, мг/кг ($X \pm SD$)
Контроль	Водопроводная вода	0.0086 ± 0.0008
Контроль I	Лигнина родиолы розовой, 14 суток	0.0086 ± 0.0005
I	Раствор нитрата уранила 4.29 мг/л (2.03 мг урана/л), 30 суток	0.0095 ± 0.0008
II	Раствор нитрата уранила 12.87 мг/л (6.1 мг урана/л), 30 суток	0.092 ± 0.002
III	Раствор нитрата уранила 25.74 мг/л (12.2 мг урана/л), 30 суток	$0.130 \pm 0.002^*$

Примечание. В каждой группе по 9 особей. * – различия статистически значимы от контрольной группы при $p \leq 0.05$.

Таблица 2. Общая смертность мышей после употребления растворов лигнинов в профилактическом режиме (14 суток) и нитрата уранила с концентрацией 25.74 мг/л (30 суток)

Опытная группа	Условия эксперимента*	Пол животного	
		самки, %	самцы, %
III	Нитрат уранила	50	20
IV	Лигнин родиолы розовой + нитрат уранила	30	10
V	Лигнин овса + нитрат уранила	20	10

Примечание. В каждой группе по 10 особей. * – группы, в которых выживаемость особей составила 100 %, не приведены.

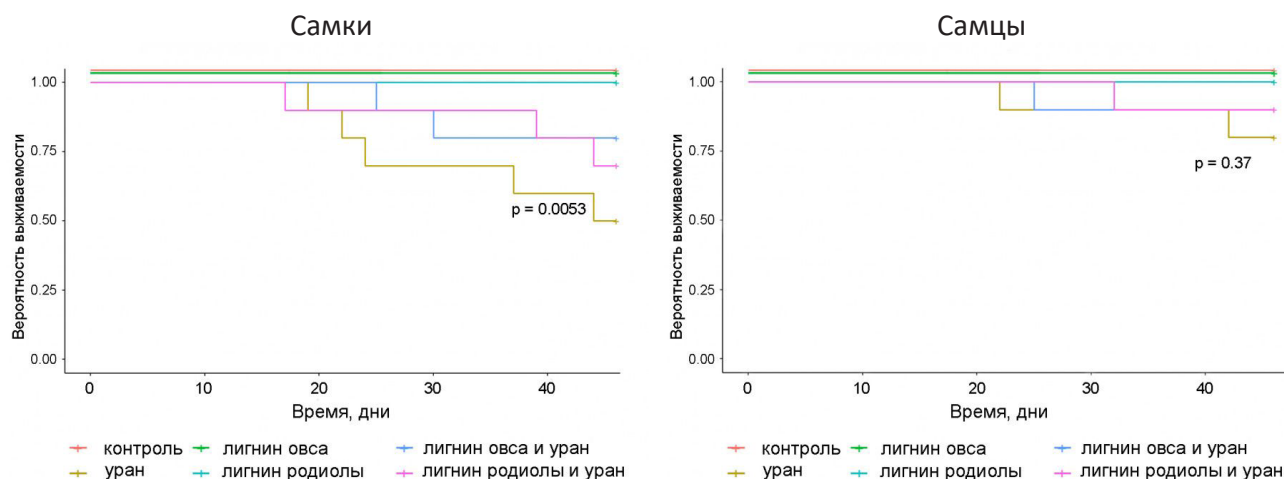


Рис. 1. Выживаемость самок (А) и самцов (Б) при раздельном и сочетанном употреблении растворов лигнинов и нитрата уранила с концентрацией 25.74 мг/л. В каждой группе по 10 особей

Fig. 1. Survival of females (A) and males (B) with separate and combined use of lignin and uranyl nitrate solutions with a concentration of 25.74 mg/l. There are 10 individuals in each group

Изучение защитного действия лигнинов на показатели бионакопления урана самками и самцами мышей разных возрастных групп (табл. 3) позволило установить, что после применения лигнина родиолы розовой содержание токсиканта в организме самок старшей возрастной группы, употреблявших раствор нитрата уранила, существенно

(более чем в 20 раз) уменьшалось. У самцов того же возраста лигнины проявляли защитные функции в меньшей степени. Так, среднее накопление урана вследствие профилактического приема лигнина овса снижалось на 10 % от максимально возможного уровня. Лигнин родиолы розовой не оказывал протекторное действие

на самцов старшей возрастной группы, т. к. средние концентрации радионуклида в их организме после употребления лигнинного препарата даже увеличивались (примерно на 30 %). У более молодых самок и самцов защитное действие лигнина в отношении аккумуляции урана также выявить не удалось. Важно отметить, что абсолютная величина содержания урана в организме молодых самок как при профилактическом

употреблении лигнинов, так и без них была значительно больше, чем у самок возраста свыше 7 месяцев. Так, для молодых самок она составляет в среднем 0.76 мг/кг в отсутствие профилактического приема лигнинов и 0.81 мг/кг – при употреблении лигнина родиолы розовой. В то же время для самок старшей возрастной группы средние значения этих показателей составляли около 0.19 мг/кг и 0.008 мг/кг соответственно.

Таблица 3. Содержание урана в организме мышей разного пола и возраста после употребления растворов лигнинов в профилактическом режиме (14 суток) и нитрата уранила с концентрацией 25.74 мг/л (30 суток)

Опытная группа	Пол животного	Условия эксперимента	Среднее содержание урана в сырой биомассе, мг/кг ($X \pm SD$)	Диапазон значений содержания урана в сырой биомассе, мг/кг (min – max)
Возраст животного – 7–12 месяцев				
III	Самки	Нитрат уранила	0.19 ± 0.01	0.17–0.21
IV		Лигнин родиолы розовой + нитрат уранила	$0.008 \pm 0.002^*$	0.006–0.010
III		Нитрат уранила	0.130 ± 0.002	0.120–0.140
IV	Самцы	Лигнин родиолы розовой + нитрат уранила	$0.171 \pm 0.008^*$	0.160–0.180
V		Лигнина овса + нитрат уранила	0.112 ± 0.020	0.10–0.140
Возраст животного – 4–6 месяцев				
III	Самки	Нитрат уранила	0.76 ± 0.03	0.70–0.82
IV		Лигнин родиолы розовой + нитрат уранила	0.81 ± 0.03	0.75–0.87
III	Самцы	Нитрат уранила	0.104 ± 0.003	0.094–0.112
IV		Лигнин родиолы розовой + нитрат уранила	0.12 ± 0.08	0.11–0.14
V		Лигнин овса + нитрат уранила	0.11 ± 0.01	0.10–0.13

Примечание. В каждой группе по 6–9 особей. * – различия статистически значимы от группы III при $p \leq 0.05$.

Предварительный прием лигнина овса самцами старшей возрастной группы снижал среднее накопление радиоактивного элемента с 0.130 мг/кг до 0.112 мг/кг биомассы, что составляло 14 % от исходного уровня (см. табл. 3). Однако полная защита организма животных от накопления урана при употреблении раствора биополимера все же не достигалась, и среднее содержание урана в биомассе половозрелых самцов возрастом до одного года оставалось статистически значимо более высоким ($p < 0.001$) по сравнению с вариантом «Контроль» на 31 % (см. табл. 1).

Обсуждение

На сегодняшний день долгосрочные последствия загрязнения природным ура-

ном для животных остаются до конца не изученными. Имеющиеся в литературе данные по этому вопросу немногочисленны (Grison et al., 2013), что затрудняет разработку эффективных стратегий защиты при хронической урановой интоксикации. В проведенном нами исследовании оценка интенсивности накопления урана в организме животных позволила выявить, что этот показатель значительно возрастает при употреблении более концентрированного раствора (25.74 мг/л). При этом увеличение накопления токсиканта в организме самцов не было прямо пропорциональным его концентрации в питьевом растворе, что может указывать на существование физиологических барьеров, ограничивающих поступление урана в организм особей. Однако даже небольшие

количества урана, преодолевшие эти барьеры, могут проявлять токсичность. Так, в работах (Garmash et al., 2014; Kudyasheva et al., 2021) показано, что ионы уранила увеличивают образование активных форм кислорода (перекиси водорода и гидроксильного радикала), и авторы связывают это преимущественно с их химической структурой, а не с радиоактивностью.

В нашем исследовании важным было установить, каким образом применяемые концентрации урана, а также пол и возраст мышей влияют на выживаемость животных на фоне профилактического приема лигнинов. Исходя из химических свойств лигнинов, можно предполагать механизм их защитного действия на организм мышей, связанный с хелатирующими свойствами метаболитов лигнина, о чем свидетельствуют успешные экспериментальные исследования с применением хелаторов урана (Du et al., 2024; Tan et al., 2024; Li et al., 2026). Из литературы известно, что применение некоторых из них смягчало токсическое воздействие урана на организм животных, в частности позволило полностью исключить смертность беременных самок в условиях экспериментального отравления ураном (Domingo, 2001). Наряду с этим протекторный эффект лигнинов при интоксикации мышей ураном может коррелировать с комплексообразующим потенциалом самого уранил-иона, участие которого в биологических процессах способно сдерживаться взаимодействием уранила с фосфат-ионами, боковыми функциональными группами белков и аминокислот (Гудков и др., 2014). Также возможно участие полифенолов, являющихся метаболитами природных лигнинов, в восстановлении урана со степенью окисления 6+, что обычно сопровождается снижением его подвижности и уменьшением возможности их биоаккумуляции в организмах животных.

Различия в протекторных свойствах исследованных биополимеров могут быть обусловлены не только их химическим взаимодействием с ураном, но и отличиями в физиологической чувствительности животных. Так, в работе (Bolt et al., 2018) на мышах было показано, что хотя основные места накопления урана (кости и почки) были одинаковыми для обоих полов, но наблюдались различия в доле урана, накапливающегося в этих органах: у самок большая часть урана обнаружена в почках, а у самцов – в костной ткани. В нашем исследовании, несмотря на одинаковое количество урана, поступившее

в организм особей обоего пола, более выраженный протекторный эффект лигнинов в отношении токсиканта наблюдался у самок: профилактическое употребление лигнинов овса и родиолы розовой снижало их смертность соответственно на 20 и 30 %, а смертность самцов – на 10 %. Однако и уровень накопления урана в организме самок был выше, чем у самцов. При уточнении закономерностей защитного действия лигнинов при накоплении урана в организме животных разного возраста выявлено, что наиболее эффективно эти свойства проявляются у самок старшей возрастной группы: профилактический прием раствора лигнина обеспечил примерно 20-кратное уменьшение содержания радионуклида в их организме. В этих же условиях накопление урана в организмах самцов обеих возрастных групп и более молодых самок статистически значимо не отличается от показателей животных, не принимавших лигнин. То, что протекторный эффект лигнинов проявился только у самок старшей возрастной группы, заслуживает внимания в свете ранее опубликованных данных о высокой сорбционной способности лигнинов в отношении стероидных гормонов – прогестерона и эстрадиола (Borisenkov et al., 2016), а также выдвинутой гипотезы о ключевой роли природных лигнинов в поддержании баланса половых гормонов у млекопитающих. Полученные результаты позволяют предположить, что выраженный защитный эффект лигнинов у самок старшей возрастной группы может быть связан не только с их прямым антидотным действием в отношении урана, но и с гормонально-опосредованными механизмами, что требует дальнейшего изучения.

Заключение

Таким образом, при хронической урановой интоксикации (12.2 мг урана/л) животных защитные свойства лигнинов установлены для самок старшей возрастной группы, что проявлялось в 20-кратном уменьшении содержания радионуклида в их организме и в снижении смертности после приема лигнинов родиолы розовой *Rhodiola rosea* на 20 %, овса *Avena sativa* – на 30 %. Полученные результаты открывают перспективы для разработки специализированных антидотных пищевых добавок с учетом половозрастных характеристик животных, а также могут быть полезными для дальнейшего углубленного изучения механизмов их детоксикации от радионуклидов.

Библиография

- Гудков С. В., Черников А. В., Брусков В. И. Химическая и радиационная токсичность урана // Российский химический журнал. 2014. Т. LVIII. № 3–4.
- Карманов А. П., Кочева Л. С., Борисенков М. Ф., Загирова С. В. Способ получения водорастворимого лигнина. Патент № 227099. 2006 .
- Кочева Л. С., Борисенков М. Ф., Карманов А. П., Загирова С. В. Средство на основе лигнина, обладающее антиоксидантной активностью. Патент № 2292896. 2007 .
- Barapatre A., Meena A. S., Mekala S., Das A., Jha H. In vitro evaluation of antioxidant and cytotoxic activities of lignin fractions extracted from *Acacia nilotica* // *Int J Biol Macromol*. 2016. Vol. 86. P. 443–453.
- Bolt A. M., Medina S., Lauer F. T., Xu H., Ali A.-M., Liu K. J., et al. Minimal uranium accumulation in lymphoid tissues following an oral 60-day uranyl acetate exposure in male and female C57BL/6J mice // *PLoS ONE*. 2018. Vol. 13. No 10. P. e0205211. DOI: 10.1371/journal.pone.0205211
- Borisenkov M. F., Karmanov A. P., Kocheva L. S., Markov P. A., Istomina E. I., Bakutova L. A., Litvinets S. G., Martinson E. A., Durnev E. A., Vityazev F. A., Popov S. V. Adsorption of β -glucuronidase and estrogens on pectin/lignin hydrogel particles on pectin/lignin hydrogel particles // *Int J Polym Mater Polym Biomater*. 2016. Vol. 65. No 9. P. 433–441. DOI: 10.1080/00914037.2015.1129955
- Cao Y., Wang Z., Song W., Liu Y., Zhao Q., Li W., Zheng C., Li W., Chen Z., Zhu L., Duan T., Li X. *Perilla frutescens*: a new strategy for uranium decorporation // *Chemosphere*. 2024. Vol. 350. P. 141066. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2023.141066
- Domingo J. L. Reproductive and developmental toxicity of natural and depleted uranium: A review // *Reprod Toxicol*. 2001. Vol. 15. P. 603–609.
- Domingo J. L., Llobet J. M., Tomas J. M., Corbella J. Acute toxicity of uranium in rats and mice // *Bull Environ Contam Toxicol*. 1987. Vol. 39. P. 168–74.
- Du Z., Huang X., Wu Z., Gao M., Li R., Luo S. A Mitochondria-Targeted Heptamethine Indocyanine Small Molecular Chelator for Attenuating Uranium Nephrotoxicity // *Pharmaceuticals (Basel)*. 2024. Vol. 17. No 8. P. 995. DOI: 10.3390/ph17080995
- Frelon S., Houpert P., Lepetit D., Paquet F. The Chemical Speciation of Uranium in Water Does Not Influence Its Absorption from the Gastrointestinal Tract of Rats // *Chem Res Toxicol*. 2005. Vol. 18. P. 1150–1154.
- Garmash S. A., Smirnova V. S., Karp O. E. et al. Pro-oxidative, genotoxic and cytotoxic properties of uranyl ions // *J Environ Radioact*. 2014. Vol. 127. P. 163–170. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2012.12.009
- Grisson S., Favé G., Maillot M. et al. Metabolomics identifies a biological response to chronic low-dose natural uranium contamination in urine samples // *Metabolomics*. 2013. Vol. 9. P. 1168–1180. DOI: 10.1007/s11306-013-0544-7
- Guidelines for drinking-water quality: fourth edition incorporating the first and second addenda / World Health Organization (WHO). Geneva (Switzerland): WHO, 2022. 614 p.
- Hasegawa Y., Kadota Y., Hasegawa C., Kawiminami S. Lignosulfonic acid-induced inhibition of intestinal glucose absorption // *J Nutr Sci Vitaminol*. 2015. Vol. 61. P. 449–454.
- Houpert P., Lestaev P., Bussy C., Paquet F., Gourmelon P. Enriched but not depleted uranium affects central nervous system in long-term exposed rat // *Neurotoxicology*. 2005. Vol. 26. P. 1015–1020.
- Karmanov A. P., Ermakova A. V., Raskosha O. V. et al. Structure and Biomedical Properties of Lignins (A Review) // *Russ J Bioorg Chem*. 2024. Vol. 50. No 7. P. 2657–2674.
- Karmanov A. П., Kocheva L. S., Raskosha O. V., Moskalev A. A. Investigation of the structure and properties of lignins of some agricultural plants // *Biocatal Agric Biotechnol*. 2023. Vol. 53. P. 102848. DOI: 10.1016/j.bcab.2023.102848
- Konietzka R. Gastrointestinal absorption of uranium compounds (A review) // *Regul Toxicol Pharmacol*. 2015. Vol. 71. No 1. P. 125–133. DOI: 10.1016/j.yrtph.2014.08.012
- Kudyasheva A. G., Zagorskaya N. G., Raskosha O. V., Shishkina L. N. Regulation of the Oxidative Processes in the Organs of Mice under the Effects of Chemical and Physical Factors at Low Doses // *Biophysics*. 2021. Vol. 66. No. 4. P. 629–636. DOI: 10.1134/S0006350921040102
- Li J., Li W., Huang F., Wang Q., Liu H., Chen L., Wang Qi., Li Y., Fu S., Zhao Y., Ran Y., Hao Y. Recent advances in therapeutic agents for uranium poisoning: a comprehensive review // *Biometals*. 2026. Vol. 39. P. 1399–1420. DOI: 10.1007/s10534-026-00848-0
- Raskosha O., Karmanov A., Ermakova A., Bashlykova L., Pylina Y., Starobor N., Bodnar I., Rasova E., Kocheva L. Evaluation of safety and biomedical potential of water-soluble oat lignin *Avena sativa* L. // *Int J Biol Macromol*. 2024. Vol. 283. P. 137609. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2024.137609
- Sheppard S. C., Sheppard M. I. Derivation of ecotoxicity thresholds for uranium // *J Environ Radioact*. 2005. Vol. 79. P. 55–83.
- Tan X., Yu L., Liao X., Chen C., Chu J., Xiong Z., Xia B., Tang W., Li X., Liu Y. A low-toxicity uranyl-selective-binding linear pentapeptide sequence as a potential uranium decorporation agent // *RSC Adv*. 2024. Vol. 14. No 53. P. 39094–39101. DOI: 10.1039/d4ra06173j

- Therneau T. A Package for Survival Analysis in R. R package version 3.8-12. 2026. URL: <https://CRAN.R-project.org/package=survival> (дата обращения: 12.05.2026).
- Tracy B. L., Quinn J. M., Lahey J., Gilman A. P., Mancuso K., Yagminas A. P., Villeneuve D. C. Absorption and retention of uranium from drinking water by rats and rabbits // Health Physics. 1992. Vol. 62. No 1. P. 65–73.
- Vinardell M. P., Mitjans M. Lignins and Their Derivatives with Beneficial Effects on Human Health // Int J Mol Sci. 2017. Vol. 18. No 6. P. 1–15.
- Wang Z., Jiang Y., Li X., Wu L., Chen G., Liu Y., Tang K., Chen Z., Luo C., Chen Z., Li X., Zhu L., Duan T. Polyphenolic polymers for uranium decorporation with radiation protection effect // J Hazard Mater. 2026. Vol. 1. P. 142442. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2026.142442

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-13-00196-П, <https://rscf.ru/project/22-13-00196/> (<https://rscf.ru/project/22-13-00196/>). Авторы благодарят сотрудников вивария Института биологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН за качественный уход за животными и помощь при наблюдении за ними во время экспериментов.

ASSESSMENT OF THE PROTECTIVE PROPERTIES OF LIGNINS DURING CHRONIC INTAKE OF URANIUM INTO THE BODY OF SMALL MAMMALS

RASKOSHA

Oksana Veniaminovna

PhD, Institute of Biology of Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (IB FRC Komi SC UB RAS), 28, Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Komi Republic, 167982, Russia, raskosha@ib.komisc.ru

RACHKOVA

Natalia Gelievna

PhD, Institute of Biology of Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (IB FRC Komi SC UB RAS), 28, Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Komi Republic, 167982, Russia, rachkova@ib.komisc.ru

KARMANOV

Anatoliy Petrovich

DSc, Institute of Biology of Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (IB FRC Komi SC UB RAS), 28, Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Komi Republic, 167982, Russia, apk0948@ib.komisc.ru

KOCHEVA

Lyudmila Sergeevna

DSc, Institute of Biology of Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (IB FRC Komi SC UB RAS), 54, Pervomayskaya St., Syktyvkar, Komi Republic, 167982, Russia, lskocheva@geo.komisc.ru

Key words:

uranium
Avena sativa
Rhodiola rosea
small mammals
bioaccumulation
survival
protective effect

Summary:

The article evaluates the protective properties of lignins obtained from the culms of oat (*Avena sativa*) and roseroot (*Rhodiola rosea*) during chronic oral intake of uranium-238 in mice weighing 22-27 grams at the beginning of the experiment. The animals received solutions of uranyl nitrate with uranium concentrations of 2.03, 6.1, and 12.2 mg/L for 30 days. It was shown that uranium accumulation in the body of mice increased disproportionately to its concentration, which may indicate the existence of physiological barriers to the accumulation of radionuclide. After prophylactic administration of lignin solutions as antidotes to uranium bioaccumulation (12.2 mg/L), the mortality of mice decreased: in females – by 20 % (roseroot lignin) and 30 % (oat lignin); in males – by 10 % (both lignins). The protective effect (a 20-fold decrease in uranium content) was recorded in the body of females of the old age group (7–12 months), whereas in males of the same age and in younger (4-6 months) individuals of both sexes, the barrier properties of lignins were not manifested. The obtained results open up prospects for development of specialized antidotal food additives taking into account the age and sex characteristics of animals, and may also be useful for further in-depth study of the mechanisms of detoxification of organisms from radionuclides.

Received on: 05 June 2026

Published on: 29 September 2026

References

- Barapatre A., Meena A. S., Mekala S., Das A., Jha H. In vitro evaluation of antioxidant and cytotoxic activities of lignin fractions extracted from *Acacia nilotica*, *Int J Biol Macromol.* 2016. Vol. 86. P. 443–453.
- Bolt A. M., Medina S., Lauer F. T., Xu H., Ali A. M., Liu K. J., et al. Minimal uranium accumulation in lymphoid tissues following an oral 60-day uranyl acetate exposure in male and female C57BL/6J mice, *PLoS ONE.* 2018. Vol. 13. No 10. P. e0205211. DOI: 10.1371/journal.pone.0205211
- Borisenkov M. F., Karmanov A. P., Kocheva L. S., Markov P. A., Istomina E. I., Bakutova L. A., Litvinets S. G., Martinson E. A., Durnev E. A., Vityazev F. A., Popov S. V. Adsorption of β -glucuronidase and estrogens on pectin/lignin hydrogel particles on pectin/lignin hydrogel particles, *Int J Polym Mater Polym Biomater.* 2016. Vol. 65. No 9. P. 433–441. DOI: 10.1080/00914037.2015.1129955
- Cao Y., Wang Z., Song W., Liu Y., Zhao Q., Li W., Zheng C., Li W., Chen Z., Zhu L., Duan T., Li X. *Perilla frutescens*: a new strategy for uranium decorporation, *Chemosphere.* 2024. Vol. 350. P. 141066. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2023.141066
- Domingo J. L. Reproductive and developmental toxicity of natural and depleted uranium: A review, *Reprod*

- Toxicol. 2001. Vol. 15. P. 603–609.
- Domingo J. L., Llobet J. M., Tomas J. M., Corbella J. Acute toxicity of uranium in rats and mice, *Bull Environ Contam Toxicol*. 1987. Vol. 39. P. 168–74.
- Du Z., Huang X., Wu Z., Gao M., Li R., Luo S. A Mitochondria-Targeted Heptamethine Indocyanine Small Molecular Chelator for Attenuating Uranium Nephrotoxicity, *Pharmaceuticals (Basel)*. 2024. Vol. 17. No 8. P. 995. DOI: 10.3390/ph17080995
- Frelon S., Houpert P., Lepetit D., Paquet F. The Chemical Speciation of Uranium in Water Does Not Influence Its Absorption from the Gastrointestinal Tract of Rats, *Chem Res Toxicol*. 2005. Vol. 18. P. 1150–1154.
- Garmash S. A., Smirnova V. S., Karp O. E. et al. Pro-oxidative, genotoxic and cytotoxic properties of uranyl ions, *J Environ Radioact*. 2014. Vol. 127. P. 163–170. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2012.12.009
- Grisson S., Favé G., Maillot M. et al. Metabolomics identifies a biological response to chronic low-dose natural uranium contamination in urine samples, *Metabolomics*. 2013. Vol. 9. P. 1168–1180. DOI: 10.1007/s11306-013-0544-7
- Gudkov S. V. Chernikov A. V. Bruskov V. I. Chemical and radiation toxicity of uranium, *Rossiyskiy himicheskiy zhurnal*. 2014. T. LVIII. No. 3–4.
- Guidelines for drinking-water quality: fourth edition incorporating the first and second addenda, World Health Organization (WHO). Geneva (Switzerland): WHO, 2022. 614 p.
- Hasegawa Y., Kadota Y., Hasegawa C., Kawiminami S. Lignosulfonic acid-induced inhibition of intestinal glucose absorption, *J Nutr Sci Vitaminol*. 2015. Vol. 61. P. 449–454.
- Houpert P., Lestaevel P., Bussy C., Paquet F., Gourmelon P. Enriched but not depleted uranium affects central nervous system in long-term exposed rat, *Neurotoxicology*. 2005. Vol. 26. P. 1015–1020.
- Karmanov A. P. Kocheva L. S. Borisenkov M. F. Zagirova S. V. Method for producing water-soluble lignin. Patent No 2270992006. 2006.
- Karmanov A. P., Ermakova A. V., Raskosha O. V. et al. Structure and Biomedical Properties of Lignins (A Review), *Russ J Bioorg Chem*. 2024. Vol. 50. No 7. P. 2657–2674.
- Karmanov A. P., Kocheva L. S., Raskosha O. V., Moskalev A. A. Investigation of the structure and properties of lignins of some agricultural plants, *Biocatal Agric Biotechnol*. 2023. Vol. 53. P. 102848. DOI: 10.1016/j.bcab.2023.102848
- Kocheva L. S. Borisenkov M. F. Karmanov A. P. Zagirova S. V. A lignin-based product with antioxidant activity. Patent No 2292896. 2007.
- Konietzka R. Gastrointestinal absorption of uranium compounds (A review), *Regul Toxicol Pharmacol*. 2015. Vol. 71. No 1. P. 125–133. DOI: 10.1016/j.yrtph.2014.08.012
- Kudyasheva A. G., Zagorskaya N. G., Raskosha O. V., Shishkina L. N. Regulation of the Oxidative Processes in the Organs of Mice under the Effects of Chemical and Physical Factors at Low Doses, *Biophysics*. 2021. Vol. 66. No. 4. P. 629–636. DOI: 10.1134/S0006350921040102
- Li J., Li W., Huang F., Wang Q., Liu H., Chen L., Wang Qi., Li Y., Fu S., Zhao Y., Ran Y., Hao Y. Recent advances in therapeutic agents for uranium poisoning: a comprehensive review, *Biometals*. 2026. Vol. 39. P. 1399–1420. DOI: 10.1007/s10534-026-00848-0
- Raskosha O., Karmanov A., Ermakova A., Bashlykova L., Pylina Y., Starobor N., Bodnar I., Rasova E., Kocheva L. Evaluation of safety and biomedical potential of water-soluble oat lignin *Avena sativa* L., *Int J Biol Macromol*. 2024. Vol. 283. P. 137609. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2024.137609
- Sheppard S. C., Sheppard M. I. Derivation of ecotoxicity thresholds for uranium, *J Environ Radioact*. 2005. Vol. 79. P. 55–83.
- Tan X., Yu L., Liao X., Chen C., Chu J., Xiong Z., Xia B., Tang W., Li X., Liu Y. A low-toxicity uranyl-selective-binding linear pentapeptide sequence as a potential uranium decorporation agent, *RSC Adv*. 2024. Vol. 14. No 53. P. 39094–39101. DOI: 10.1039/d4ra06173j
- Therneau T. A Package for Survival Analysis in R. R package version 3.8-12. 2026. URL: <https://CRAN.R-project.org/package=survival> (data obrascheniya: 12.05.2026).
- Tracy B. L., Quinn J. M., Lahey J., Gilman A. P., Mancuso K., Yagminas A. P., Villeneuve D. C. Absorption and retention of uranium from drinking water by rats and rabbits, *Health Physics*. 1992. Vol. 62. No 1. P. 65–73.
- Vinardell M. P., Mitjans M. Lignins and Their Derivatives with Beneficial Effects on Human Health, *Int J Mol Sci*. 2017. Vol. 18. No 6. P. 1–15.
- Wang Z., Jiang Y., Li X., Wu L., Chen G., Liu Y., Tang K., Chen Z., Luo C., Chen Z., Li X., Zhu L., Duan T. Polyphenolic polymers for uranium decorporation with radiation protection effect, *J Hazard Mater*. 2026. Vol. 1. P. 142442. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2026.142442