

УДК 582.52:581.4:547.458.82

## ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИОПРОТЕКТОРНЫХ СВОЙСТВ ЛИГНИНА В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ ОСТРОГО ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ НА РЯСКУ МАЛУЮ *LEMNA MINOR* L.

© И.С. Боднар<sup>1</sup>, О.В. Раскоша<sup>1</sup>, А.П. Карманов<sup>1\*</sup>, Л.С. Кочева<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт биологии ФИЦ Коми научного центра УрО РАН,  
ул. Коммунистическая, 28, Сыктывкар, 167982, Россия, [ark0948@yandex.ru](mailto:ark0948@yandex.ru)

<sup>2</sup> Институт геологии ФИЦ Коми научного центра УрО РАН,  
ул. Первомайская, 54, Сыктывкар, 167982, Россия

Работа посвящена проблеме защиты растительных организмов от острого гамма-излучения. В качестве объекта исследования было выбрано водное растение ряска малая (*Lemna minor* L.), которую подвергали облучению в дозах до 63 Гр. В качестве радиопротекторного средства был апробирован лигнин багульника болотного (*Ledum palustre* L.). В ходе экспериментов установлены значения биомаркеров благополучия растений и показано, что водорастворимый лигнин багульника не токсичен для растительных организмов. Установлено, что предварительное культивирование растений в водных лигнинсодержащих средах позволяет снизить уровень повреждений и увеличить длину корней облученных растительных организмов, что свидетельствует о проявлении адаптогенных и радиопротекторных свойств лигнина на организменном и популяционном уровне. Выдвинута гипотеза о радиопротекторном потенциале лигнина и экспериментально показана возможность использования экзогенного лигнина для защиты растительных организмов от острого гамма-излучения в высоких дозах.

*Ключевые слова:* ряска малая, гамма-излучение, лигнин, радиопротекторные свойства.

---

**Для цитирования:** Боднар И.С., Раскоша О.В., Карманов А.П., Кочева Л.С. Исследование радиопротекторных свойств лигнина в условиях воздействия острого гамма-излучения на ряску малую *Lemna minor* L. // Химия растительного сырья. 2024. №2. С. 99–108. DOI: 10.14258/jcprm.20240212979.

---

### *Введение*

Лигнин – это один из самых распространенных и удивительных биополимеров в растительном царстве. Замечательной особенностью лигнинов как полимеров является многообразие мономерных звеньев и межмономерных связей. Других биополимеров с подобной спецификой в природе не существует. Неудивительно, что химическая структура лигнина окончательно не установлена, и исследования в этом направлении продолжают [1]. Лигнин входит в состав всех высших растений, а также некоторых мхов и водорослей [2], выполняя целый спектр биологических функций [3]. В частности, природный, т.е. эндогенный лигнин способствует укреплению клеточной стенки, облегчает перенос воды и обеспечивает высокую устойчивость к повреждениям растительной ткани [4, 5]. Как известно, на растения действуют многочисленные неблагоприятные факторы, различные по своей природе, и во многих случаях лигнин, как природный адаптоген, повышает жизнестойкость растительных организмов [6]. Например, при инфицировании патогенами лигнин быстро накапливается в растительной ткани и действует как механический барьер, пространственно ограничивая распространение патогенов и гибель клеток [7, 8]. Ультрафиолетовое облучение (УФ-В) также стимулирует биосинтез лигнина, что приводит к формированию более толстых клеточных стенок с повышенным содержанием лигнина, как это наблюдается у *Kalanchoe pinnata* [9]. Получены также новые данные о том, что и вполне безобидные, на первый взгляд, абиотические стрессы, такие как температурные перепады, также изменяют степень лигнификации растительных тканей. Согласно [10], дефицит воды во время засухи

---

\* Автор, с которым следует вести переписку.

вызывает осмотический стресс, направленный на повышение интенсивности биосинтеза лигнина в этот период. Следует отметить, что имитация засухи в экспериментах с *Eucalyptus urograndis* привела не только к увеличению степени лигнификации ствольной части деревьев, но и к изменению структуры лигнина. Недавние результаты исследований «озонового» и радиационного стресса показали, что химическая структура лигнинного полимера в значительной степени зависит как от типа стресса, так и от его интенсивности и вида растения [11, 12].

Это свидетельствует об уникальности лигнинных биополимеров, выполняющих защитные функции различными путями и алгоритмами. Этот факт позволяет задуматься над вопросом: если эндогенный лигнин обладает способностью противостоять негативным стресс-факторам, то, возможно, и внесенный извне, то есть экзогенный лигнин, способен выполнять защитные функции? Если это предположение получит подтверждение, то это позволит обеспечить в необходимых условиях более эффективную защиту растений в самых разных, в том числе специфических условиях произрастания, например, на долговременных орбитальных станциях.

Живые организмы находятся под постоянным воздействием радиационного фактора. Во многих странах имеются техногенные источники радиации, в том числе атомные электростанции, предприятия по добыче радиоактивных руд, хранилища отходов объектов ядерно-топливного цикла. Риск облучения избыточными дозами радиации возрастает при возникновении неконтролируемых ситуаций и техногенных аварий на атомных производствах. Защита растений от вредного радиационного воздействия актуальна в связи с развитием космической биологии, а также при фиторемедиации радиоактивно загрязненных территорий.

В мониторинге и рекультивации загрязненных водоемов, в экотоксикологических экспериментах часто используют покрытосеменные растения семейства рясковые. Представители данного семейства выполняют важные экологические функции, широко распространены и очень чувствительны к органическим и неорганическим веществам, в том числе гербицидам, фармацевтическим препаратам и металлам [13, 14]. Ряска способна сорбировать тяжелые металлы и радионуклиды, что является необходимым условием для фиторемедиации водоемов.

Биомедицинские свойства лигнина активно изучаются в последние годы. Практически все исследования проводятся на животных, причем уже получены вполне обнадеживающие и достоверные результаты, тогда как применение экзогенного лигнина в качестве адаптогена для защиты растений от стрессоров в настоящее время не изучено. В данной работе впервые проанализирована возможность использования экзогенного лигнина для защиты растительных организмов от острого гамма-излучения.

### **Материал и методы**

*Растительный материал.* В работе использовали лабораторную культуру ряски малой *Lemna minor* L. Растения выращивали в среде Штейнберга (Steinberg 1946) при постоянных условиях ( $24 \pm 0.1$  °C, 16 ч свет/8 ч темнота), поддерживаемых в климатической камере (Binder, Germany).

*Тест на токсичность лигнина.* Для проведения теста на токсичность лигнина использовали стандартную методику OECD [15]. В качестве контрольных растений использовали лабораторную культуру ряски малой, выращенную на среде Штейнберга. Для экспериментов на токсичность были приготовлены водные растворы лигнина багульника с массовой долей  $10^{-6}$ ,  $2.5 \cdot 10^{-6}$ ,  $5 \cdot 10^{-6}$ ,  $10^{-5}$ ,  $2 \cdot 10^{-5}$ ,  $10^{-4}$ ,  $10^{-3}$ %. Испытуемые растения помещали в водную среду, содержащую лигнин, и выдерживали в ней в течение 24 ч. Затем переносили в стеклянные емкости с 200 мл среды по 12 растений в каждую. Через 7 дней подсчитывали число отдельных особей. Удельная скорость роста растений рассчитывалась как логарифмическое изменение скорости роста за семь дней. Результаты теста достоверны при средней удельной скорости роста  $0.275$  день<sup>-1</sup>. Для расчета площади использовали фотографии растений в первый и последний день эксперимента. Их анализировали с использованием программного обеспечения Image J (NIH, USA). Площадь фрондов растений определяли в каждой стеклянной емкости. Первоначальная средняя площадь у опытных и контрольных растений была одинаковой.

*Облучение растений.* Облучение растений проводили на гамма-установке «Исследователь» (<sup>137</sup>Cs) Института биологии ФИЦ Коми НЦ УРО РАН, мощность 0.74 Гр/мин. Перед облучением испытуемые растения предварительно выдерживали в течение 24 ч в водном растворе лигнина багульника. Для оценки био-

логических эффектов воздействия гамма-излучения были выбраны дозы 18, 42, 63 Гр. Обоснованность выбора указанных доз показана в работе [16]. В качестве контрольных в данном случае использовали облученные растения, не обработанные раствором лигнина.

*Определение малонового диальдегида (МДА).* Для анализа 50 мг сырой массы лабораторной культуры ряски малой растирали с кварцевым песком, добавляли 1.5 мл 20% трихлоруксусной кислоты, центрифугировали 15 мин при 10000 об./мин. К супернатанту добавляли 0.5% тиобарбитуровую кислоту, растворенную в 20% трихлоруксусной кислоте. Полученную смесь выдерживали при 95 °С 30 мин, охлаждали и центрифугировали. Далее определяли оптическую плотность при длине волн 532 и 600 нм на спектрофотометре Spectrumlab SS2107 (LEKI Instruments, Finland). Содержание МДА вычисляли по формуле [17, 18]. Содержание МДА определяли через четверо суток после начала эксперимента.

*Определение хлорофиллов a, b, каротиноидов.* Для определения уровня фотоассимилирующих пигментов растения перетирали с небольшим количеством кварцевого песка, карбоната кальция, затем добавляли 95% водный раствора этанола, выдерживали 30 мин при температуре 4 °С. Полученный гомогенат центрифугировали 10 мин при 13000 об./мин. Экстракт сливали в чистую пробирку. К осадку добавляли раствор этанола и снова центрифугировали. Повторяли до серой окраски осадка. Оптическую плотность проб измеряли при длинах волн 470, 649, 664 нм на спектрофотометре Spectrumlab SS2107 (LEKI Instruments, Finland). Концентрацию пигментов рассчитывали по [19].

*Получение и характеристика лигнина.* В экспериментах использовали диоксанлигнин, выделенный из стеблей багульника болотного (*Ledum palustre* L.). Сырье заготавливали в лесном массиве в районе с. Морово, Республика Коми (координаты: 61°50' с.ш.; 50°61' в.д. в конце вегетационного периода. Препарат лигнина получали методом Пеппера путем обработки обессмоленного растительного сырья водно-диоксановой смесью (9 : 1) при температуре кипения (~100 °С) в течение 1 ч. Очистку лигнина проводили двукратным переосаждением из диоксана в диэтиловый эфир. Для получения готового препарата использовали метод лиофильной сушки. Приготовление водорастворимой формы образца лигнина проводили в соответствии с методикой, описанной в патенте РФ [20].

Элементный анализ препарата лигнина багульника проводили на анализаторе фирмы Hewlett Packard (США). Определено: С – 59.4±1.6; Н – 6.4±0.6, О – 34.2.

Для количественной оценки функциональных групп использовали стандартные методы химии древесины [21]. Определено: ОН<sub>фен.</sub> 3.9±0.1%, СООН 3.5±0.2%.

Анализ мономерного состава лигнина проводили методом пиролитической хромато-масс-спектрометрии на приборе EGA/PY-3030D (Japan); Определено: гваяцильные (G) единицы – 22.2%, сиригильные (S) – 77.7%, *n*-кумаровые (H) – 0.1%.

Спектры ЯМР-<sup>13</sup>C регистрировали в импульсном режиме (спектрометр Bruker AM-300) с рабочей частотой 75.5 МГц. Установлены следующие резонансные сигналы спектра ЯМР-<sup>13</sup>C: 29.4 (СН алифатические); 54.2 (С<sub>б</sub> в b-5 и (или) b-b); 56.4 (Ar–OCH<sub>3</sub> G и S); 60.0, 60.6, 66.8 (С<sub>g</sub> в b-O-4, G и S); 72.7, 73.5 (С<sub>a</sub> в b-O-4, G и S); 85.6, 86.5 (С<sub>β</sub> в b-O-4); 104.8 (C-2 и C-6 в S; 115.2, (C-5 в G и G'); 134.9, 135.4, 138.6 (C-1 и C-4 в S и G); 147.9, 148.4 (C-3 и C-4 в G); 152.6 (C-3 и C-5 в S) м.д.

Инфракрасные спектры образца лигнина записаны на спектрофотометре IRPrestige-21 Shimadzu (Япония), оснащенном детектором DLATGS. Установлены следующие полосы поглощения ИК-Фурье-спектра: 3466, 2934, 2850, 1724, 1672, 1593, 1504, 1462, 1421, 1327, 1270, 1225, 1124, 1033, 835 см<sup>-1</sup>.

Спектры ЭПР получены на радиоспектрометре X-диапазона RadioPAN SE/X-2547. Частота ВЧ модуляции 100 кГц, амплитуда 0.1 мТ, мощность СВЧ (2 мВт). Установлено: g-фактор 2.0042, концентрация радикалов 2.7 · 10<sup>17</sup> спин/г.

*Статистическая обработка.* Нормальность распределения проверяли с использованием теста Шапиро-Уилка. Для достоверного определения отличий между группами воздействия использовали критерии Стьюдента, Манна-Уитни. Все эксперименты проводили в 3 повторностях. Для статистической обработки результатов использовали программный пакет Statistica 6.0 (StatSoft, USA).

### Результаты и их обсуждение

Ряска малая *Lemna minor* L. (далее ряска) – неукорененный плейстофит, свободно плавающий на поверхности водоемов. Растение состоит из листовидной пластинки (фронда) и корня. Несколько растений собираются в колонии по 2–5 особей посредством тонкого выроста мембраны – гиалиновой нити. Ряска малая чаще всего размножается вегетативно, что позволяет использовать на протяжении всего эксперимента генетически однородную популяцию [22]. В лабораторных условиях ряска хорошо культивируется на питательных средах, быстро растет и размножается, поэтому это растение находит широкое применение как модельный объект в биотестировании.

На рисунке 1 представлены результаты изучения скорости роста ряски в рамках проведения тестов на токсичность экзогенного лигнина. Предварительное культивирование растений в водных средах с концентрациями лигнина в области  $10^{-6}$ – $10^{-3}$ % в течение 24 ч не оказывало негативного действия на основные жизненные процессы лабораторной культуры ряски, о чем свидетельствует практическое совпадение величины удельной скорости роста контрольных и опытных растительных организмов. Поврежденность фрондов не превышала 2%, что согласуется с результатами, полученными для контрольных растений.

В таблице представлены результаты оценки количества таких пигментов фотосинтеза, как хлорофилл *a*, хлорофилл *b* и каротиноиды в растениях. Близость результатов по содержанию указанных пигментов в контрольных и опытных растениях ряски также указывала на отсутствие токсического действия водорастворимого лигнина.

На следующем этапе были проведены исследования по оценке потенциальных радиопротекторных свойств экзогенного лигнина. Наше предположение (гипотеза) о возможном наличии таких свойств базируется на полученных нами ранее результатах, свидетельствующих о высокой антиоксидантной и биологической активности лигнинов [23, 24].

Как следует из рисунка 2, облучение контрольных (не обработанных лигнином) растений приводило к дозозависимому линейному снижению удельной скорости роста этих организмов. Так, при дозе облучения 18 Гр удельная скорость роста ряски уменьшилась практически на 10% относительно необлученных растений, а при дозе 63 Гр она уменьшилась вдвое. Как показали исследования, скорость роста ряски, предварительно выдержанной в водном растворе лигнина (концентрация лигнина  $10^{-5}$ %), а затем облученной в различных дозах, оказалась практически одинаковой с контрольными растениями (рис. 2). Отличие наблюдалось только при дозе гамма-излучения 42 Гр.

Полученные результаты показали, что экзогенный лигнин в выбранной концентрации не оказал влияния на темпы роста растений. Вместе с тем это не означает отсутствие адаптогенных (радиопротекторных) свойств лигнина. Дальнейшие эксперименты по оценке других аспектов жизнедеятельности облученных растений свидетельствовали о положительном влиянии экзогенного лигнина на организменном и популяционном (или надорганизменном) уровнях.

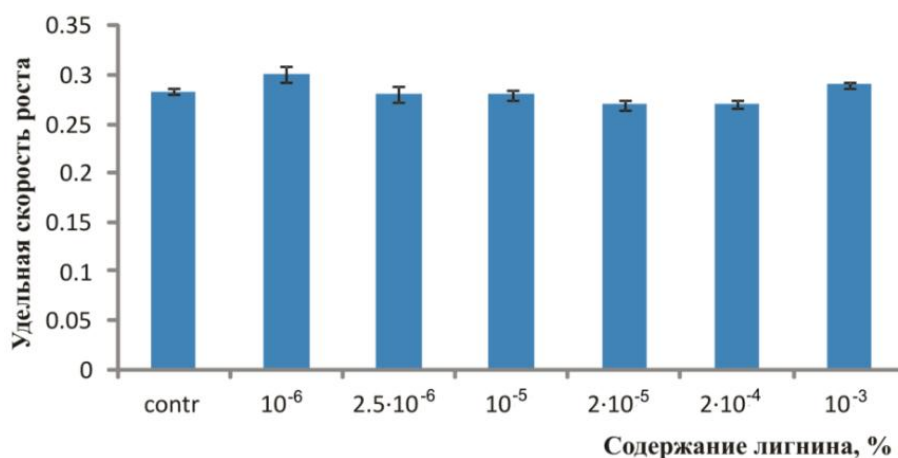


Рис. 1. Изменение удельной скорости роста растений (день<sup>-1</sup>) в зависимости от содержания лигнина в водном растворе

Количество фотосинтетических пигментов и МДА в растениях *Lemna minor* L.

Эксперимент	Хлорофилл <i>a</i> *	Хлорофилл <i>b</i> *	Каротиноиды*	МДА**
Контроль	0.85±0.4	0.37±0.09	0.2±0.08	9.57±0.9
Обработка водорастворимым лигнином (1·10 <sup>-5</sup> %)	0.88±0.1	0.37±0.02	0.2±0.09	11.25±1.2

\* мг/г сырой массы, \*\* нмоль/г сырой массы.

На рисунке 3 приведены медианные значения уровня повреждений фрондов у облученных растений без обработки и с предварительной обработкой водным раствором лигнина. Повреждения фрондов оценивались количеством выявленных некрозов и хлорозов. Как известно, хлорозы вызывают обесцвечивание растений с частичным или полным пожелтением фронда; некрозы – локальные участки отмершей растительной ткани различной формы и цвета. Воздействие гамма-излучения в высоких дозах явно привело к увеличению доли поврежденных растений с хлорозами и некрозами. При облучении в дозе 63 Гр доля поврежденных фрондов для контрольных растений резко достигала 23.8%. В отличие от этого, у обработанных лигнином растений уровень повреждений фрондов при этой дозе снизился более чем в два раза. Кроме того, предварительная обработка водным раствором лигнина позволила сократить до контрольного уровень повреждений фрондов при 18 Гр ( $p \leq 0.05$ , критерий Манна-Уитни). Таким образом, можно сделать вывод о том, что лигнин действительно проявил радиопротекторные свойства.

Корни растений чувствительны к окислительному стрессу при воздействии гамма-излучения, что и приводит к их укорочению [25]. На рисунке 4 представлены данные о средней длине корней облученных растений как обработанных, так и не обработанных водными растворами лигнина.

Полученные результаты свидетельствуют о положительном влиянии экзогенного лигнина на корневую систему растений. Максимальный эффект наблюдался для растений, подвергнутых облучению в дозе 42 Гр. В этом случае средняя длина корней растений, обработанных лигнином, оказалась выше на 18%. Достаточно удовлетворительные результаты наблюдались и при других дозовых нагрузках: при дозах облучения 18 Гр и 63 Гр длина корней обработанных растений оказалась больше на 8.4 и 12.8% соответственно. Таким образом, водный раствор лигнина способствовал защите корневых меристем от действия гамма-излучения.

Следующий этап исследований посвящен оценке изменений растений под действием радиационного фактора и экзогенного лигнина на субклеточном уровне. Гамма-излучение представляет собой фотоны высокой энергии и имеет два основных механизма действия: прямое повреждение молекул с образованием свободных радикалов и радиолит клеточной воды с образованием активных форм кислорода. Эти механизмы вызывают повреждения растительных клеток и провоцируют окислительный стресс как напрямую, так и косвенно, способствуя перекисному окислению липидов мембран. На рисунке 5 представлены результаты определения малонового диальдегида (МДА), хлорофилла и каротиноидов в облученных растениях, в том числе после обработки экзогенным лигнином.

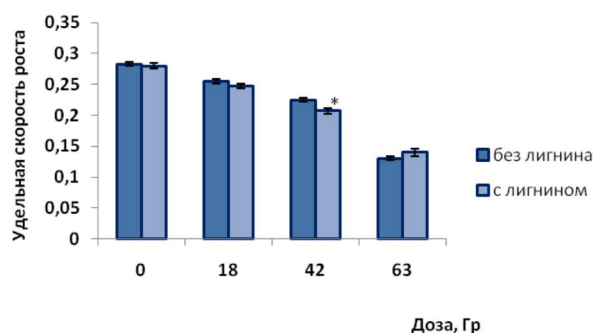


Рис. 2. Изменение удельной скорости роста облученных растений (день<sup>-1</sup>) без обработки лигнином и с предварительной обработкой водным раствором лигнина (10<sup>-5</sup>%). \* – отличия достоверны относительно облученных растений ( $p \leq 0.05$ , критерий Стьюдента)

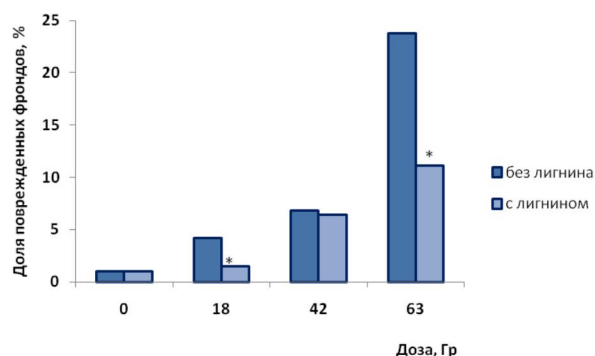


Рис. 3. Медианные значения уровня повреждений фрондов облученных растений без обработки и с предварительной обработкой водным раствором лигнина (10<sup>-5</sup>%). \* – отличия достоверны относительно облученных растений ( $p \leq 0.05$ , критерий Манна-Уитни)

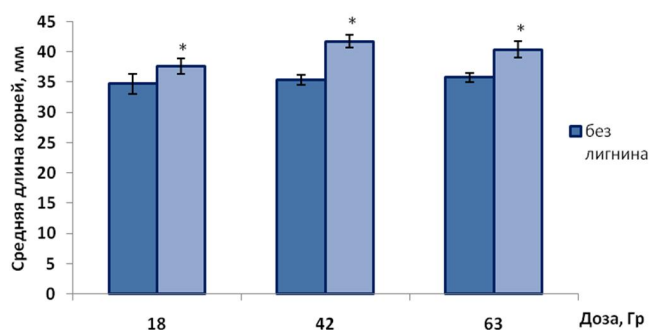
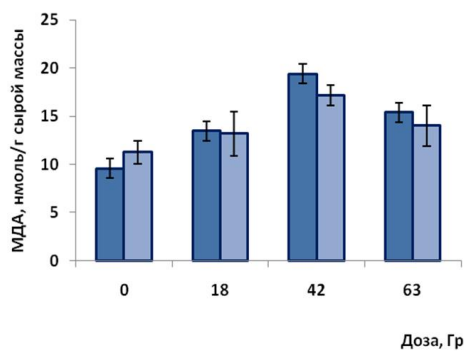
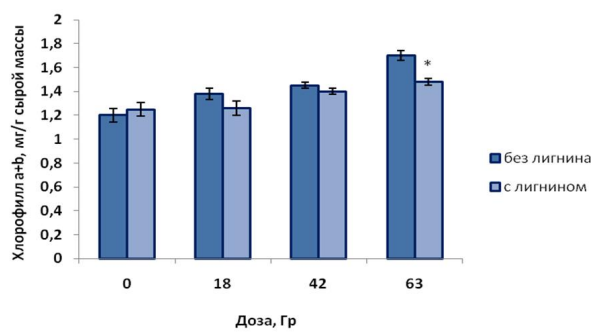


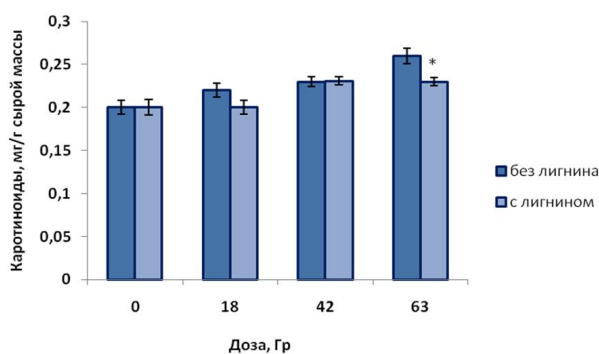
Рис. 4. Изменение средней длины корней облученных растений без обработки и с предварительным обработкой водным раствором лигнина (10<sup>-5</sup>). \* – отличия достоверны относительно облученных растений ( $p \leq 0.05$ , критерий Стьюдента)



*a*



*б*



*в*

Рис. 5. Содержание МДА (*a*), хлорофилла (*б*) и каротиноидов (*в*) в растениях без обработки и с предварительным обработкой водным раствором лигнина (10<sup>-5</sup>%). \* – отличия достоверны относительно облученных растений ( $p \leq 0.05$ , критерий Манна-Уитни (для *a*) и критерий Стьюдента (для *б* и *в*))

Показатель МДА достаточно широко используется в качестве биомаркера оксидативного стресса различных организмов. В контрольном эксперименте значение МДА составляло 9.57 нмоль/г. Облучение в дозах 18–63 Гр вызывает окислительный стресс у растений, на что указывает увеличение показателя МДА. Наибольший уровень окислительного стресса установлен для растений, подвергнутых облучению в дозе 42 Гр. Обработка лигнином не способствовала статистически значимому снижению уровня МДА в клетках растений после облучения ( $p \leq 0.05$ ).

Как видно из рисунков 5б и 5в, облучение влияет на уровень фотоассимилирующих пигментов. В результате облучения концентрация хлорофилла в растениях несколько увеличивается, что описывается в литературе как явление хлорофилльного гормезиса [26], при котором концентрация хлорофилла растет в ответ на стрессовое воздействие. Концентрация хлорофилла в растениях, обработанных водорастворимым лигнином, соответствует его уровню в растениях с аналогичным воздействием радиации. Исключение составляют растения, подвергнутые облучению в дозе 63 Гр. В этом случае содержание хлорофиллов и каротиноидов снижается, приближаясь к значениям растений без воздействия, хотя и остается выше контроля ( $p \leq 0.05$ ).

## Выводы

1. Выдвинута гипотеза о наличии радиопротекторных свойств лигнина и установлена принципиальная возможность использования экзогенного лигнина для защиты растительных организмов (на примере водного растения ряска малой) от острого гамма-излучения в высоких дозах.

2. Определены значения основных биомаркеров (скорость роста, уровень повреждений, площадь фронтов, содержание малонового диальдегида, хлорофилла и каротиноидов) и впервые показано, что водорастворимый лигнин (на примере лигнина багульника *Ledum palustre* L.) не токсичен для лабораторной культуры ряски малой.

3. Впервые установлено, что предварительное культивирование растений в водных лигнинсодержащих средах позволяет снизить уровень повреждений и увеличить длину корней облученных растительных организмов. Это свидетельствует о проявлении адаптогенных и радиопротекторных свойств лигнина на организменном и популяционном уровнях в условиях воздействия гамма-излучения.

#### Финансирование

Исследование выполнено в рамках гранта Российского научного фонда № 22-13-00196, <https://rscf.ru/project/22-13-00196/> (структурно-химический анализ), а также в рамках государственного задания Коми НЦ УрО РАН: № 122040600024-5 (радиобиологические эксперименты, Институт биологии) и № 122040600011-5 (физико-химические исследования, Институт геологии).

#### Конфликт интересов

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

#### Открытый доступ

Эта статья распространяется на условиях международной лицензии Creative Commons Attribution 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), которая разрешает неограниченное использование, распространение и воспроизведение на любом носителе при условии, что вы дадите соответствующие ссылки на автора(ов) и источник и предоставите ссылку на Лицензию Creative Commons и укажете, были ли внесены изменения.

#### Список литературы

- Ralph J., Kim H., Lu, F., Smith R.A., Karlen S.D., Yoshioka, K., del Río J.C. Lignins and Lignification: New Developments and Emerging Concepts // *Recent Advances in Polyphenol Research*. 2023. Vol. 8. Pp. 1–50. DOI: 10.1002/9781119844792.ch1.
- Xue J.Y., Hind K.R., Lemay M.A., Mcminigal A., Jourdain E., Chan C.X., Martone P.T. Transcriptome of the coralline alga *Calliarthron tuberculosum* (Corallinales, Rhodophyta) reveals convergent evolution of a partial lignin biosynthesis pathway // *PLoS ONE*. 2022. Vol. 17, no. 7. Article e0266892. DOI: 10.1371/journal.pone.0266892.
- Han X., Zhao Y., Chen Y., Xu J., Jiang C. et al. Lignin biosynthesis and accumulation in response to abiotic stresses in woody plants // *Forestry Research*. 2022. Vol. 2. Article 9. DOI: 10.48130/FR-2022-0009.
- Феофилова Е.П., Мысякина И.С. Лигнин: химическое строение, биодegradация, практическое использование (обзор) // *Прикладная биохимия и микробиология*. 2016. Т. 52, №6. С. 559–569. DOI: 10.7868/S0555109916060052.
- Vanholme R., De Meester B., Ralph J., Boerjan W. Lignin biosynthesis and its integration into metabolism // *Current Opinion in Biotechnology*. 2019. Vol. 56. Pp. 230–239. DOI: 10.1016/j.copbio.2019.02.018.
- Van de Wall J., Horemans N., Saenen E., Van Hees M., Wannijn J., Nauts R., Cuypers A. Arabidopsis plants exposed to gamma radiation in two successive generations show a different oxidative stress response // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2016. Vol. 165. Pp. 270–279. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2016.10.
- Verdini F., Gaudino E.C., Ganova E., Tabasso S., Behbahani P.J., Cravotto G. Lignin as a Natural Carrier for the Efficient Delivery of Bioactive Compounds: From Waste to Health // *Molecules*. 2022. Vol. 27, no. 11. Article 3598. DOI: 10.3390/molecules27113598.
- Jeon H.S., Jang E., Kim J., Kim S.H., Lee M.-H., Nam M.H., Tobimatsu Y., Park O.K. Pathogen-induced autophagy regulates monolignol transport and lignin formation in plant immunity // *Autophagy*. 2023. Vol. 19, no. 2. Pp. 597–615. DOI: 10.1080/15548627.2022.2085496.
- Nascimento L.B.D., Moreira N.D., Leal-Costa M.V., Costa S.S., Tavares E.S. Induction of wound-periderm-like tissue in *Kalanchoe pinnata* (Lam.) Pers. (Crassulaceae) leaves as a defence response to high UV-B radiation levels // *Ann. Bot.* 2015. Vol. 116, no. 5. Pp. 763–769. DOI: 10.1093/aob/mcv129.
- Liu Q., Luo L., Zheng L. Lignins: biosynthesis and biological functions in plants // *International journal of molecular sciences*. 2018. Vol. 19, no. 2. Article 335. DOI: 10.3390/ijms19020335.
- Cesarino I. Structural features and regulation of lignin deposited upon biotic and abiotic stresses // *Current opinion in biotechnology*. 2019. Vol. 56. Pp. 209–214. DOI: 10.1016/j.copbio.2018.12.012.
- Karmanov A.P., Shaposhnikova L.M., Kocheva L.S., Rachkova N.G., Belyy V.A., Lutoev V. Structural features of stress lignin of aspen (*Populus tremula* L.) growing under increased background radiation // *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*. 2023. Vol. 50. Article 102677. DOI: 10.1016/j.bcab.2023.102677.
- Lahive E., O'Halloran J., Jansen M.A.K. Differential sensitivity of four *Lemnaceae* species to zinc sulphate // *Environmental and Experimental Botany*. 2011. Vol. 71. Pp. 25–33. DOI: 10.1016/j.envexpbot.2010.10.014.

14. Park J., Brown M.T., Depuydt S., Kim J.K., Won D.S., Han T. Comparing the acute sensitivity of growth and photosynthetic endpoints in three *Lemna* species exposed to four herbicides // *Environmental Pollution*. 2017. Vol. 220. Pp. 818–827. DOI: 10.1016/j.envpol.2016.10.064.
15. OECD. Test No. 221: *Lemna* sp. Growth Inhibition Test // *OECD Guidelines for the Testing of Chemicals, Section 2*. Paris: OECD Publishing, 2006. 22 p. DOI: 10.1787/9789264016194-en.
16. Боднарь И.С., Юшкова Е.А., Зайнуллин В.Г. Влияние  $\gamma$ -излучения на морфометрические характеристики ряски малой (*Lemna minor* L.) // *Радиационная биология. Радиоэкология*. 2016. Т. 56, №6. С. 617–622. DOI: 10.7868/S0869803116060035.
17. Heath R.L., Packer L. Photoperoxidation in isolated chloroplasts: I. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation // *Archives of Biochem and Biophys*. 1968. Vol. 125. Pp. 189–198. DOI: 10.1016/0003-9861(68)90654-1.
18. Молекулярно-генетические и биохимические методы в современной биологии растений / под ред. Вл.В. Кузнецова, В.В. Кузнецова, Г.А. Романова. М., 2011. 487 с.
19. Lichtenthaler H.K. Chlorophylls and carotenoids; pigments of photosynthetic biomembranes // *Method Enzymol*. 1987. Vol. 148. Pp. 350–382. DOI: 10.1016/0076-6879(87)48036-1.
20. Патент №2277099 (РФ). Способ получения водорастворимого лигнина / А.П. Карманов, Л.С. Кочева, М.Ф. Борисенков, С.В. Загирова. – 2006.
21. Закис Г.Ф. Функциональный анализ лигнинов и их производных. Рига, 1987. 230 с.
22. Тахтаджян А.Л. Жизнь растений. М., 1982. Т. 6. С. 493–500.
23. Белый В.А., Печникова А.А., Кочева Л.С., Москалёв А.А., Карманов А.П. Лигнины родиолы розовой и серпухи венценосной: особенности химической структуры и антиоксидантные свойства // *Успехи геронтологии*. 2010. Т. 23, №2. С. 221–227.
24. Karmanov A.P., Kanarsky A.V., Kocheva L.S., Belyu V.A., Semenov E.I., Rachkova N.G., Bogdanovich N.I., Pokryshkin S.A. Chemical structure and polymer properties of wheat and cabbage lignins—Valuable biopolymers for biomedical applications // *Polymer*. 2021. Vol. 220. Article 123571. DOI: 10.1016/j.polymer.2021.123571.
25. Vanhoudt N., Horemans N., Wannijn J., Nauts R., Van Hees M., Vandenhove H. Primary stress responses in *Arabidopsis thaliana* exposed to gamma radiation // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2014. Vol. 129. Pp. 1–6. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2013.11.
26. Agathokleous E., Feng Z., Peñuelas J. Chlorophyll hormesis: Are chlorophylls major components of stress biology in higher plants? // *Science of the Total Environment*. 2020. Vol. 726. Article 138637. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.138637.

Поступила в редакцию 19 мая 2023 г.

После переработки 3 июня 2023 г.

Принята к публикации 9 октября 2023 г.



Bodnar I.S.<sup>1</sup>, Raskosha O.V.<sup>1</sup>, Karmanov A.P.<sup>1\*</sup>, Kocheva L.S.<sup>2</sup> INVESTIGATION OF RADIOPROTECTIVE PROPERTIES OF LIGNIN UNDER CONDITIONS OF ACUTE GAMMA RADIATION ON SMALL DUCKWEED *LEMNA MINOR* L.

<sup>1</sup> Institute of Biology, Komi Scientific Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Kommunisticheskaya st., 28, Syktyvkar, 167982, Russia, apk0948@yandex.ru

<sup>2</sup> Institute of Geology, Komi Scientific Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Pervomayskaya st., 54, Syktyvkar, 167982, Russia

The work is devoted to the problem of protecting plant organisms from acute gamma radiation. As an object of study, an aquatic plant small duckweed (*Lemna minor* L.) was chosen, which was irradiated in doses up to 63 Gy. As a radioprotective agent, lignin of wild rosemary (*Ledum palustre* L.) was tested. In the course of the experiments, the values of biomarkers of plant well-being were established and it was shown that the water-soluble lignin of wild rosemary is not toxic to plant organisms. It has been established that preliminary cultivation of plants in aqueous lignin-containing media can reduce the level of damage and increase the length of the roots of irradiated plant organisms, which indicates the manifestation of adaptogenic and radioprotective properties of lignin at the organismic and population levels. For the first time, a hypothesis about the radioprotective potential of lignin was put forward and the possibility of using exogenous lignin to protect plant organisms from acute gamma radiation in high doses was experimentally shown.

**Keywords:** small duckweed, gamma radiation, lignin, radioprotective properties.

**For citing:** Bodnar I.S., Raskosha O.V., Karmanov A.P., Kocheva L.S. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2024, no. 2, pp. 99–108. (in Russ.). DOI: 10.14258/jcprm.20240212979.

## References

1. Ralph J., Kim H., Lu, F., Smith R.A., Karlen S.D., Yoshioka, K., del Río J.C. *Recent Advances in Polyphenol Research*, 2023, vol. 8, pp. 1–50. DOI: 10.1002/9781119844792.ch1.
2. Xue J.Y., Hind K.R., Lemay M.A., Mcminigal A., Jourdain E., Chan C.X., Martone P.T. *PLoS ONE*, 2022, vol. 17, no. 7, article e0266892. DOI: 10.1371/journal.pone.0266892.
3. Han X., Zhao Y., Chen Y., Xu J., Jiang C. et al. *Forestry Research*, 2022, vol. 2, article 9. DOI: 10.48130/FR-2022-0009.
4. Feofilova Ye.P., Mysyakina I.S. *Prikladnaya biokhimiya i mikrobiologiya*, 2016, vol. 52, no. 6, pp. 559–569. DOI: 10.7868/S0555109916060052. (in Russ.).
5. Vanholme R., De Meester B., Ralph J., Boerjan W. *Current Opinion in Biotechnology*, 2019, vol. 56, pp. 230–239. DOI: 10.1016/j.copbio.2019.02.018.
6. Van de Wall J., Horemans N., Saenen E., Van Hees M., Wannijn J., Nauts R., Cuypers A. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2016, vol. 165, pp. 270–279. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2016.10.
7. Verdini F., Gaudino E.C., Ganova E., Tabasso S., Behbahani P.J., Cravotto G. Lignin as a Natural Carrier for the Efficient Delivery of Bioactive Compounds: From Waste to Health // *Molecules*. 2022, vol. 27, no. 11, article 3598. DOI: 10.3390/molecules27113598.
8. Jeon H.S., Jang E., Kim J., Kim S.H., Lee M.-H., Nam M.H., Tobimatsu Y., Park O.K. *Autophagy*, 2023, vol. 19, no. 2, pp. 597–615. DOI: 10.1080/15548627.2022.2085496.
9. Nascimento L.B.D., Moreira N.D., Leal-Costa M.V., Costa S.S., Tavares E.S. *Ann. Bot.*, 2015, vol. 116, no. 5, pp. 763–769. DOI: 10.1093/aob/mcv129.
10. Liu Q., Luo L., Zheng L. Lignins: biosynthesis and biological functions in plants // *International journal of molecular sciences*. 2018, vol. 19, no. 2, article 335. DOI: 10.3390/ijms19020335.
11. Cesarino I. *Current opinion in biotechnology*, 2019, vol. 56, pp. 209–214. DOI: 10.1016/j.copbio.2018.12.012.
12. Karmanov A.P., Shaposhnikova L.M., Kocheva L.S., Rachkova N.G., Belyy V.A., Lutoev V. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 2023, vol. 50, article 102677. DOI: 10.1016/j.bcab.2023.102677.
13. Lahive E., O'Halloran J., Jansen M.A.K. *Environmental and Experimental Botany*, 2011, vol. 71, pp. 25–33. DOI: 10.1016/j.envexpbot.2010.10.014.
14. Park J., Brown M.T., Depuydt S., Kim J.K., Won D.S., Han T. *Environmental Pollution*, 2017, vol. 220, pp. 818–827. DOI: 10.1016/j.envpol.2016.10.064.
15. OECD. *OECD Guidelines for the Testing of Chemicals, Section 2*. Paris: OECD Publishing, 2006, 22 p. DOI: 10.1787/9789264016194-en.
16. Bodnar' I.S., Yushkova Ye.A., Zaynullin V.G. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya*, 2016, vol. 56, no. 6, pp. 617–622. DOI: 10.7868/S0869803116060035. (in Russ.).
17. Heath R.L., Packer L. *Archives of Biochem and Biophys*, 1968, vol. 125, pp. 189–198. DOI: 10.1016/0003-9861(68)90654-1.
18. *Molekulyarno-geneticheskiye i biokhimicheskiye metody v sovremennoy biologii rasteniy*. [Molecular genetic and biochemical methods in modern plant biology], ed. VI.V. Kuznetsov, V.V. Kuznetsov, G.A. Romanov. Moscow, 2011, 487 p. (in Russ.).
19. Lichtenthaler H.K. *Method Enzymol.*, 1987, vol. 148, pp. 350–382. DOI: 10.1016/0076-6879(87)48036-1.
20. Patent 2277099 (RU), 2006. (in Russ.).

\* Corresponding author.

21. Zakis G.F. *Funktsional'nyy analiz ligninov i ikh proizvodnykh* [Functional Analysis of Lignins and their Derivatives]. Riga, 1987, 230 p. (in Russ.).
22. Takhtadzhyan A.L. *Zhizn' rasteniy*. [Plant life]. Moscow, 1982, vol. 6, pp. 493–500. (in Russ.).
23. Belyy V.A., Pechnikova A.A., Kocheva L.S., Moskalov A.A., Karmanov A.P. *Uspekhi gerontologii*, 2010, vol. 23, no. 2, pp. 221–227. (in Russ.).
24. Karmanov A.P., Kanarsky A.V., Kocheva L.S., Belyy V.A., Semenov E.I., Rachkova N.G., Bogdanovich N.I., Pokryshkin S.A. *Polymer*, 2021, vol. 220, article 123571. DOI: 10.1016/j.polymer.2021.123571.
25. Vanhoudt N., Horemans N., Wannijn J., Nauts R., Van Hees M., Vandenhove H. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2014, vol. 129, pp. 1–6. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2013.11.
26. Agathokleous E., Feng Z., Peñuelas J. *Science of the Total Environment*, 2020, vol. 726, article 138637. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.138637.

Received May 19, 2023

Revised June 3, 2023

Accepted October 9, 2023

#### Сведения об авторах

*Боднарь Ирина Сергеевна* – научный сотрудник,  
bodnar-irina@mail.ru

*Раскоша Оксана Вениаминовна* – заведующая отделом,  
raskosha@ib.komisc.ru

*Карманов Анатолий Петрович* – ведущий научный сотрудник лаборатории биохимии и биотехнологии,  
apk0948@yandex.ru

*Кочева Людмила Сергеевна* – ведущий научный сотрудник, karko07@mail.ru

#### Information about authors

*Bodnar Irina Sergeevna* – research associate,  
bodnar-irina@mail.ru

*Raskosha Oksana Veniaminovna* – head of department,  
raskosha@ib.komisc.ru

*Karmanov Anatoly Petrovich* – leading researcher at the Laboratory of Biochemistry and Biotechnology,  
apk0948@yandex.ru

*Kocheva Lyudmila Sergeevna* – leading researcher,  
karko07@mail.ru