DOI:10.33266/1024-6177-2025-70-2-5-8

С.А. Абдуллаев[1, 2], Н.Ф. Раева[1], Д.В. Фомина[1], Т.П. Калинин[3], Т.Н. Максимова[4], Г.Д. Засухина[1, 5]

ТИМОХИНОН (КОМПОНЕНТ *Nigella/Sativa*) СНИЖАЕТ ТОКСИЧНЫЕ ЭФФЕКТЫ ПРИ ЛУЧЕВОЙ ТЕРАПИИ И ИМЕЕТ АНТИКАНЦЕРОГЕННЫЙ ПОТЕНЦИАЛ

[1] Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И. Бурназяна ФМБА России, Москва
[2] Институт теоретической и экспериментальной биофизики РАН, Пущино
[3] Российский национальный исследовательский медицинский университет имени Н.И. Пирогова, Москва
[4] Первый Московский государственный медицинский университет им. И.М. Сеченова, Москва
[5] Институт общей генетики им. Н.И. Вавилова РАН, Москва

Контактное лицо: Серажутдин Абдуллаевич Абдуллаев, e-mail: saabdullaev@gmail.com

РЕФЕРАТ

Проанализированы литературные сведения по биологическим свойствам тимохинона (ТХ) – компонента черного тмина (*Nigella sativa*), который широко используется (главным образом на Востоке) для профилактики и лечения ряда патологий, в том числе онкологии. Приведены многочисленные данные по радиопротекторным свойствам ТХ на экспериментальных животных, связанным с влиянием на оксидативный радиационно-индуцированный стресс, а также со стимуляции защитных систем клетки и организма. Показано действие ТХ при комбинированном воздействии с радиацией при опухолеобразовании. Учитывая безопасность ТХ по сравнению с синтетическими протекторами, авторы рекомендуют дальнейшие исследования по применению ТХ для профилактики и лечения при действии радиации.

Ключевые слова: *тимохинон, радиопротектор, антиоксидант, лучевая терапия*

Для цитирования: Абдуллаев С.А., Раева Н.Ф., Фомина Д.В., Калинин Т.П., Максимова Т.Н., Засухина Г.Д. Тимохинон (компонент *Nigella/Sativa*) снижает токсичные эффекты при лучевой терапии и имеет антиканцерогенный потенциал // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2025. Т. 70. № 2. С. 5–8. DOI:10.33266/1024-6177-2025-70-2-5-8

DOI:10.33266/1024-6177-2025-70-2-5-8

S.A. Abdullaev[1, 2], N.F. Raeva[1], D.V. Fomina[1], T.P. Kalinin[3], T.N. Maksimova[4], G.D. Zasukhina[1, 5]

Thymoquinone (a Component of *Nigella Sativa*) Reduces Toxic Effects of Radiotherapy and Has Anti-Cancer Potential

[1] A.I. Burnazyan Federal Medical Biophysical Center, Moscow, Russia
[2] Institute of Theoretical and Experimental Biophysics, Pushchino, Russia
[3] N.I. Pirogov Russian National Research Medical University, Moscow, Russia
[4] I.M. Sechenov First Moscow State Medical University, Moscow, Russia
[5] N.I. Vavilov Institute of General Genetics, Moscow, Russia

Contact person: S.A. Abdullaev, e-mail: saabdullaev@gmail.com

ABSTRACT

The review analyzes literature data on the biological properties of thymoquinone (TQ), a component of black cumin (*Nigella sativa*), which is widely used (mainly in the East) for the prevention and treatment of a number of pathologies, including oncology. Numerous data are provided on the radioprotective properties of TQ on experimental animals associated with the effect on oxidative stress induced by radiation, as well as stimulation of the protective systems of the cell and the body. The effect of TQ in combination with radiation in tumor formation is shown. Given the safety of TQ compared to synthetic protectors, the authors recommend TQ for further research for prevention and treatment of radiation exposure.

Keywords: *thymoquinone, radioprotector, antioxidant, radiotherapy*

For citation: Abdullaev SA, Raeva NF, Fomina DV, Kalinin TP, Maksimova TN, Zasukhina GD. Thymoquinone (a Component of *Nigella Sativa*) Reduces Toxic Effects of Radiotherapy and Has Anti-Cancer Potential. Medical Radiology and Radiation Safety. 2025;70(2):5–8. (In Russian). DOI:10.33266/1024-6177-2025-70-2-5-8

Для лечения онкологических пациентов используют высокие дозы радиации. Проблемой при радиационном воздействии является минимизация побочных эффектов для здоровых тканей и использование радиосенсибилизаторов для ускорения и усиления повреждающего эффекта лучевой терапии. Примерно у 95 % пациентов при радиотерапии возникают кожные реакции. При лучевой терапии рака простаты в большинстве случаев возникают циститы, ректиты, а при радиотерапии легких осложнением является не поддающаяся лечению пневмония, возникающая через 6 мес после начала лечения.

Радиопротекторными свойствами обладают некоторые растительные препараты в том числе – тимохинон (ТХ) [1]. Основной повреждающей компонентной при действии радиации является оксидативный стресс. Нарушение оксидантно-антиоксидантного гомеостаза повышает чувствительность клеток к индуцированным повреждениям. При этом повышается концентрация малондиальдегида, нитроксил аниона, ионов кальция, понижается активность супероксиддисмутазы, каталазы, глутатиона. Оксидативный стресс при радиации вызывает мутации в митохондриальной ДНК, которая в свою очередь продуцирует генерацию свободных радикалов и влияет на механизм эпигенетического контроля, что изменяет активность метилтрансферазы и является причиной глобального гипометилирования. Оксидативный стресс ингибирует Т и NK клетки, таким образом раковые клетки оказываются малочувствительными к воздействию иммунной защиты.

Рядом авторов было изучено влияние ТХ на крысах, которых облучали (5 Гр) в области груди и вводили ТХ (50 мг/кг) за 30 мин до облучения и далее 10 сут ежедневно. ТХ растворяли в диметилсульфоксиде до конечной концентрации 0,1 %. Было показано, что ТХ детоксифицирует свободные радикалы, снижая оксидативно-нитрозативный стресс, предохраняя клеточную мембрану от липидной пероксидации и обеспечивая клеточную интеграцию. ТХ ингибировал воспалительную клеточную инфильтрацию. Было обнаружено, что ТХ повышал активность энзиматической и неэнзиматической защитных систем, т.е. ТХ обладал радиопротекторным эффектом в легочной ткани облученных крыс [2]. Поэтому необходимость препаратов для минимизации действия радиации, которые обладают антивоспалительными свойствами и способствуют регенерации тканей, снижая оксидативный стресс, крайне актуальна. Многие из таких препаратов функционируют, используя сигнальный путь NF-κB [3].

В последнее время при лучевой терапии онкологических пациентов для сохранения здоровых тканей используют биоактивные соединения. Так, из 34 препаратов было выбрано по антиканцерогенной активности всего 4, в том числе ТХ, являющийся биоактивным компонентом черного тмина (*Nigella sativa*), который ингибирует пролиферацию, модулирует экспрессию апоптотических генов и ассоциированных с ними путей [4]. Показано также, что ТХ подавляет экспрессию онкогенов и металлопротеиназ. Главное, что ТХ оказывает выраженный антиканцерогенный эффект без повреждения здоровых клеток. Вместе с тем, ТХ обладает низкой активностью из-за малой липидной растворимости. Присутствие оливкового масла может служить липидным матриксом как липофилический компонент, делающий ТХ растворимым в масле. ТХ с липидным компонентом (TQ-NLC) обладает токсичностью к клеткам рака печени, обусловленную разными механизмами, включая ингибирование клеточной пролиферации, остановку клеточного цикла, генерацию свободных радикалов кислорода, индукцию апоптоза. ТХ индуцирует апоптоз через ген *P53*, который регулирует клеточный стресс, цитотоксический стресс и ДНК повреждения. ТХ осуществляет свою активность через путь эндоплазматического митохондриального ретикулума, который повышает уровень свободных радикалов, действуя в дозозависимой закономерности. [5].

Основным свойством ТХ является отсутствие токсичности для нормальных тканей. Если мышам давали ТХ ежедневно в течение 90 сут в концентрациях 0,01, 0,02 и 0,03 %, то не было признаков какой-либо токсичности или летальности. Не было отмечено цитотоксического эффекта ТХ при высоких дозах – 4,8, 25 и 50 мг/кг при внутрибрюшинном введении мышам в нормальных клетках почек, а также в фибробластах легкого человека [6].

Для осуществления защитного действия необходимым свойством должна быть антиоксидантная активность. Антиоксиданты являются молекулами, защищающими против токсичности свободных радикалов, и включают эндогенные и экзогенные источники. К эндогенным источникам относятся супероксиддисмутаза, каталаза, глютатионпероксидаза и неэнзиматические источники (альбумин, билирубин, альфа-токоферол, мочевая кислота и бета-каротин). К экзогенным источникам антиоксидантов относится альфа-токоферол, ресвератрол, фенольная кислота, аскорбиновая кислота, оксиацетилцистеин, селен, цинк. Оксидативный стресс выражается в отсутствии баланса между оксидантами и антиоксидантами, что приводит к повреждениям биологических структур и играет ключевую роль в патогенезе многих патологий таких, как кардиоваскулярные, легочные, метаболический синдром, рак, урогенитальные, неврологические. Система защиты контролируется ответом на стресс транскрипционным фактором *NRF2* и ядерным фактором *NF-κB* [7].

В колоректальных раковых клетках ТХ индуцирует апоптоз и изменения в митохондриях, снижая клеточную выживаемость как при низких (6,25–25 мМ), так и при высоких (50–100 мМ) концентрациях препарата. При этом в раковых клетках наблюдалось нарушение функции, приводящее к деполяризации митохондриальной мембраны, выходу цитохрома-с и активации каспаз. Эта митохондриальная дисфункция приводила к индукции апоптоза [8].

Механизмы действия ТХ в концентрациях 25 мМ и 50 мМ были изучены по показателям транскрипционных изменений и клеточной пролиферации в клетках глиобластомы A172. Глиобластома мозга характеризуется быстрой пролиферацией и плохой дифференциацией, а также в 80–90 % опухолей обнаружены мутации в ряде генов (*P13K*, *MAPK*, *P53* и др.). Эти опухоли резистентны, индуцируют ингибирование иммунитета и серьезные побочные эффекты. По этой причине рядом авторов было обращено внимание на возможность использования ТХ [9].

Было показано, что ТХ осуществляет антиканцерогенную активность через многочисленные пути, селективно используя антиоксидантные и оксидантные пути, взаимодействуя со структурами ДНК, а также модулируя иммунитет. На мышах было выявлено, что ТХ может проникать в мозг через гематоэнцефалический барьер в силу своей липофильности и малому размеру. Ингибирование клеточной пролиферации было дозозависимой при высоких концентрациях через 48 ч после воздействия. В клетках глиобластомы ТХ ингибировал экстрацеллюлярный матрикс-рецептор (ECM-рецептор), который формирует микроокружение клетки и состоит

из гликопротеинов, протеогликанов и гликозаминогликанов, которые экспрессируются с высоким уровнем в клетках глиомы. ТХ-обработка снижала регуляцию некоторых ECM компонентов, осуществляя терапевтический эффект, ингибируя адгезию, миграцию раковых клеток. В клетках глиомы ТХ ингибировал кальциевый сигнальный путь при концентрациях 25 и 50 мМ в течение 48 ч. Пониженная экспрессия наблюдалась в TAC-гене, кодирующем рецептор, связанный с различными раками и апоптозом. Повышенная концентрация ТХ (50 мМ) снижала регуляцию 18 дифференциально экспрессирующихся генов в клетках глиобластомы. При этом в этих клетках была повышенная экспрессия *P53* сигнального пути без изменения самого гена, т.е. ТХ модулирует *P53* сигнальный путь, влияя на экспрессию генов-мишеней пониженной экспрессии. Повышение уровня проапоптотических протеинов и снижение количества антиапоптотических протеинов подтверждает, что в ТХ-обработанных клетках повышается митохондриальный путь апоптоза. Оказалось, что линия первичных глиома-клеток обладала повышенной чувствительностью к химио-терапевтическо-индуцированному апоптозу и демонстрировала опухоль-супрессируюший эффект при концентрациях ТХ 25–50 мМ. Показана также модуляция ряда путей в клетках глиобластомы, снижающая экспрессию некоторых генов-онкогенов, в том числе генов, ассоциированных с плохим прогнозом течения глиобластомы. ТХ в концентрации ниже 10 мМ не оказывал влияния на изменение экспрессии генов в клетках глиобластомы, тогда как высокие концентрации снижали клеточную выживаемость, изменяя активность ключевых генов [9].

ТХ обладает антимикробной, антигистаминной, антидиабетической, антивоспалительной, антиоксидантной, гипогликемической, антиканцерогенной активностью. Показано, что ТХ эффективен при некоторых формах церебральной патологии [10, 11]. ТХ применяется для лечения при многих заболеваниях (кардиоваскулярные, диабет, аутоиммунные и др.), в том числе инфекционных, включая КОВИД-19. ТХ характеризуется как препарат с широким спектром фармакологического потенциала [12, 13].

ТХ благодаря своим защитным свойствам может являться перспективным радиопротектором, по всей видимости, действующим аналогично митохондриально-направленным соединениям, подавляющим пострадиационную генерацию АФК и повышающим активацию биогенеза, выбраковку дисфункциональных митохондрий путем митофагии и, следовательно, способствующим снижению повреждений ядерного генома [14–19].

Многочисленные данные подтверждают отсутствие токсичности при одновременном действии ТХ и радиации в опытах на животных, а также при использовании ТХ для лечения опухолей. Кроме того, ТХ повышает чувствительность опухолевых клеток к экзогенным воздействиям. В качестве радиосенсибилизаторов опухолей при лучевой терапии были применены наноматериалы тяжелых металлов и лекарственных препаратов, а также химические наноструктуры, что в конечном итоге сохраняет здоровые окружающие опухоль ткани от повреждающего действия радиации. Перечисленные препараты генерируют свободные радикалы, что повышает повреждающий эффект на опухолевые клетки, при этом нормальные клетки повреждаются минимально.

Известно, что гипоксия связана с радиорезистентностью, поэтому главным радиосенсибилизатором является кислород. Одним из таких препаратов-индукторов является никотинамид, а также нитромидазол, которые применимы как адъюнкты при лучевой терапии [20].

Вместе с тем, ясно, что растительные препараты, к которым относится и ТХ, являются более безопасными по сравнению с химическими соединениями. Из приведенных данных следует, что ТХ может служить для профилактики возможных осложнений в некоторых профессиональных группах, связанных с облучением, а также при дальних космических полетах.

Защита нормальных клеток при лучевой терапии может быть достигнута также использованием малых доз радиации. Было показано, что малые дозы радиации (МДР) до 0,1 Гр оказывают положительное профилактическое и терапевтическое действие при ряде патологий человека, к которым относятся воспалительные процессы, включая пневмонию, вызванную КОВИД-19, и такие заболевания как синдром Альцгеймера, опухоли [21–23].

Антиопухолевая активность МДР связана со стимуляцией иммунитета. Кроме того, МДР повышали чувствительность опухолевых клеток к высоким дозам радиации, т.е. снижается радиорезистентность опухолевых клеток, что важно при лучевой терапии. При этом происходит стабилизация здоровых, окружающих опухоль клеток (адаптивный ответ). Нами было показано, что четырехкратное облучение мышей с трансплантированной опухолью Льюиса в дозе 0,075 Гр приводило к замедлению роста опухоли, стимуляции генов-супрессоров опухолей и ингибированию генов-онкогенов [24].

Заключение

Из изложенного материала следует, что в последнее время акцент в поиске и применении радиопротекторов сделан на исследовании растительных и некоторых других природных препаратов, к которым относится ТХ – компонент черного тмина, используемого в пищевой промышленности, что гарантирует его безопасность. Основные свойства ТХ – его способность к участию в механизме, связанном с модуляцией уровня свободных радикалов в зависимости от концентрации препарата, а также активация иммунитета и защитных систем клетки – представляются как перспективные как для радиопротекции, так и при лечении онкопатологии, в том числе для снижения токсических эффектов при лучевой терапии.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Stasiłowicz-Krzemień A., Gościniak A., Formanowicz D., Cielecka-Piontek J. Natural Guardians: Natural Compounds as Radioprotectors in Cancer Therapy. Int J Mol Sci. 2024;25:6937. doi.org/10.3390/ijms25136937
2. Dogru S., Taysi S., Yugel A. Effects of Thymoquinone in the Lungs of Rats Against Radiation-Induced Oxidative Stress. Eur Rev Med Pharmacol Sci. 2024;28;1:191-198. doi: 10.26355/eurrev_202401_34904.
3. Guangmei D., Weishan H., Wenya L., Fasheng W., Jibing Ch. Evolution of Radiation-Induced Dermatitis Treatment. Clin Transl Oncol. 2024;26;9:2142-2155. doi: 10.1007/s12094-024-03460-1.
4. Borah P., Baral A., Paul A.K., Ray U., Bharalee R., Upadhyaya H, et al. Traditional Wisdom in Modern Medicine: Unveiling the Anticancer Efficacy of Northeastern Indian spices. Journal of Herbal Medicine. 2024;100896. doi: 10.1016/j.hermed.2024.100896.
5. Shaban A.R. Molecular Modulation of Chemotherapeutic Agents – Choices for Thymoquinone Nano-Structured Lipid Carrier (Tq-Nls) on Human Liver Cancer Cells. World Journal Internal Medicine and Surgery. 2024;1:24-44.

6. Taysi S., Algburi F.Sh., Mohammed Z.R., Ali O.A., Taysi M.E. Thymoquinone: a Review on its Pharmacological Importance, and its Association with Oxidative Stress, Covid-19, and Radiotherapy. Mini Rev Med Chem. 2022;22;14:1847-1875. doi: 10.2174/1389557522666220104151225.
7. Aslani M., Saadat S., Boskabady M. Comprehensive and Updated Review on Anti-Oxidant Effects of *Nigella Sativa* and its Constituent, Thymoquinone, in Various Disorders. Iran J Basic Med Sci. 2024;27;8:923-951. doi: 10.22038/IJBMS.2024.75985.16453.
8. Sirinyildiz F., Unay S. N-Methyl-d-Aspartate Receptors and Thymoquinone Induce Apoptosis and Alteration in Mitochondria in Colorectal Cancer Cells. Med Oncol. 2024;41;5:123. doi: 10.1007/s12032-024-02348-y.
9. Pandey R., Natarajan P., Reddy U.K., Du W., Sirbu C., Sissoko M., Hankins G.R. Deciphering the Dose-Dependent Effects of Thymoquinone on Transcriptomic Changes and Cellular Proliferation in Glioblastoma. Preprints. 2024. 2024011894. doi: 10.20944/preprints202401.1894.v1.
10. Isaev N., Genrics E., Stelmashook E. Antioxidant Thymoquinone and its Potential in the Treatment of Neurological Diseases. Antioxidants (Basel). 2023;12;2:433. doi: 10.3390/antiox12020433.
11. Засухина Г.Д., Максимова Т.Н. Перспективы применения тимохинона (компонента *Nigella sativa*) в профилактике и лечении нейропатологии // Успехи современной биологии. 2024. Т.144. №2. С.165-170. [Zasukhina G.D., Maksimova T.N. Prospects for the Use of Thymoquinone (a Component of *Nigella Sativa*) in the Prevention and Treatment of Neuropathology. *Uspekhi Sovremennoy Biologii* = Advances in Modern Biology. 2024;144;2:165-170 (In Russ.)].
12. Ferizi R., Ramadan M., Maxhuni Q. Black Seeds (*Nigella Sativa*) Medical Application and Pharmaceutical Perspectives. J Pharm Bioallied Sci. 2023;15;2:63-67. doi: 10.4103/jpbs.jpbs_364_22.
13. Салеева Д.В., Раева Н.Ф., Абдуллаев С.А., Максимова Т.Н., Засухина Г.Д. Профилактический и терапевтический потенциал тимохинона при ряде патологий человека на основе определения активации клеточных компонентов, осуществляющих защитные функции по активности генов и некодирующих РНК // Госпитальная медицина: наука и практика. 2023. Т.6. №2. С.27-36. [Saleyeva D.V., Rayeva N.F., Abdullayev S.A., Maksimova T.N., Zasukhina G.D. Preventive and Therapeutic Potential of Thymoquinone in a Number of Human Pathologies Based on the Determination of the Activation of Cellular Components that Perform Protective Functions According to the Activity of Genes and Non-Coding RNA. *Gospital'naya Meditsina: Nauka i Praktika* = Hospital Medicine: Science and Practice. 2023;6;2:27-36 (In Russ.)]. https://doi.org/10.34852/GM3CVKG.2023.75.38.015.
14. Isaev N.K., Chetverikov N.S., Stelmashook E.V., Genrikhs E.E., Khaspekov L.G., Illarioshkin S.N. Thymoquinone as a Potential Neuroprotector in Acute and Chronic Forms of Cerebral Pathology. Biochemistry (Mosc). 2020;85;2:167-176. doi: 10.1134/S0006297920020042.
15. Silachev D.N., Plotnikov E.Y., Zorova L.D., Pevzner I.B., Sumbatyan N.V., Korshunova G.A., Gulyaev M.V., Pirogov Y.A., Skulachev V.P., Zorov D.B. Neuroprotective Effects of Mitochondria-Targeted Plastoquinone and Thymoquinone in a Rat Model of Brain Ischemia/Reperfusion Injury. Molecules. 2015;20;8:14487-503. doi: 10.3390/molecules200814487.
16. Zhang D., Zhang Y., Wang Z., Lei L. Thymoquinone Attenuates Hepatic Lipid Accumulation by Inducing Autophagy Via AMPK/mTOR/ULK1-Dependent Pathway in Nonalcoholic Fatty Liver Disease. Phytother Res. 2023;37;3:781-797. doi: 10.1002/ptr.7662.
17. Abdullaev S., Minkabirova G., Karmanova E., Bruskov V., Gaziev A. Metformin Prolongs Survival Rate in Mice and Causes Increased Excretion of Cell-Free DNA in the Urine of X-Irradiated Rats. Mutat Res Genet Toxicol Environ Mutagen. 2018;831:13-18. doi: 10.1016/j.mrgentox.2018.05.006.
18. Gaziev A., Abdullaev S., Minkabirova G., Kamenskikh K. X-Rays and Metformin Cause Increased Urinary Excretion of Cell-Free Nuclear and Mitochondrial DNA in Aged Rats. J Circ Biomark. 2016;25;5:1849454416670782. doi: 10.1177/1849454416670782.
19. Abdullaev S.A., Glukhov S.I., Gaziev A.I. Radioprotective and Radiomitigative Effects of Melatonin in Tissues with Different Proliferative Activity. Antioxidants (Basel). 2021;10;12:1885. doi: 10.3390/antiox10121885.
20. Abbas Idris Nour M, Abd-AL-Hassan ZI, Ibrahim Hassan DH. Application of Radiosensitizers in Cancer Radiotherapy, Nanomaterials of Heavy Metals, Drugs and Chemicals with Nanostructure. Current Clinical and Medical Education. 2024;2;5:258-266. https://www.visionpublisher.info/index.php/ ccme/article/view/95.
21. Михайлов В.Ф., Засухина Г.Д. Новый подход к стимуляции защитных систем организма малыми дозами радиации // Успехи современной биологии. 2020. Т.140. №3. С. 244-252. [Mikhaylov V.F., Zasukhina G.D. A New Approach to Stimulating the Body's Defense Systems with Low Doses of Radiation. *Uspekhi Sovremennoy Biologii* = Advances in Modern Biology. 2020;140;3:244-252 (In Russ.)]. doi: 10.31857/S0042132420030060.
22. Салеева Д.В., Рождественский Л.М., Раева Н.Ф., Воробьева Е.С., Засухина Г.Д. Механизмы противоопухолевого действия малых доз радиации, связанные с активацией защитных систем клетки // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2023. Т. 68. №1. С. 15-18. [Saleyeva D.V., Rozhdestvenskiy L.M., Rayeva N.F., Vorob'yeva Ye.S., Zasukhina G.D. Mechanisms of Antitumor Action of Low Doses of Radiation Associated with Activation of Cellular Defense Systems. *Meditsinskaya Radiologiya i Radiatsionnaya Bezopasnost'* = Medical Radiology and Radiation Safety. 2023;68;1:15-18 (In Russ.)]. doi:10.33266/1024-6177-2023-68-1-15-18.
23. Herrera F.G., Romero P., Coukos G. Lighting up the Tumor Fire with Low-Dose Irradiation. Trends in Immunology. 2022;43;3:173-179. doi 10.1016/j.it.2022.01.006.
24. Михайлов В.Ф., Салеева Д.В., Шуленина Л.В., Раева Н.Ф., Рождественский Л.М., Засухина Г.Д. Связь между динамикой роста перевивной карциномы Льюиса у мышей и изменением активности генов и некодирующих РНК после рентгеновского облучения в малых дозах // Радиационная биология. Радиоэкология. 2022. Т.62. №1. С. 28-41 [Mikhaylov V.F., Saleyeva D.V., Shulenina L.V., Rayeva N.F., Rozhdestvenskiy L.M., Zasukhina G.D. Relationship Between the Growth Dynamics of Transplantable Lewis Carcinoma in Mice and Changes in the Activity of Genes and Non-Coding RNAs After Low-Dose X-Ray Irradiation. *Radiatsionnaya Biologiya. Radioekologiya* = Radiation Biology. Radioecology. 2022; 62;1:28-41 (In Russ.)]. doi:10.31857/S0869803122010088.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Работа выполнена по теме ФГБУ ГНЦ ФМБЦ имени А.И. Бурназяна «Технология-3» (госзадание №123011300105-3).

Участие авторов. Статья подготовлена с равным участием авторов.

Поступила: 20.12.2024. Принята к публикации: 25.01.2025.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Financing. The work was carried out on the topic of the Technology-3 Federal State Budgetary Educational Institution of Science and Technology named after A.I. Burnazyan (state assignment No. 123011300105-3).

Contribution. Article was prepared with equal participation of the authors.

Article received: 20.12.2024. Accepted for publication: 25.01.2025.