

DOI: 10.12731/2658-6649-2024-16-2-760

УДК 575.224.46



Научная статья

ЦИТОГЕНЕТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ У-РАДИАЦИИ В КЛЕТКАХ КОРНЕВОЙ МЕРИСТЕМЫ *ALLIUM SERA*

М.В. Смирнова, А.А. Смирнов

Обоснование. Загрязнение окружающей среды радиоактивными материалами геогенного и антропогенного происхождения является глобальной проблемой. Было разработано множество процедур тестирования на мутагенность, которые позволяют обнаруживать повреждения ДНК, вызванные ионизирующим излучением. В настоящей работе использовали *Allium* - тест (широко используемый биоанализ генотоксичности на основе растений) для выявления генетических повреждений, вызванных у-излучением. Полученные данные указывают на то, что данный метод может быть использован для биомониторинга окружающей среды. Целью настоящего исследования было изучение у-излучения с помощью *Allium*-теста.

Материалы и методы. Луковицы лука Штутгартер Ризен (*Allium sera* L., $2n = 16$) хранили в темном прохладном месте (+4-5°C). Для каждого образца и контроля брали по 3 луковицы. В качестве контроля использовали дистиллированную воду. Гамма-облучение проводили с помощью *Eu152* в течение 3 дней в дозах 0,3, 1 и 3 Гр. Через 3 дня корни срезали и фиксировали в уксусном спирте, а затем помещали в герметичные пробирки для длительного хранения в 80%-ном этаноле. Корни гидролизовали и окрашивали в керамических тиглях в растворе ацетоорцеина над пламенем спиртовки, а давленные препараты готовили в капле 45%-ной уксусной кислоты. Количество делящихся клеток определяли в 1000 клеток в поле зрения с учетом фаз и хромосомных aberrаций.

Результаты. Было выявлено появление гигантских клеток, С-митозов, ядерных почек, фрагментов, отставаний и мостов, нарушений в работе веретена деления и микроядер при облучении в дозах 3 и 1 Гр.

Выводы. В результате исследования было показано, что у- облучение лука репчатого (*Allium sera* L.) дозами 3, 1 и 0,3 Гр приводило к появлению цитогенетических нарушений, доля которых достоверно отличалась от контроля.

Ключевые слова: *Allium-test; гамма-радиация; хромосомные aberrации; митотический индекс*

Для цитирования. Смирнова М.В., Смирнов А.А. Цитогенетические эффекты у-радиации в клетках корневой меристемы *Allium cepa* // *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*. 2024. Т. 16, №2. С. 113-125. DOI: 10.12731/2658-6649-2024-16-2-760

Original article

CYTOGENETIC EFFECTS Y-RADIATION IN THE CELLS OF THE ROOT MERISTEM OF *ALLIUM CEPA*

M.V. Smirnova, A.A. Smirnov

Background. Environmental contamination with radioactive materials of geogenic and anthropogenic origin is a global problem. A variety of mutagenicity test procedures has been developed which enable the detection of DNA damage caused by ionizing radiation. In the present study, we investigated the *Allium* test (the widely used plant-based genotoxicity bioassay) for the detection of genetic damage caused γ -radiation. Received data indicate that this method is can be used for environmental biomonitoring. Aim of the present study was the investigation of γ -radiation of the *Allium* test assay.

Materials and methods. The bulbs of the Stuttgarter Riesen onion (*Allium cepa* L., $2n = 16$) were kept in a cool dark place (+4–5 °C). For each sample and control were taken 3 bulbs. Distilled water was used as a control. γ - irradiation of the bulbs was carried out with the *Eu152* for 3 days in doses of 0.3, 1 and 3 Gy. After 3 days, the roots were cut and fixed in Clark's and to be placed in sealable test-tubes for long-time storing in 80% ethanol. The roots were simultaneously hydrolyzed and colored in ceramic crucibles in acetoorcein solution were boiled in the flame of an alcohol lamp. The slides prepared from squashing the root meristems with one drop of 45% acetic acid. The number of dividing cells was determined in 1000 examined cells in the field of view, with phase and chromosome aberration.

Results. The appearance of giant cells, C-mitoses, nuclear buds, fragments, lagging and bridges, disturbances in the work of the fission spindle and micronuclei in irradiation at doses of 3 and 1 Gy were noted.

Conclusion. As a result of the study, it was shown that γ - irradiation of the onion test object (*Allium cepa* L.) with doses of 3, 1 and 0.3 Gy led to the appearance of cytogenetic disorders, the proportion of which significantly differed from the control.

Keywords: *Allium-test; y-radiation; chromosomal aberration; mitotic index*

For citation. Smirnova M.V., Smirnov A.A. Cytogenetic Effects Y-Radiation in the Cells of the Root Meristem of *Allium cepa*. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 2024, vol. 16, no. 2, pp. 113-125. DOI: 10.12731/2658-6649-2024-16-2-760

Введение

Антропогенное загрязнение окружающей среды радионуклидами является глобальной проблемой, поскольку оно может оказывать неблагоприятное воздействие на здоровье людей, а также изменять стабильность экосистем [11]. Одним из ключевых механизмов, с помощью которых радиоактивное облучение приводит к неблагоприятным последствиям в организме человека и в окружающей среде, является повреждение генетического материала [8, 16, 18].

В настоящее время существует значительная неопределенность воздействия малых доз радиации, что делает эту область исследований актуальной. Кроме этого, важно оценивать долгосрочные последствия радиационного облучения живых организмов, включая растения.

Снижение риска воздействия излучений на организм человека является составляющей для решения задач безопасности. Одним из звеньев оценки опасности излучений является экологический мониторинг, поэтому использование тест-систем относится к приоритетным направлениям исследований. Среди биологических объектов растения оказались наиболее чувствительными и эффективными тест-системами, не требующие этического одобрения для проведения исследования, направленного на предотвращение экологического риска [4]. Растения, наиболее часто используемые в таких анализах, включают фасоль (*Vicia faba* L.) [12], традесканцию (*Tradescantia fluminensis* Veil.) [13], кукурузу (*Zea mays* L.) [6] и др.

Широкое применение в методиках биотестирования нашел лук обыкновенный (*Allium cepa* L.) благодаря высокой чувствительности, устойчивой реакции как на молекулярно-клеточном (митотический индекс (МИ), частота микроядер и aberrаций хромосом в клетках), так и организменном (ингибирование роста корней) уровнях, простоте и оперативности методик [9, 10]. Эффективность *Allium*-теста для оценки токсичности почв, донных отложений, воздуха, пресных и морских вод, загрязняемых промышленными и бытовыми сбросами, модельных растворов, качества питьевой воды и т.д. была продемонстрирована во множестве исследований [7, 15, 17, 19]. *Allium test* рекомендован экспертами ВОЗ как стандарт в цитогенетическом мониторинге окружающей среды [20].

Цель. Изучить цитоксичность и генотоксичность гамма-излучения с помощью Аллиум-теста.

Материалы и методы

Луковицы лука репчатого сорта Штутгартен Ризен хранили 2 недели в темном прохладном месте для выравнивания процессов в луковицах. Далее луковицы отбирали по схожему диаметру, осматривали и удаляли сухие чешуйки и корешки. Для каждого варианта опыта и контроля (дистиллированная вода) взяли по три луковицы. Перед экспериментом луковицы проращивали в дистиллированной воде 48 часов для оценки жизнеспособности. Гамма-облучение луковиц осуществлялось изотопом Eu^{152} в течение 72 часов дозами в 3, 1 и 0.3 Гр. Контрольные образцы, находившиеся в том же помещении для создания одинаковых условий в защитной конструкции, получили дозу в 0.01 Гр. Доза регулировалась путем удаления облучаемых объектов от источника излучения. Контрольные луковицы были помещены в конструкцию из свинцовых кирпичей во избежание облучения. Эксперимент проводился при температуре 15°C в темноте для исключения процесса фотосинтеза.

После облучения корешки с луковиц срезали ножом и фиксировали на 24 часа в уксусном алкоголе (96% спирт+ледяная уксусная кислота в пропорциях 3 к 1). После фиксации корешки промывали 3 раза 80% спиртом по часу с последующим хранением в закрывающихся баночках.

Для приготовления препаратов корешки подвергали окрашиванию 1% ацетоорсеином. Корешки помещали в керамические тигли, заливали красителем и нагревали по кипения над пламенем спиртовки для размягчения тканей корешка и лучшего проникновения красителя в клетки тигли закрывали пленкой и оставляли в холодильнике при температуре 4°C на сутки-двое. Далее корешок помещали на предметное стекло, скальпелем отрезали кончик корешка длиной 2-3 мм (с зоной роста), капали каплю 45% уксусной кислоты, накрывали покровным стеклом и салфеткой. Осторожными давящими движениями стеклянной палочки корешок раздавливали для получения монослоя клеток. Избыток уксусной кислоты аккуратно убирали салфеткой и препарат просматривали на увеличении $\times 400$ на микроскопе «Микромед-1, вар. 1-20» (Москва, Россия) с камерой TOUPCAM 2.0 (Ханчжоу, Китай). В каждом препарате подсчитывали около 1000 клеток с отметкой фаз и хромосомных аберраций.

Митотический индекс (МИ) рассчитывали как отношение количества всех делящихся клеток (профаза+метафаза+анафаза+телофаза) на общее количество подсчитанных клеток в препарате, выраженное в процентах.

Все данные вносили в документ в программе Excel, рассчитывали по формуле МИ, потом среднее значение каждого варианта опыта и контроль. Нарушения заносились в таблицу, подсчитывали процент нарушений в каждом варианте опыта и контроле.

Статистический анализ проводили на языке программирования R. Статистически значимые различия сравнивались при $p \leq 0.05$ с использованием тестов ANOVA и Тьюки (достоверно значимая разница).

Результаты и обсуждение

Облучение во всех дозах не вызывало достоверно значимого понижения МИ по сравнению с контролем (Рис. 1).

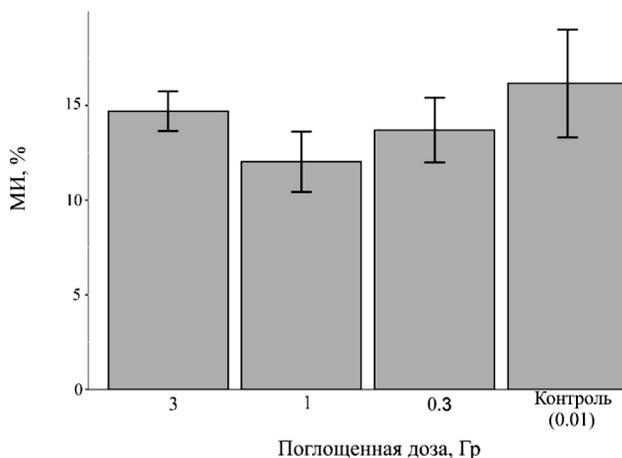


Рис. 1. Показатели митотического индекса меристематических клеток корня А. сера после облучения гамма-радиацией.

3 Гр – 1 вариант опыта, 1 Гр – 2 вариант опыта, 0,3 Гр – 3 вариант опыта

Цитогенетический анализ показал, что с увеличением дозы увеличивается количество aberrаций. При этом количество нарушений в дозах 3 (1 вариант опыта) и 1 Гр (2 вариант опыта) было достоверно выше, чем в контроле и 0,3 Гр (рис. 2).

В основном отмечали появление гигантских клеток, С-митозов, ядерных почек, фрагментов, отставаний и мостов, нарушений в работе вере-

тена деления и микроядер и в вариантах опыта 1 (облучение 3 Гр) и 2 (облучение 1 Гр).

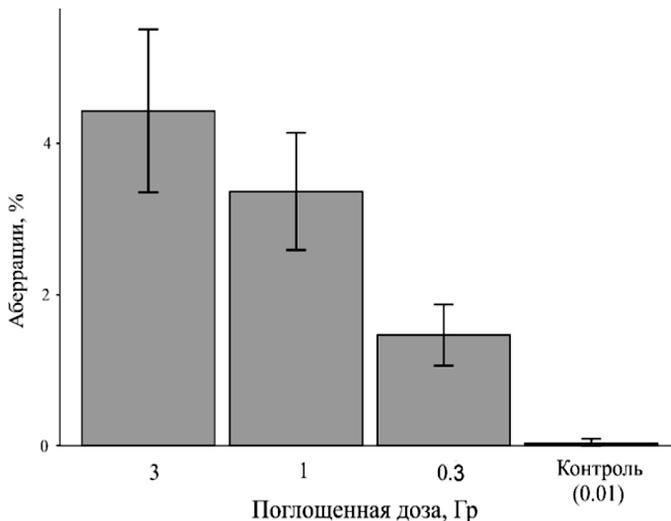


Рис. 2. Доля аберрантных клеток в меристематических клетках корня *A. sepa* после облучения гамма-радиацией.

3 Гр – 1 вариант опыта, 1 Гр – 2 вариант опыта, 0.3 Гр – 3 вариант опыта

Гигантские клетки возникают вследствие нарушений в цитоскелете во время интерфазы, а выпячивание хроматина (ядерные почки), появляются при ингибировании веретена деления и цитокинеза (рис. 3) [14].

Мосты могут появляться по причине разрывов хромосом и хроматид и последующего их слияния, а также липкости хромосом вследствие нарушения работы специальных белков [5].

В некоторых клетках наряду с мостами наблюдались хромосомные фрагменты, отставания и выбросы, которые можно рассматривать как показатели «свежей» хромосомной перестройки [2]. Фрагментация хромосом является признаком разрушения их структуры, связанного с лизированием ферментами молекул ДНК, и служит показателем нестабильности генома. Фрагменты при этом не включаются в формирующиеся дочерние ядра и лизируются ферментами или остаются в цитоплазме клетки в виде микроядер [1].

Отставания хромосом возникают при нарушениях как в самой хромосоме, так и в ахроматиновом веретене деления (рис. 4, 5).

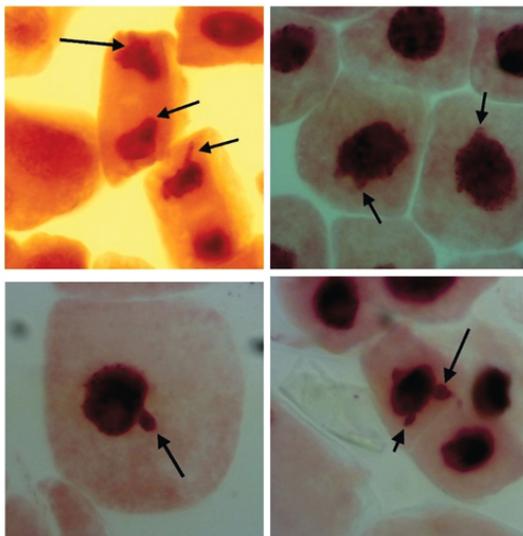


Рис. 3. Появление ядерных почек в меристематических клетках корня *A. serra* после облучения гамма-радиацией

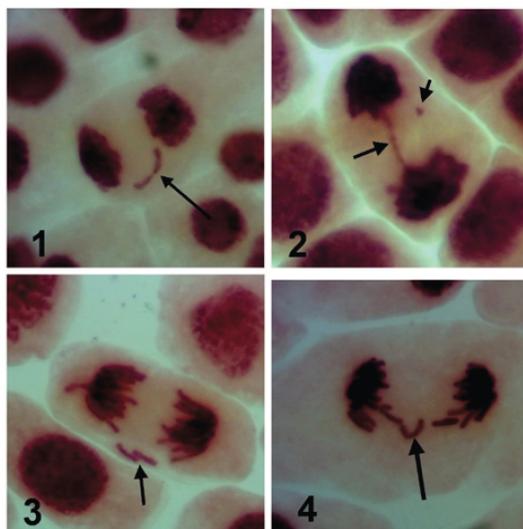


Рис. 4. Появление отставаний хромосом (1), мостов (2) и фрагментов (3 и 4) в меристематических клетках корня *A. serra* после облучения гамма-радиацией

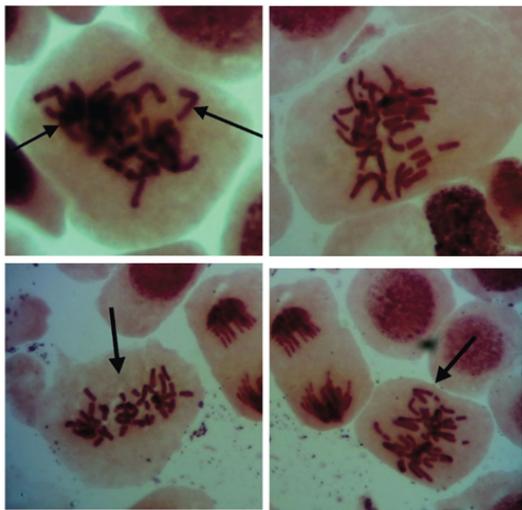


Рис. 5. Появление нарушений в работе веретена деления в меристематических клетках корня *A. cepa* после облучения гамма-радиацией

Таким образом можно сделать вывод, что гамма-облучение луковиц поглощенными дозами 3, 1 и 0,3 Гр обладает негативным действием на деление клетки, проявляющееся в появлении хромосомных и других нарушений достоверно выше, чем в контроле. Митотический индекс достоверно не отличался от контроля, это может происходить из-за некоторой стимуляции деления клеток, уже показанного в источнике [3] под влиянием радиации, однако такое деление может негативно сказываться на общем состоянии клеток, что видно из цитогенетического анализа, такое состояние может выравниваться после удаления объекта от источника облучения.

Заключение

В результате проведенного исследования было показано, что гамма-облучение тест - объекта лука репчатого (*Allium cepa* L.) поглощенными дозами в 3, 1 и 0,3 Гр привело к появлению цитогенетических нарушений, доля которых достоверно отличалась от контроля. Наблюдали появление таких нарушений как ядерные почки, мосты, фрагменты и отстаивания хромосом, С-митоз, нарушение работы веретена деления, появление гигантских клеток, микроядер, что говорит о негативном влиянии гамма-радиации. Достоверного изменения митотического индекса по сравнению с контролем не

происходило. Это может быть связано с некоторой стимуляцией деления клеток, но тем не менее, такое облучение ведет к нарушению работы систем клетки. Исследование может быть полезно для задач биомониторинга.

Список литературы

1. Буторина А. К., Калаев В. Н. Анализ чувствительности различных критериев цитогенетического мониторинга // Экология. 2000. №3. С. 206-210.
2. Калаев В. Н., Попова А. А. Цитогенетические характеристики и морфологические показатели семенного потомства деревьев дуба черешчатого (*Quercus robur* L.), произрастающих на территориях с разным уровнем антропогенного загрязнения // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Химия. Биология. Фармация. 2014. №4. С. 63-72.
3. Трофимова Е. А., Деметьев Д. В., Болсуновский А. Я. Влияние γ -излучения на развитие растений из облученных семян и проростков *Allium cepa* L // Радиационная биология. Радиоэкология. 2019. Т. 59, № 3. С. 293-299.
4. Barbério A., Barros L., Voltolini J. C., Mello M. L. S. Evaluation of the cytotoxic and genotoxic potential of water from the Brazilian river Paraíba do Sul with the *Allium cepa* test // Brazilian Journal of Medical and Biological Research. 2009. Vol. 69(3). P. 837-842. <https://doi.org/10.1007/s11051-013-2220-2>
5. Bonciu E., Firbas P., Fontanetti C. S., Wusheng J., Karaismailoğlu M. C., Liu D., Menicucci F., Pesnya D. S., Popescu A., Romanovsky A. V., Schiff S., Ślusarczyk J., de Souza C. P., Srivastava A., Sutan A. N. Papini A. An evaluation for the standardization of the *Allium cepa* test as cytotoxicity and genotoxicity assay // Caryologia. 2018. Vol. 71. P. 191-209. <https://doi.org/10.1080/00087114.2018.1503496>
6. Bonea D., Bonciu E. Cytogenetic effects induced by the fungicide Royal Flo to maize (*Zea mays* L.) // Caryologia. 2017. Vol. 70(3). P. 195-199. <https://doi.org/10.1080/00087114.2017.1318232>
7. Ennaceur S. Genotoxicity assessment of drinking water from different sources using the *Allium cepa* test procedure // Fresenius environmental bulletin. 2018. Vol. 27(12B). P. 9972-9978.
8. Fesenko S. V., Alexakhin R. M., Geras'kin S. A., Sanzharova N. I., Spirin Y. V., Spiridonov S. I., Gontarenko I. A., Strand P. Comparative radiation impact on biota and man in the area affected by the accident at the Chernobyl nuclear power plant // J. Environ. Radioact. 2005. Vol. 80. P. 1e25. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2004.08.011>
9. Fiskesjo G. The *Allium* test as a standard for environmental monitoring // Hereditas. 1985. Vol. 102. P. 99-112.
10. Fiskesjo G. The *Allium* test—an alternative in environmental studies: the relative toxicity of metal ions // Mutat. Res. Fund. Mol. M. 1988. Vol. 197. P. 243-260.

11. Hamlin H. J., Guillette L. J. Jr. Birth defects in wildlife: the role of environmental contaminants as inducers of reproductive and developmental dysfunction // *Syst. Biol. Reprod. Med.* 2010. Vol. 56. P. 113-121. <https://doi.org/10.3109/19396360903244598>
12. Kursheed S., Raina A., Amin Laskar R., Khan S. Effect of gamma radiation and EMS on mutation rate, their effectiveness and efficiency in faba bean (*Vicia faba* L.) // *Caryologia.* 2018. Vol. 71 (4). P. 397-404. <https://doi.org/10.1080/00087114.2018.1485430>
13. Misík M., Krupitza G., Misíkova K., Micieta K., Nersesyan A., Kundi M., Knasmueller S. The Tradescantia micronucleus assay is a highly sensitive tool for the detection of low levels of radioactivity in environmental samples // *Environmental Pollution.* 2016. Vol. 219. P. 1044-1048. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2016.09.004>
14. Mushtaq W., Ain Q., Siddiqui M. B., Hakeem K. R. Cytotoxic allelochemicals induce ultrastructural modifications in *Cassia tora* L. and mitotic changes in *Allium cepa* L.: a weed versus weed allelopathy approach // *Protoplasma.* 2019. Vol. 256. P. 857-871. <https://doi.org/10.1007/s00709-018-01343-1>
15. Palmieri M. J., Andrade-Vieira L. F., Cardoso T. M. V., De Faria E. M. W., Lubber J., Davide L. C., Marcussi S. Cytogenotoxic effects of spent pot liner (spl) and its main components on human leukocytes and meristematic cells of *Allium cepa* // *Water Air Soil Pollut.* 2016. Vol. 227 (156). P. 1-10. <https://doi.org/10.1007/s11270-016-2809-z>
16. Richardson D. B., Cardis E., Daniels R. D., Gillies M., O'Hagan J. A., Hamra G. B., Haylock R., Laurier D., Leuraud K., Moissonnier M., Schubauer-Berigan M. K., Thierry-Chef I., Kesminiene A. Risk of cancer from occupational exposure to ionising radiation: retrospective cohort study of workers in France, the United Kingdom, and the United States (INWORKS) // *BMJ.* 2015. Vol. 351. P. h5359. <https://doi.org/10.1136/bmj.h5359>
17. Sartaj A. B., Guangyu C., Fusheng L., Adarsh P. V. Biomonitoring of genotoxicity of industrial wastes using plant bioassays // *Bioresource Technology Reports.* 2012. Vol. 6. P. 207-216. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.01.003>
18. Spycher B. D., Lupatsch J. E., Zwahlen M., Roosli M., Niggli F., Grotzer M. A., Rischewski J., Egger M., Kuehni C. E. Background ionizing radiation and the risk of childhood cancer: a census-based nationwide cohort study // *Environ. Health Perspect.* 2015. Vol. 123. P. 622e628. <https://doi.org/10.1289/ehp.1408548>
19. Sudhakar R., Ninge Gowda K. N., Venu G. Mitotic abnormalities induced by silk dyeing industry effluents in the cells of *Allium cepa* // *Cytologia.* 2001. Vol. 66(3). P. 235-239. <https://doi.org/10.1508/cytologia.66.235>

20. WHO. World Health Organization monographs on selected medicinal plants // World Health Organization. Geneva. 1999. Vol. 1. 193 p.

References

1. Butorina A.K., Kalaev V.N. Sensitivity analysis of different criteria of cytogenetic monitoring. *Ekologiya* [Ecology], 2000, no. 3, pp. 206-210.
2. Kalaev V.N., Popova A.A. Cytogenetic characteristics and morphological indices of seed progeny of trees of oak (*Quercus robur* L.) growing in areas with different levels of anthropogenic pollution. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Khimiya. Biologiya. Farmatsiya*, 2014, no. 4, pp. 63-72.
3. Trofimova E. A., Dementiev D. V., Bolsunovsky A. Y. Effect of γ -radiation on the development of plants from irradiated seeds and seedlings of *Allium cepa* L. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya* [Radiation Biology. Radioecology], 2019, vol. 59, no. 3, pp. 293-299.
4. Barbério A., Barros L., Voltolini J.C., Mello M.L.S. Evaluation of the cytotoxic and genotoxic potential of water from the Brazilian river Paraíba do Sul with the *Allium cepa* test. *Brazilian Journal of Medical and Biological Research*, 2009, vol. 69(3), pp. 837-842. <https://doi.org/10.1007/s11051-013-2220-2>
5. Bonciu E., Firbas P., Fontanetti C. S., Wusheng J., Karaismailoğlu M. C., Liu D., Menicucci F., Pesnya D.S., Popescu A., Romanovsky A.V., Schiff S., Ślusarczyk J., de Souza C. P., Srivastava A., Sutan A. N. Papini A. An evaluation for the standardization of the *Allium cepa* test as cytotoxicity and genotoxicity assay. *Caryologia*, 2018, vol. 71, pp. 191-209. <https://doi.org/10.1080/00087114.2018.1503496>
6. Bonea D., Bonciu E. Cytogenetic effects induced by the fungicide Royal Flo to maize (*Zea mays* L.). *Caryologia*, 2017, vol. 70(3), pp. 195-199. <https://doi.org/10.1080/00087114.2017.1318232>
7. Ennaceur S. Genotoxicity assessment of drinking water from different sources using the *Allium cepa* test procedure. *Fresenius environmental bulletin*, 2018, vol. 27(12B), pp. 9972-9978.
8. Fesenko S.V., Alexakhin R.M., Geras'kin S.A., Sanzharova N.I., Spirin Y.V., Spiridonov S.I., Gontarenko I.A., Strand P. Comparative radiation impact on biota and man in the area affected by the accident at the Chernobyl nuclear power plant. *J. Environ. Radioact*, 2005, vol. 80, 1e25. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2004.08.011>
9. Fiskeşjo G. The *Allium* test as a standard for environmental monitoring. *Hereditas*, 1985, vol. 102, pp. 99-112.
10. Fiskeşjo G. The *Allium* test—an alternative in environmental studies: the relative toxicity of metal ions. *Mutat. Res. Fund. Mol. M*, 1988, vol. 197, pp. 243-260.

11. Hamlin H.J., Guillette L.J.Jr. Birth defects in wildlife: the role of environmental contaminants as inducers of reproductive and developmental dysfunction. *Syst. Biol. Reprod. Med*, 2010, vol. 56, pp. 113-121. <https://doi.org/10.3109/19396360903244598>
12. Kursheed S., Raina A., Amin Laskar R., Khan S. Effect of gamma radiation and EMS on mutation rate, their effectiveness and efficiency in faba bean (*Vicia faba* L.). *Caryologia*, 2018, vol. 71, no. 4, pp. 397-404. <https://doi.org/10.1080/00087114.2018.1485430>
13. Misík M., Krupitza G., Misíková K., Micieta K., Nersesyan A., Kundi M., Knasmueller S. The Tradescantia micronucleus assay is a highly sensitive tool for the detection of low levels of radioactivity in environmental samples. *Environmental Pollution*, 2016, vol. 219, pp. 1044-1048. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2016.09.004>
14. Mushtaq W., Ain Q., Siddiqui M.B., Hakeem K.R. Cytotoxic allelochemicals induce ultrastructural modifications in *Cassia tora* L. and mitotic changes in *Allium cepa* L.: a weed versus weed allelopathy approach. *Protoplasma*, 2019, vol. 256, pp. 857-871. <https://doi.org/10.1007/s00709-018-01343-1>
15. Palmieri M.J., Andrade-Vieira L.F., Cardoso T.M. V., De Faria E.M.W., Luber J., Davide L.C., Marcussi S. Cytogenotoxic effects of spent pot liner (spl) and its main components on human leukocytes and meristematic cells of *Allium cepa*. 2016, *Water Air Soil Pollut*, vol. 227, no. 156, pp. 1-10. <https://doi.org/10.1007/s11270-016-2809-z>
16. Richardson D.B., Cardis E., Daniels R.D., Gillies M., O'Hagan J.A., Hamra G.B., Haylock R., Laurier D., Leuraud K., Moissonnier M., Schubauer-Berigan M. K., Thierry-Chef I., Kesminiene A. Risk of cancer from occupational exposure to ionising radiation: retrospective cohort study of workers in France, the United Kingdom, and the United States (INWORKS). *BMJ*, 2015, vol. 351, P. h5359. <https://doi.org/10.1136/bmj.h5359>
17. Sartaj A. B., Guangyu C., Fusheng L., Adarsh P. V. Biomonitoring of genotoxicity of industrial wastes using plant bioassays. *Bioresource Technology Reports*, 2012, vol. 6, pp. 207-216. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.01.003>
18. Spycher B.D., Lupatsch J.E., Zwahlen M., Roosli M., Niggli F., Grotzer M.A., Rischewski J., Egger M., Kuehni C.E. Background ionizing radiation and the risk of childhood cancer: a census-based nationwide cohort study. *Environ. Health Perspect*, 2015, vol. 123, 622e628. <https://doi.org/10.1289/ehp.1408548>

19. Sudhakar R., Ninge Gowda K.N., Venu G. Mitotic abnormalities induced by silk dyeing industry effluents in the cells of *Allium cepa*. *Cytologia*, 2001, vol. 66, no. 3, pp. 235-239. <https://doi.org/10.1508/cytologia.66.235>
20. WHO. World Health Organization monographs on selected medicinal plants. World Health Organization, Geneva, 1999, vol. 1, 193 p.

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Смирнова Мария Васильевна, научный сотрудник, лаборатория медицинских и биологических технологий
*Федеральный исследовательский центр «Кольский научный центр»
ул. Ферсмана, 14, г. Апатиты, 184209, Российская Федерация
zbe3do4et@mail.ru*

Смирнов Андрей Анатольевич, ведущий инженер, региональная лаборатория радиационного контроля
*Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И. В. Тананаева
Академгородок, 26а, г. Апатиты, 184209, Российская Федерация
adstud@mail.ru*

DATA ABOUT THE AUTHORS

Maria V. Smirnova, Researcher Assistant, Laboratory of Medical and Biological Technologies
*Federal Research Centre Kola Science Centre
14a, Fersman Str., Apatity, 184209, Russian Federation
zbe3do4et@mail.ru
SPIN-code: 3923-0204
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9920-1114>
ResearcherID: A-7268-2019*

Andrey A. Smirnov, Leading Engineer, Regional Radiation Control Laboratory
*Tananaev Institute of Chemistry and Technology of Rare Elements and Mineral Raw Materials
26a, Akademgorodok, Apatity, 184209, Russian Federation
adstud@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-1029-6530>*

Поступила 31.07.2023

После рецензирования 10.09.2023

Принята 20.09.2023

Received 31.07.2023

Revised 10.09.2023

Accepted 20.09.2023