

О.Г. Чередниченко* , С.К. Нуралиев ,

А.Л. Пилюгина , Д.Э. Азизбекова 

Институт генетики и физиологии, Казахстан, г. Алматы

*e-mail: cherogen70@mail.ru

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАСТИТЕЛЬНОЙ ТЕСТ-СИСТЕМЫ *ALLIUM CEPA* ДЛЯ ОЦЕНКИ РАДИАЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Анализ радиационного воздействия включает биологическую индикацию и биологическую дозиметрию. Проведение таких исследований с использованием клеток человека и животных в условиях *in vivo* и *in vitro* не всегда возможно и безопасно. Использование высших растений в качестве тест-систем для оценки воздействия мутагенных факторов в окружающей среде имеет многочисленные преимущества и первичная биоиндикация радиационного воздействия с их использованием может быть весьма востребована. Поэтому проведено сравнительное цитогенетическое исследование радиочувствительности двух тест-систем – растительной *Allium cepa* и традиционной – культура лимфоцитов периферической крови человека. Проведена оценка цитогенетических повреждений, вызванных кратковременным внешним облучением в диапазоне малых доз 0,01–0,7 Гр. Представленная работа показала высокую чувствительность *Allium*-тест по индукции цитогенетических эффектов в меристематических клетках корней лука. Наиболее эффективно ответ на ионизирующее облучение демонстрирует индукция микроядер в интерфазных клетках. Показана достоверная положительная корреляция между частотой хромосомных нарушений в лимфоцитах и микроядрами в интерфазных клетках (+0,87), а также частотой хромосомных нарушений в метафазах лимфоцитов и корнях лука (+0,93). Полученные результаты подтверждают возможность использования тест-системы *Allium cepa* в качестве подходящего индикатора для первичной биологической оценки генотоксичности, возникающей при внешнем воздействии γ -излучения.

Ключевые слова: хромосомные аберрации, микроядра, *Allium-test*, интерфазные клетки, ионизирующее излучение.

O.G. Cherednichenko*, S.K. Nuraliev, A.L. Pilyugina, D.E. Azizbekova

Institute of Genetics and Physiology, Kazakhstan, Almaty

*e-mail: cherogen70@mail.ru

Comparative analysis of the effectiveness of *Allium cepa* plant test system for the detection of cytogenetic disorders in radiation exposure

Radiation exposure analysis includes biological indication and biological dosimetry. Conducting such studies using human and animal cells under *in vivo* and *in vitro* conditions is not always possible or safe. The use of higher plants as test systems for assessing the impact of mutagenic factors in the environment has numerous advantages and primary bioindication of radiation exposure using them may be in great demand. Therefore, a comparative cytogenetic study of the radiosensitivity of two test systems was carried out – the plant *Allium cepa* and the conventional – a culture of human peripheral blood lymphocytes. An assessment was made of cytogenetic damage caused by short-term external irradiation in the range of low doses of 0.01–0.7 Gy. The presented work showed the high sensitivity of the *Allium* test for the induction of cytogenetic effects in the meristematic cells of onion roots. The most effective response to ionizing radiation is demonstrated by the induction of micronuclei in interphase cells. A significant positive correlation was shown between the frequency of chromosomal abnormalities in lymphocytes and micronuclei in interphase cells (+0.87), as well as the frequency of chromosomal abnormalities in metaphases of lymphocytes and onion roots (+0.93). The results obtained confirm the possibility of using the *Allium cepa* test system as a suitable indicator for the primary biological assessment of genotoxicity arising from external exposure to γ -radiation.

Key words: chromosomal aberrations, micronuclei, *Allium-test*, interphase cells, ionizing radiation.

О.Г. Чередниченко*, С.К. Нұралиев, А.А. Пилюгина, Д.Э. Азизбекова

Генетика және физиология институты, Қазақстан, г. Алматы

*e-mail: chero70@mail.ru

Сәулелену кезіндегі цитогенетикалық бұзылыстарды анықтау үшін *Allium* сера өсімдік тест жүйесін қолдану тиімділігін салыстырмалы талдау

Радиациялық әсерді талдау биологиялық индикацияны және дозиметрияны қамтиды. In vivo және in vitro жағдайында адам мен жануарлар клеткаларын қолданып зерттеулер жүргізу көпшілік жағдайда мүмкін емес және қауіпсіз болмайды. Қоршаған ортаның мутагендік факторларының әсерін бағалау үшін тест-жүйе ретінде жоғары сатыдағы өсімдіктерді пайдалану көптеген артықшылықтарға ие және оларды қолдану арқылы радиациялық әсердің бастапқы биоиндикациясы зерттеу үлкен сұранысқа ие болуы мүмкін. Осыған байланысты, екі тест-жүйе арқылы, яғни өсімдік негізіндегі *Allium* сера және дәстүрлі, адамның перифериялық қан лимфоциттері культурасының радиосезімталдылыққа салыстырмалы цитогенетикалық зерттеу жүргізілді. 0,01–0,7 Гр төмен дозалар диапазонында қысқа мерзімді сыртқы сәулеленуден туындаған цитогенетикалық бұзылыстарға баға берілді. Бұл жұмыста пияз тамырларының меристемалық клеткаларында цитогенетикалық әсерлерді индукциялауда *Allium* тест жоғары сезімталдылық көрсетті. Иондаушы сәулеленуге ең тиімді жауап интерфаза клеткаларында микроядролардың индукциясы арқылы көрсетіледі. Лимфоциттердегі хромосомалық ауытқулардың жиілігі мен интерфазалық клеткалардағы микроядролардың жиілігі (+0,87), сондай-ақ лимфоциттер мен пияз тамырының метафазасында хромосома ауытқуларының жиілігі (+0,93) арасында айтарлықтай оң корреляция көрсетілді. Алынған нәтижелер *Allium* сера тест жүйесін γ -сәулеленудің сыртқы әсерінен туындайтын генотоксикалық әсерді бастапқы биологиялық бағалау үшін қолайлы индикатор ретінде пайдалану мүмкіндігін растайды.

Түйін сөздер: хромосомалық аберрациялар, микроядролар, *Allium*-тест, фазааралық жасушалар, иондаушы сәулелер.

Введение

На протяжении всей истории существования живых организмов на Земле они постоянно подвергаются воздействию естественного фона ионизирующего излучения. Однако технический прогресс и антропогенная деятельность человека (испытания ядерного оружия, добыча радиоактивных руд, эксплуатация атомных электростанций, аварийные ситуации с выбросом радиоактивных изотопов, использование источников ионизирующего излучения в промышленности и медицине) вызывают повышение искусственной радиоактивности. Это приводит к негативному воздействию ионизирующего излучения на людей, флору и фауну [1]. Для некоторых регионов Казахстана (территории бывшего СИП, районы добычи и залегания урановых руд и др.) данная проблема особенно актуальна.

Радиационно-индуцированные повреждения ДНК являются первичным проявлением нарушений биологических систем, приводящим к риску клеточной гибели, мутагенезу, канцерогенезу, возникновению генетической нестабильности и др. На клеточном уровне эти повреждения ДНК можно визуализировать в виде хромосомных аберраций на стадии метафазы во время деления клеток. Несколько опосредованным, но в то же

время более универсальным способом учета возникающих повреждений является регистрация микроядер. В основном они являются следствием хромосомных нарушений и преимущественно возникают из ацентрических фрагментов или поврежденных хромосом (мутагенный эффект) или отставших в анафазе хромосом (анеугенный эффект), но также могут быть результатом деструкции интерфазного хроматина [2]. Т.е., микроядра являясь результатом повреждения ДНК могут быть визуализированы в интерфазных клетках различного типа, деление в которых наблюдать (для анализа хромосомных аберраций) технически невозможно. Поэтому тесты на микроядра наряду с хромосомными аберрациями применяются как эффективные генетические системы биоанализа и биоиндикации.

Воздействие ионизирующего излучения на клетки человека изучено достаточно широко. Классической и обязательной тест-системой для оценки влияния радиационного воздействия в системах in vitro и in vivo являются лимфоциты периферической крови человека. Одним из достоинств этой тест-системы является то, что по наблюдаемым типам аберраций можно достаточно определенно идентифицировать тип мутагенного воздействия. Наличие в спектре повышенного уровня аберраций хромосомного

типа (парных разрывов и фрагментов, дицентрических хромосом и центрических колец) может свидетельствовать о радиационной природе генотоксичности, преобладание аберраций хроматидного типа свидетельствует о ее химической или вирусной природе. Использование этого теста далеко не всегда технически приемлемо и целесообразно. Кроме того, для идентификации, характеристики и степени генотоксичности исследуемого фактора, как правило, используется несколько тест-систем адекватного уровня чувствительности и что не мало важно, разного уровня биологической организации.

Использование высших растений в качестве генетических моделей и тест-систем для оценки воздействия загрязнителей в окружающей среде имеет некоторые преимущества, по сравнению с животными моделями. Они связаны не только с их чувствительностью к мутагенным факторам, но и особенностями репродуктивной системы, возможностью использования условий *in vivo* и *in vitro* без этических ограничений и возможностью оценки нескольких генетических параметров в клетках разных органов и тканей (листья, корни, гаметогенез, пыльцевые зерна и др.). Также существенное значение имеет стандартизация методов в контролируемых лабораторных условиях, не требующая больших объемов образцов и низкой себестоимостью.

Изучение воздействия радиации на растения представляет интерес для сельского хозяйства, экологии и космических исследований. Естественно растения не могут проявлять такие же стохастические эффекты на ионизирующие излучения, как млекопитающие и человек [3], однако их использование может предоставить адекватные информационные данные, которые будут служить отправной точкой для использования других, более сложных и дорогостоящих биологических систем [4]. И в некоторых литературных источниках продемонстрированы сопоставимые результаты по возникающим генетическим аномалиям в растительных и животных системах при анализе химических генотоксикантов [5, 6, 7].

Для оценки радиационной токсичности объектов окружающей среды предлагается использовать систему *Allium-test* [8, 9, 10]. Закономерности роста и развития корней *Allium cepa* тесно связаны с уровнем загрязнений тестируемых объектов; фазы митотического цикла четко выражены и их легко идентифицировать; лук имеет небольшой и стабильный кариотип ($2n = 16$) с крупными и морфологически хорошо различимы-

ми хромосомами. При этом спонтанные хромосомные повреждения встречаются достаточно редко [4, 11]. Более того в последние годы набирает популярность так называемый цитомный анализ, который основан на регистрации ядерных аномалий в интерфазных клетках, которые также демонстрируют четкую реакцию на уровень тестируемых загрязнителей окружающей среды. Таким образом, цитогенетические маркеры *Allium cepa* включают митотический индекс, микроядра, хромосомные аберрации и цитогенетические нарушения на разных стадиях митоза и ядерные аномалии. На основании этих критериев *Allium-test*, стал подходящей генетической моделью для оценки цито-генотоксического потенциала загрязняющих факторов, рекомендован ВОЗ как стандарт в цитогенетическом мониторинге экологических факторов и был принят Международной программой по биоанализу растений (IPPB) [12, 13].

Allium-test можно использовать в двух вариантах, анализ луковиц и семян [14, 15]. При использовании луковиц в анализ включаются такие дополнительные параметры, как скорость роста и длина корней. В этом случае должны использоваться небольшие луковицы или луковичный севок приблизительно одного размера и массы. Семена удобно использовать, так как они являются биологически покоящимися, генетически и физиологически однородными тест-объектами. Классически исследования с использованием *Allium-test* проводят для оценки химической генотоксичности [9, 16], воздействие ионизирующего излучения на этой тест-системе изучается довольно редко [4, 17, 18]. Тем не менее, использование *Allium-test* показало хорошие результаты при оценке цито- и генотоксичности γ -излучения и быстрых нейтронов [19, 20], тяжелых ионов высоких энергий [21] и электромагнитного излучения [22, 15] по таким критериям, как длина корня, хромосомные аберрации, микроядра и митотический индекс [23, 24]. Однако в этих исследованиях авторы использовали высокие дозы облучения (выше 1,5–2 Гр). Изучение воздействия малых доз ионизирующих излучений проводились лишь в единичных случаях [25, 26, 27, 28] и выявило цитогенетический ответ прорастающих корней семян *Allium cepa*.

Цель настоящего исследования заключалась в оценке влияния низкодозового γ -облучения (0,01–0,7 Гр), на цитогенетические параметры прорастающих корней семян лука (*Allium cepa*) и сравнение их чувствительности с классиче-

ским тестом на хромосомные aberrации в культуре лимфоцитов человека.

Эти данные имеют большое значение, поскольку могут показать биологическую реакцию первых клеточных потомков растения на воздействие радиации и возможность его использования для построения кривых доза-реакция и в дальнейшем первой и быстрой идентификации величины радиационного воздействия, проведения биодозиметрии и оценки радиологических последствий, связанных с выбросом радиоактивных материалов в окружающую среду.

Материалы и методы исследования

Воздействие низких доз γ -излучения исследовали с помощью двух тест-систем – изучение цитогенетических нарушений в *Allium-test* на разных стадиях клеточного цикла и анализ хромосомных aberrаций в культурах лимфоцитов человека.

Allium-test. Для изучения цитогенетических нарушений в *Allium-test* облученные разными дозами γ -излучения семена лука проращивали в чашках Петри при температуре 22-24°C (в течение 48-72 часов). У 2-3 см корешков отрезали кончик длиной 1-2 см и фиксировали в упрощенном фиксаторе Карнуа (96% этиловый спирт: ледяная уксусная кислота – 3:1) в течение 4-24 ч. Гидролизацию в 1N HCl проводили в течение 8-10 мин при 60°C и промывали в дистиллированной воде. Окрашивали раствором Орсеина в кипящей водяной бане 6-12 минут, отрезали густо окрашенный кончик длиной 1-2 мм и готовили давленные препараты в 45% уксусной кислоте [10, 29]. Цитогенетический анализ проводили под микроскопом ZeissAxioLabA.1 и учитывали все встречающиеся нарушения на разных стадиях клеточного деления с фотодокументацией наиболее характерных нарушений. В интерфазных клетках частоту микроядер рассчитывали к общей сумме проанализированных клеток (Мя,%). На стадии метафазы учитывали микроядра, выпавшие хромосомы и С-метафазы. В ана-телофазном анализе фиксировали частоту отставших/выпавших хромосом и мостов на этих стадиях к общей сумме ана-телофаз на препарате. Также во всех вариантах проводили расчет митотического индекса $MI = (\Sigma(P+M+A+T)/n) * 100\%$, где (P, M, A, T) сумма клеток находящихся на стадиях клеточного деления (профаза, метафаза, анафаза, телофаза, соответственно), n – общее число проанализированных клеток.

Культивирование лимфоцитов человека и приготовление препаратов. Образец цельной крови (0,5 мл) добавляли в культуральную среду (4,5 мл), состоящую из 76% питательной среды RPMI-1640 + глутамин (2 mM) (Sigma Aldrich, США), 24% фетальной бычьей сыворотки (Sigma Aldrich, США) и пенициллина/стрептомицина 100 ЕД/мл. Выделение лимфоцитов стимулировали 2% РНА (Gibco). Клетки инкубировали в течение 48 ч в CO₂-инкубаторе при 37°C. За 2 ч до фиксации в среду добавляли колхицин (Пан Эко, Россия; конечная концентрация = 0,8 мкг/мл). Гипотоническую обработку клеток проводили 0,075 М KCl на водяной бане при 37°C в течение 15 мин с последующей трехкратной фиксацией смесью метилового спирта и ледяной уксусной кислоты (3/1). Подготовленную клеточную суспензию наносили на обезжиренные, влажные, охлажденные предметные стекла. Препараты метафазных хромосом равномерно окрашивали 4 %-ным раствором Романовского-Гимзы (Merck, Германия) в течение 5 мин, промывали дистиллированной водой и высушивали [30].

Цитогенетический анализ метафазных хромосом проводили под микроскопом Zeiss Axioscop 40 с масляной иммерсией и увеличением 16×100 и моторизованным микроскопом Zeiss AxioImiger Z.2 с программным обеспечением Metafer-4 с масляной иммерсией и увеличением 10×63. Оценивали количество клеток с aberrациями, а также соотношение количества и типов aberrаций на 100 анализируемых метафаз. Подсчитывали все типы хромосомных аномалий, выявляемых при рутинном окрашивании. Микроскопический анализ метафазных пластинок проводился в соответствии с общепринятыми критериями отбора и анализа препаратов. Для каждого образца анализировали до 200 клеток. При анализе полученных данных использовали стандартные методы статистического анализа.

Обработка γ -излучением. Семена *Allium cepa* в стадии покоя и образцы цельной крови добровольных здоровых доноров подвергали радиационной обработке в пластиковых флаконах на аппарате дистанционной лучевой терапии «Терагам» с зарядом Co⁶⁰, номинальной энергией ускоренных электронов 1,5 МэВ (НИИ онкологии и радиологии, Алматы, Казахстан). Были использованы дозы – 0,01; 0,03; 0,07; 0,1; 0,3; 0,7 Гр с мощностью 0,1Гр/мин и температуре окружающей среды +20-25 °С.

Результаты и их обсуждение

Увеличение радиационной нагрузки и ухудшение качества окружающей среды влияют и на людей и на природу, что приводит к увеличению мутационного процесса и генетическим изменениям биоорганизмов. Для оценки риска и определения степени повреждения живых существ разработаны различные молекулярные, генетические и биохимические тесты. Однако многие из них дороги, трудоемки и занимают достаточно много времени. В этом

смысле, краткосрочные и простые биотесты, выявляющие нарушения, вызываемые исследуемыми факторами, получают все большее распространение, по крайней мере, на первом этапе исследований или для быстрой оценки возникшей ситуации. И растения уникальны в своей способности, служить в качестве индикатора *in situ* для генотоксикантов окружающей среды [34].

Результаты цитогенетического анализа воздействия разных доз γ -излучения в *Allium-test* представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Воздействие разных доз γ -излучения с помощью *Allium-test*

| Доза облучения, Гр | Всего клеток | Интерфаза, % | Метафаза, % | Ана-телофаза, % | MI |
|--------------------|--------------|--------------|-------------|-----------------|------------|
| 0,01 | 3000 | 0,11±0,06 | 0 | 0 | 10,1±0,55 |
| 0,03 | 3000 | 0,22±0,10 | 0 | 0 | 9,7±0,54 |
| 0,07 | 3000 | 0,23±0,08 | 1,1±0,10 | 2,17±0,27* | 13,6±0,62 |
| 0,1 | 3000 | 0,45±0,07* | 2,5±0,28 | 3,57±0,34* | 9,9±0,55 |
| 0,3 | 3000 | 0,56±0,10* | 6,67±0,30 | 8,33±0,20* | 10,7±0,56 |
| 0,7 | 3000 | 0,69±0,15* | 13,3 | 8,89±0,52* | 12,9±0,61 |
| контроль | 1500 | 0,08±0,07 | 0 | 0,3±0,10 | 19,00±1,00 |

* $p \leq 0,01$

В *Allium-test* учитывали все встречающиеся цитогенетические нарушения на разных стадиях клеточного деления. В клетках на стадии интерфазы преимущественным типом нарушений являлись микроядра. На стадиях метафазы, анафазы и телофазы кроме микроядер встречались также и хромосомные нарушения, которые были представлены фрагментами (результат разрывов, делеций и транслокаций), мостами и отставшими или выпавшими хромосомами. Эти типы нарушений связаны с не расхождением, например, дицентрических хромосом, нарушением поведения хромосом на веретене деления или с повреждением самого веретена деления (Рисунок 1).

Основные эффекты γ -облучения, наблюдаемые в меристематических клетках корней прорастающих семян *Allium cepa*, включают усиление индукции микроядер в интерфазных клетках, хромосомных нарушений на стадии метафазы и цитогенетических нарушений в ана-телофазах. Количество исследуемых аномалий носит хоть и дозозависимый, но нелинейный характер и достоверно отличается от контрольного уровня. В

диапазоне исследуемых доз (0,01-0,7 Гр) частота микроядер достаточно точно описывается полиномиальным уравнением (Рисунок 2). Митотический индекс клеток после облучения семян, несколько снижен, но не проявляет зависимости от дозы облучения.

Результаты цитогенетического анализа воздействия разных доз γ -излучения на лимфоциты периферической крови человека представлены в таблице 2.

В лимфоцитах человека учитывали все аберрации хромосом регистрируемые на стадии метафазы. Спектр учитываемых аномалий был достаточно широк и включал аберрации хромосомного и хроматидного типов. Аберрации хромосомного типа были представлены двойными разрывами и фрагментами, центрическими и ацентрическими кольцами, дицентриками и транслокациями, хроматидного типа – одиночными разрывами, фрагментами и обменами. Частота аберраций хромосом в лимфоцитах человека ожидаемо носит дозозависимый характер с плато в области доз 0,1-0,3 Гр [31,32,33].

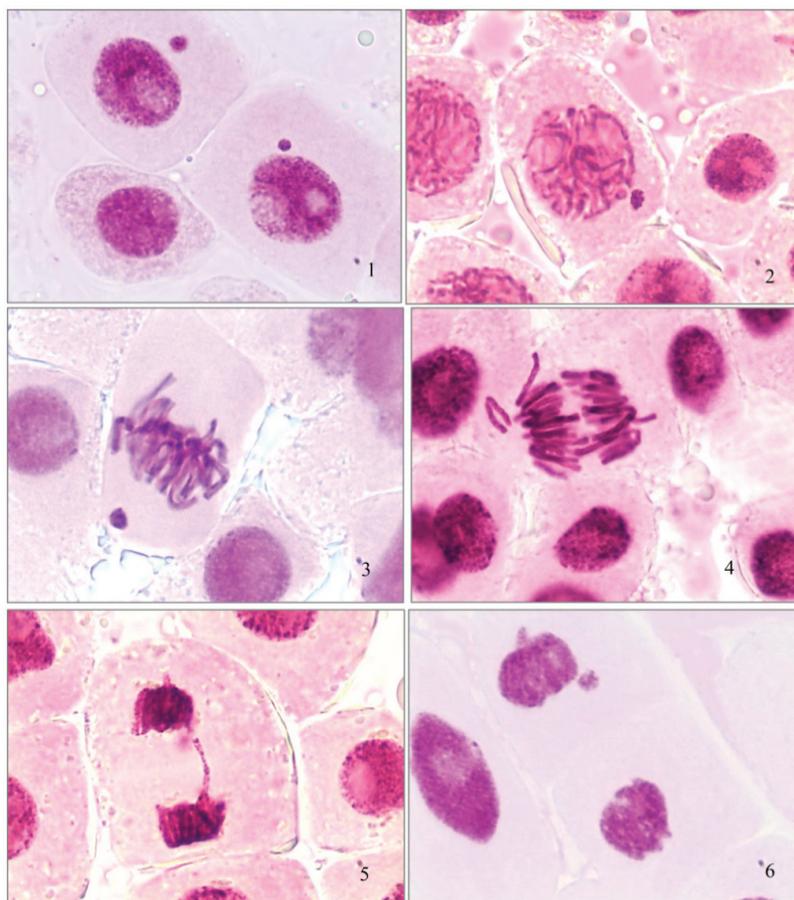


Рисунок 1 – Типы цитогенетических нарушений при проведении *Allium test*
1 – интерфазные клетки с микроядрами; 2 – микроядро в профазе; 3 – микроядро в метафазе;
4 – выпавшая хромосома в анафазе; 5 – хромосомный мост в телофазе; 6- микроядро в телофазе



Рисунок 2 – Моделирование доза-эффект частоты микроядер в интерфазных клетках в тест- системе *Allium cepa*

Таблица 2 – Воздействие разных доз γ -излучения на лимфоциты периферической крови человека

| Доза облучения, Гр | Всего аберраций (%) | Хромосомного типа (%) | Хроматидного типа (%) |
|--------------------|---------------------|-----------------------|-----------------------|
| 0,01 | 3,9±0,61 | 2,4±0,48 | 1,5±0,38 |
| 0,03 | 4,3±0,64* | 2,9±0,53* | 1,4±0,38 |
| 0,07 | 5,4±0,71* | 3,3±0,56* | 2,1±0,44 |
| 0,1 | 6,0±0,75* | 3,7±0,61* | 2,3±0,47 |
| 0,3 | 6,1±0,76* | 3,9±0,61* | 2,2±0,46 |
| 0,7 | 14,2±1,10* | 12,1±1,03* | 2,1±0,44 |
| контроль | 1,58±0,39 | 0,67±0,26 | 0,91±0,30 |

* $p \leq 0,01$

В проведенном исследовании оба сравниваемых теста показали схожую степень цитогенетического ответа, не смотря на их разную радиочувствительность. *Allium-test* показал довольно высокую чувствительность по критерию образования микроядер в интерфазных клетках. Использование *Allium-test* с анализом микроядер в интерфазных клетках и анализа нарушений на стадиях анафазы-телофазы на этих же препаратах является наиболее оптимальным. Он является более быстрым и технически менее сложным, по сравнению с анализом хромосомных аберраций на стадии метафазы с применением колхицина.

Чувствительность и корреляция тест-систем, которые используют для оценки возможной опасности радиационного воздействия или факторов окружающей среды, имеют первостепенное значение для более точного определения потенциальных рисков или экстраполяции полученных результатов на другие организмы и человека в том числе. Чувствительность используемых тест-систем различна. Она зависит от разрешающей способности самой тест-системы [35], но также немаловажное значение имеет тип мутагенного воздействия, вид анализируемых клеток, их пролиферативная активность и др. Поэтому был выполнен корреляционный анализ результатов проведенного тестирования на системах разного уровня организации. Выявлена корреляция между частотой хромосомных нарушений в лимфоцитах и частотой микроядер в интерфазных клетках (+0,82), а также частотой хромосомных нарушений в метафазах лимфоцитов и корнях лука (+0,94). Аналогичные данные по корреляции этих тест-систем были выявлены при анализе генотоксичности загрязнений образцов воды и водных вытяжек почв региона г.Кентау на культурах лимфоцитов человека и

частотой нарушений в метафазе клеточного цикла при проведении *Allium-test* – 0,81 и 0,68 соответственно ($p \leq 0,01$). А также корреляция между частотой хромосомных аберраций на культурах лимфоцитов человека и частотой микроядер в интерфазе – +0,72 ($p \leq 0,01$) [36]. Выявленные взаимосвязи согласуются с данными литературы, показывающими, что цитогенетические нарушения в растениях способны коррелировать с клетками человека и животных. Например, клетки кончиков корней *Lactuca sativa* представляют собой достоверную модель для обнаружения повреждений ДНК, вызванных мутагенами, и соответствуют нарушениям, наблюдаемым в лейкоцитах человека, используемым в качестве модели в аналогичных тестах [37]. Нарушения в клетках *Allium cepa* при тестировании степени генотоксичности воздействий хорошо коррелируют при аналогичных воздействиях с цитогенетическими нарушениями в клетках млекопитающих и человека [38,39]. Также показана корреляция в 82% в отношении теста на канцерогенность у грызунов и *Allium-test* [40, 41].

Заключение

Растительные клетки могут быть предложены в качестве важной системы для оценки токсикологического риска агентов окружающей среды. В частности, использование *Allium-test* имеет важное значение для первого скрининга рисков, связанных с потенциально генотоксичными агентами, которые могут попасть в окружающую среду, например ионизирующее излучение в режиме нормальной эксплуатации атомной станции или при возможных нештатных ситуациях. Проведенное исследование показало хороший потенциал и возможность использования меристематических клеток корней

Allium cepa в качестве подходящего материала для биологической индикации генотоксичности, возникающей при кратковременном внешнем воздействии γ -излучения. К основным цитогенетическим нарушениям, наблюдаемым в клетках корневой меристемы *Allium cepa*, относятся увеличение частоты микроядер в интерфазных клетках, нарушения на разных стадиях клеточного цикла и хромосомные аберрации.

Источник финансирования

Работа выполнена при финансовой поддержке Комитета науки Министерства высшего образования и науки Республики Казахстан, в рамках гранта №AP14869771 «Генетический статус и состояние индикаторных групп флоры и фауны на территории аварии ракетополетчика «Днепр»».

Литература

1. Ganzha H.D., Gudkov D.I., Ganzha D.D., Nazarov A.B. Accumulation and distribution of radionuclides in higher aquatic plants during the vegetation period // Journal of Environmental Radioactivity. -2020. -Vol.222. 106361, <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2020.106361>.
2. Fenech M., Kirsch-Volders M., Natarajan A.T., Surrallés J., Crott J.W., Parry J., Norppa H., Eastmond D.A., Tucker J.D., Thomas P. Molecular mechanisms of micronucleus, nucleoplasmic bridge and nuclear bud formation in mammalian and human cells // Mutagenesis. -2011. -Vol. 26. -P.125-132.
3. Ludovici G.M., De Souza S.O., Chierici A., Cascone M.G., D'Errico F., Malizia A.. Adaptation to ionizing radiation of higher plants: From environmental radioactivity to chernobyl disaster // Journal of Environmental Radioactivity. -2020. -Vol.222. 106375, <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2020.106375>.
4. Leme M.D., Marin-Morales A. *Allium cepa* test environmental monitoring: A review on its application // Mutat. Res. -2009. -Vol.682(1). -P.71-81.
5. Barreto dos Reis G., Fonseca Andrade-Vieira L., De Campos Moraes I., Souza César P.H., Marcussi S., Chamma Davide L. Reliability of plant root comet assay in comparison with human leukocyte comet assay for assessment environmental genotoxic agents // Ecotoxicology and Environmental Safety. -2017. -Vol.142. -P.110-116. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.04.004>.
6. Palmieri M.J., Luber Ja., Fonseca Andrade-Vieira L., Chamma Davide L. Cytotoxic and phytotoxic effects of the main chemical components of spent pot-liner: A comparative approach // Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis. -2014. -Vol.763. -P.30-35. <https://doi.org/10.1016/j.mrgentox.2013.12.008>.
7. Silveira G.L., Franco Lima M.G., Barreto dos Reis G., Palmieri M.Jo., Fonseca Andrade-Vieira L. Toxic effects of environmental pollutants: Comparative investigation using *Allium cepa* L. and *Lactuca sativa* L. // Chemosphere. -2017. -Vol.178. -P.359-367. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.03.048>.
8. Geras'kin S., Oudalova A., Michalik B., Dikareva N., Dikarev V. Geno-toxicity assay of sediment and water samples from the Upper Silesia post-mining areas, Poland by means of *Allium*-test // Chemosphere. -2011. -Vol.83. -P.1133-1146. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2011.01.008>.
9. Hoshina M.M., Marin-Morales M.A. Micronucleus and chromosome aberrations induced in onion (*Allium cepa*) by a petroleum refinery effluent and by river water that receives this effluent // Ecotoxicology and Environmental Safety. -2009. -Vol.72. -Is.8. -P.2090-2095. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2009.07.002>.
10. Levan A. The influence on chromosomes and mitosis of chemicals, as studied by the *Allium* test // Hereditas. -1949. -Vol. 35(1). -P.325-337.
11. Sabeen M, Mahmood Q, Ahmad Bhatti Z, Faridullah Irshad M, Bilal M, Hayat MT, Irshad U, Ali Akbar T, Arslan M, Shahid N. *Allium cepa* assay based comparative study of selected vegetables and the chromosomal aberrations due to heavy metal accumulation // Saudi J. Biol. Sci. – 2020. -Vol. 27(5). -P.1368-1374. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2019.12.011>.
12. Ma T.H. The international program on plant bioassays and the report of the follow-up study after the hands-on workshop in China // Mutation Research. -1999. -Vol. 426(2). -P.103-106.
13. Ma T.H, Cabrera G.L., Owens E. Genotoxic agents detected by plant bioassays // Rev Environ Health. -2005. -Vol. 20(1). -P.1-14.
14. Kovalchuk O., Kovalchuk I., Arkhipov A., Telyuk P., Hohn B., Kovalchuk L. The *Allium cepa* chromosome aberration test reliably measures genotoxicity of soils of inhabited areas in the Ukraine contaminated by the Chernobyl accident // Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis. -1998. -Vol.415. -Is.1-2. -P.47-57. [https://doi.org/10.1016/S1383-5718\(98\)00053-9](https://doi.org/10.1016/S1383-5718(98)00053-9).
15. Tkalec M., Malarić K., Pavlica M., Pevalak-Kozlina B., Vidaković-Cifrek Ž. Effects of radiofrequency electromagnetic fields on seed germination and root meristematic cells of *Allium cepa* L. // Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis. -2009. -Vol.672. -Is.2. -P.76-81. <https://doi.org/10.1016/j.mrgentox.2008.09.022>.
16. Seth C.S., Misra V., Chauhan L.K.S., Singh R.R. Genotoxicity of cadmium on root meristem cells of *Allium cepa*: cytogenetic and Comet assay approach // Ecotoxicology and Environmental Safety. -2008. -Vol. 71. -Is. 3. -P.711-716. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2008.02.003>.
17. Bonciu E., Firbas P., Fontanetti C.S., Wusheng Ji., Karaismailoğlu M.C., Liu D., Menicucci F., Pesnya D.S., Popescu A., Romanovsky A.V., Schiff S., Ślusarczyk Jo., De Souza C.P., Srivastava A., Sutan A., Papini A. An evaluation for the standardization

of the *Allium cepa* test as cytotoxicity and genotoxicity assay // *Caryologia*. -2018. -Vol. 71(3). -P.191-209, <https://doi.org/10.1080/00087114.2018.1503496>

18. Pesnya D.S., Romanovsky A.V. Comparison of cytotoxic and genotoxic effects of plutonium-239 alpha particles and mobile phone GSM 900 radiation in the *Allium cepa* test // *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*. -2013. -Vol. 750. -Is. 1-2. -P.27-33. <https://doi.org/10.1016/j.mrgentox.2012.08.010>.

19. Amjad M., Anjum M.A. Effect of Post-irradiation Storage on the Radiation-induced Damage in Onion Seeds // *Asian Journal of Plant Sciences*. -2003. -Vol. 2. -P.702-707. <https://doi.org/10.3923/ajps.2003.702.707>

20. Zhang W., Fujikawa K., Endo S., Ishikawa M., Ohtaki M., Ikeda H., Hoshi M. Energy-dependent RBE of neutrons to induce micronuclei in root-tip cells of *Allium cepa* onion irradiated as dry dormant seeds and seedlings. *J. Radiat Res.* -2003. -Vol.44(2). -P.171-177. <https://doi.org/10.1269/jrr.44.171>

21. Takatsuji T., Takayanagi H., Morishita K. et al. Induction of micronuclei in germinating onion seed root tip cells irradiated with high energy heavy ions // *J. Rad. Piz.* -2010. -Vol. 51(3). -P.315-323.

22. Kumar A., Kaur Sh., Chandel Sh., Singh H.P., Batish D.R., Kumar Kohli R. Comparative cyto- and genotoxicity of 900 MHz and 1800 MHz electromagnetic field radiations in root meristems of *Allium cepa* // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. -2020. -Vol.188. 109786, <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.109786>.

23. Subodh Kumar D., Chakrabarty D., Kumar Verma A., Kumar Banerji B. Gamma ray induced chromosomal aberrations and enzyme related defense mechanism in *Allium cepa* L. // *Caryologia*. -2011. -Vol.64(4). -P.388-397. <https://doi.org/10.1080/00087114.2011.10589806>

24. Vajjapurkar S.G., Agarwal D., Chaudhuri S.K., Senwar K.R., Bhatnagar P.K. Gamma-irradiated onions as a biological indicator of radiation dose // *Radiation Measurements*. -2001. -Vol. 33. -Is.5. -P.833-836. [https://doi.org/10.1016/S1350-4487\(01\)00246-3](https://doi.org/10.1016/S1350-4487(01)00246-3).

25. Синовец С.Ю., Пяткова С.В., Козьмин Г.В. Экспериментальное обоснование использования *Allium* -теста в радиоэкологическом мониторинге // *Известия высших учебных заведений. Радиоэнергетика*. -2009. № 1. -С.32-38.

26. Bolsunovsky A.Ya., Trofimova E.A., Zueva A.V., Dementiev D.V. The first results of using the *Allium* test in estimating the chemical and radiation toxicity of bottom sediments in the Yenisei River // *Dokl. Biol. Sci.* -2016. -Vol.469, -P.192-195. <https://doi.org/10.1134/S0012496616040128>

27. Bolsunovsky A., Dementyev D., Trofimova E., Iniatkina E., Kladko Yu., Petrichenkov M. Chromosomal aberrations and micronuclei induced in onion (*Allium cepa*) by gamma-radiation // *Journal of Environmental Radioactivity*. -2019. -Vol. 207. -P. 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2019.05.014>.

28. Xavier M.N., Novaes J.A.T., Silva A.C.C., Silva Alves A.V., Santos M.J.B.A., De Moraes Pantaleão S., Scher R., D'Errico F., De Souza S.O. Cytogenetic effects of β -particles in *Allium cepa* cells used as a biological indicator for radiation damages // *Journal of Environmental Radioactivity*. -2023. -Vol. 259-260. -P.107-109. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2023.107109>.

29. Rank J. The method of *Allium* anaphase-telophase chromosome aberration assay // *Ekologija*. -2003. -Vol.1. -P.38-42.

30. Moorhead P.S., Nowell P.C., Mellman W.J., Battips D.M., Hungerford D.A. Chromosome preparations of leucocytes cultured from human peripheral blood // *Experimental Cell Research*. -1960. -Vol. 20.-P. 613-616.

31. Almahwasi A. Low dose hyper-radiosensitivity in normal human cells // *Radiation Physics and Chemistry*. -2023. -Vol. 202. 110523, <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2022.110523>.

32. Madas B.G., Drozdik E.J. Computational modeling of low dose hyper-radiosensitivity and induced radioresistance applying the principle of minimum mutation load // *Radiat. Prot. Dosimetry*. -2019. -Vol. 183(1-2). -P.147-150.

33. Suárez Fernández J.P. The downfall of the linear non-threshold model // *Rev. Esp. Med. Nucl. Imagen. Mol. (Engl Ed)*. -2020.

34. Saghirzadeh M., Gharaati M.R., Mohammadi Sh., Ghiassi-Nejad M. Evaluation of DNA damage in the root cells of *Allium cepa* seeds growing in soil of high background radiation areas of Ramsar – Iran // *Journal of Environmental Radioactivity*. -2008. -Vol. 99. -Is.10. -P. 1698-1702. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2008.03.013>.

35. Giri S., Giri A., Sharma G., Prasad S. Mutagenic effect of carbosulfan, a carbamate pesticide. *Mutat. Res.* -2002. -Vol. 519(1-2). -P.75-82. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2009.09.041>

36. Cherednichenko O., Nuraliev S., Berkinbaev G., Yakovleva N., Sadvakasov Ye, Pilugina A., Baigushikova G. Studying the mutagenic activity of drinking water and soil samples selected from Kentau and adjacent territories // *E3S Web of Conferences*. -2021. -Vol. 265. Actual Problems of Ecology and Environmental Management (APEEM 2021) Moscow, Russia, <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126505001>

37. Barreto dos Reis G., Fonseca Andrade-Vieira L., De Campos Moraes I., César P.H.S., Marcussi S., Chamma Davide L. Reliability of plant root comet assay in comparison with human leukocyte comet assay for assessment environmental genotoxic agents // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. -2017. -Vol. 142. -P. 110-116. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.04.004>.

38. Barberrio A., Voltolini J.C., Mello M.L.S. Standardization of bulb and root sample sizes for the *Allium* test // *Ecotoxicology*. -2011. -Vol.20. -P.927-935

39. Fiskesjo G. The *Allium* test as a standard in environmental monitoring // *Hereditas*. -1985. -Vol. 102. -P. 99-112.

40. Rank J., Nielsen M.H. Evaluation of the *Allium* anaphase-telophase test in relation to genotoxicity screening of industrial wastewater // *Mutation Research*. -1994. -Vol. 312. -P.17-24.

41. Bolsunovsky A.Y., Trofimova E.A., Zueva A.V. Effect of Gamma Radiation on Cytogenetic and Growth Endpoints of *Allium cepa* Seedlings in Long-Term Experiments // *Dokl. Biochem. Biophys.* -2022. -Vol. 503. -P.85-89. <https://doi.org/10.1134/S1607672922020028>.

References

1. Almahwasi A. (2023) Low dose hyper-radiosensitivity in normal human cells. *Radiation Physics and Chemistry*, vol. 202, 110523, <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2022.110523>.
2. Amjad M., Anjum M.A. (2023) Effect of Post-irradiation Storage on the Radiation-induced Damage in Onion Seeds. *Asian Journal of Plant Sciences*, vol. 2, pp. 702-707. <https://doi.org/10.3923/ajps.2003.702.707>
3. Barberrio A., Voltolini J.C., Mello M.L.S. (2023) Standardization of bulb and root sample sizes for the *Allium* test. *Ecotoxicology*, vol.20, pp.927-935.
4. Barreto dos Reis G., Fonseca Andrade-Vieira L., De Campos Moraes I., Souza César P.H., Marcussi S., Chamma Davide L. (2017) Reliability of plant root comet assay in comparison with human leukocyte comet assay for assessment environmental genotoxic agents. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, vol.142, pp.110-116. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.04.004>.
5. Barreto dos Reis G., Fonseca Andrade-Vieira L., De Campos Moraes I., César P.H.S., Marcussi S., Chamma Davide L. (2017) Reliability of plant root comet assay in comparison with human leukocyte comet assay for assessment environmental genotoxic agents. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, vol. 142, pp.110-116. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.04.004>.
6. Bolsunovsky A., Dementyev D., Trofimova E., Iniatkina E., Kladko Yu., Petrichenkov M. (2019). Chromosomal aberrations and micronuclei induced in onion (*Allium cepa*) by gamma-radiation. *Journal of Environmental Radioactivity*, vol. 207, pp. 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2019.05.014>.
7. Bolsunovsky A.Y., Trofimova E.A., Zueva A.V. (2022) Effect of Gamma Radiation on Cytogenetic and Growth End-points of *Allium cepa* Seedlings in Long-Term Experiments. *Dokl. Biochem. Biophys*, vol.503, pp.85-89. <https://doi.org/10.1134/S1607672922020028>.
8. Bolsunovsky A.Ya., Trofimova E.A., Zueva A.V., Dementiev D.V. (2016) The first results of using the *Allium* test in estimating the chemical and radiation toxicity of bottom sediments in the Yenisei River. *Dokl. Biol. Sci.*, vol.469, pp.192-195. <https://doi.org/10.1134/S0012496616040128>
9. Bonciu E., Firbas P., Fontanetti C.S., Wusheng Ji., Karaismailoğlu M.C., Liu D., Menicucci F., Pesnya D.S., Popescu A., Romanovsky A.V., Schiff S., Ślusarczyk Jo., De Souza C.P., Srivastava A., Sutan A., Papini A. (2018) An evaluation for the standardization of the *Allium cepa* test as cytotoxicity and genotoxicity assay. *Caryologia*, vol. 71(3), pp.191-209, <https://doi.org/10.1080/00087114.2018.1503496>
10. Cherednichenko O., Nuraliev S., Berkinbaev G., Yakovleva N., Sadvakasov Ye, Pilugina A., Baigushikova G. (2021) Studying the mutagenic activity of drinking water and soil samples selected from Kentau and adjacent territories. *E3S Web of Conferences*, vol. 265. *Actual Problems of Ecology and Environmental Management (APEEM 2021)* Moscow, Russia, <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126505001>
11. Fenech M., Kirsch-Volders M., Natarajan A.T., Surrallés J., Crott J.W., Parry J., Norppa H., Eastmond D.A., Tucker J.D., Thomas P. (2011) Molecular mechanisms of micronucleus, nucleoplasmic bridge and nuclear bud formation in mammalian and human cells. *Mutagenesis*, vol. 26, pp. 125-132.
12. Fiskesjo G. (1985) The *Allium* test as a standard in environmental monitoring. *Hereditas*, vol. 102, pp. 99-112.
13. Ganzha H.D., Gudkov D.I., Ganzha D.D., Nazarov A.B. (2020) Accumulation and distribution of radionuclides in higher aquatic plants during the vegetation period. *Journal of Environmental Radioactivity*, vol. 222, 106361, <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2020.106361>.
14. Geras'kin S., Oudalova A., Michalik B., Dikareva N., Dikarev V. (2011) Geno-toxicity assay of sediment and water samples from the Upper Silesia post-mining areas, Poland by means of *Allium*-test. *Chemosphere*, vol.83, pp.1133-1146. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2011.01.008>.
15. Giri S., Giri A., Sharma G., Prasad S. (2002) Mutagenic effect of carbosulfan, a carbamate pesticide. *Mutation Research*, vol. 519(1-2), pp.75-82. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2009.09.041>
16. Hoshina M.M., Marin-Morales M.A. (2009) Micronucleus and chromosome aberrations induced in onion (*Allium cepa*) by a petroleum refinery effluent and by river water that receives this effluent. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, vol.72. pp.2090-2095. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2009.07.002>.
17. Kovalchuk O., Kovalchuk I., Arkhipov A., Telyuk P., Hohn B., Kovalchuk L. (1998) The *Allium cepa* chromosome aberration test reliably measures genotoxicity of soils of inhabited areas in the Ukraine contaminated by the Chernobyl accident. *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*, vol.415, is.1-2, pp.47-57. [https://doi.org/10.1016/S1383-5718\(98\)00053-9](https://doi.org/10.1016/S1383-5718(98)00053-9).
18. Kumar A., Kaur Sh., Chandel Sh., Singh H.P., Batish D.R., Kumar Kohli R. (2020) Comparative cyto- and genotoxicity of 900 MHz and 1800 MHz electromagnetic field radiations in root meristems of *Allium cepa*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, vol.188, 109786, <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.109786>.
19. Leme M.D., Marin-Morales A. (2009) *Allium cepa* test environmental monitoring: A review on its application. *Mutation Research*, vol. 682(1), pp.71-81.
20. Levan A. (1949) The influence on chromosomes and mitosis of chemicals, as studied by the *Allium* test. *Hereditas*, vol. 35(1), pp.325-337.
21. Ludovici G.M., De Souza S.O., Chierici A., Cascone M.G., D'Errico F., Malizia A. (2020) Adaptation to ionizing radiation of higher plants: From environmental radioactivity to chernobyl disaster. *Journal of Environmental Radioactivity*, vol.222, 106375, <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2020.106375>.
22. Ma T.H, Cabrera G.L., Owens E. (2005) Genotoxic agents detected by plant bioassays. *Reviews on Environmental Health*, vol. 20(1), pp.1-14.

23. Ma T.H. (1999) The international program on plant bioassays and the report of the follow-up study after the hands-on workshop in China. *Mutation Research*, vol. 426(2), pp.103-106.
24. Madas B.G., Drozdzik E.J. (2019) Computational modeling of low dose hyper-radiosensitivity and induced radioresistance applying the principle of minimum mutation load. *Radiat. Prot. Dosimetry*, vol. 183(1-2), pp.147-150.
25. Moorhead P.S., Nowell P.C., Mellman W.J., Battips D.M., Hungerford D.A. (1960) Chromosome preparations of leucocytes cultured from human peripheral blood. *Experimental Cell Research*, vol. 20, pp. 613-616.
26. Palmieri M.J., Luber Ja., Fonseca Andrade-Vieira L., Chamma Davide L. (2014) Cytotoxic and phytotoxic effects of the main chemical components of spent pot-liner: A comparative approach. *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*, vol.763, pp.30-35. <https://doi.org/10.1016/j.mrgentox.2013.12.008>.
27. Pesnya D.S., Romanovsky A.V. (2013) Comparison of cytotoxic and genotoxic effects of plutonium-239 alpha particles and mobile phone GSM 900 radiation in the *Allium cepa* test. *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*, vol. 750, is. 1-2, pp.27-33. <https://doi.org/10.1016/j.mrgentox.2012.08.010>.
28. Rank J. (2003) The method of *Allium* anaphase-telophase chromosome aberration assay. *Ekologija*, vol.1, pp.38-42.
29. Rank J., Nielsen M.H. (1994) Evaluation of the *Allium* anaphase-telophase test in relation to genotoxicity screening of industrial wastewater. *Mutation Research*, vol. 312, pp.17-24.
30. Sabeen M., Mahmood Q., Ahmad Bhatti Z., Faridullah Irshad M., Bilal M., Hayat M.T., Irshad U., Ali Akbar T., Arslan M., Shahid N. (2020) *Allium cepa* assay based comparative study of selected vegetables and the chromosomal aberrations due to heavy metal accumulation. *Saudi J. Biol. Sci.*, vol. 27(5), pp.1368-1374. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2019.12.011>.
31. Saghirzadeh M., Gharaati M.R., Mohammadi Sh., Ghiassi-Nejad M. (2008) Evaluation of DNA damage in the root cells of *Allium cepa* seeds growing in soil of high background radiation areas of Ramsar – Iran. *Journal of Environmental Radioactivity*, vol. 99, is.10, pp.1698-1702. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2008.03.013>.
32. Seth C.S., Misra V., Chauhan L.K.S., Singh R.R. (2008) Genotoxicity of cadmium on root meristem cells of *Allium cepa*: cytogenetic and Comet assay approach. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, vol. 71, is. 3, pp.711-716. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2008.02.003>.
33. Silveira G.L., Franco Lima M.G., Barreto dos Reis G., Palmieri M.Jo., Fonseca Andrade-Vieira L. (2017) Toxic effects of environmental pollutants: Comparative investigation using *Allium cepa* L. and *Lactuca sativa* L. *Chemosphere*, vol.178, pp. 359-367. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.03.048>.
34. Sinovec S.Yu., Pyatkova S.V., Koz' min, G.V. (2009) Eksperimentalnoye obosnovaniye ispolzovaniya *Allium* testa v radiologicheskoy monitoringe [Experimental substantiation of the use of the *Allium* test in radiological monitoring]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Radioenergetika [News of higher educational institutions. Radioenergy]*, vol.1, pp.32-38.
35. Suárez Fernández J.P. (2020) The downfall of the linear non-threshold model. *Rev. Esp. Med. Nucl. Imagen. Mol.* (Engl Ed).
36. Subodh Kumar D., Chakrabarty D., Kumar Verma A., Kumar Banerji B. (2011) Gamma ray induced chromosomal aberrations and enzyme related defense mechanism in *Allium cepa* L. *Caryologia*, vol. 64(4), pp.388-397. <https://doi.org/10.1080/00087114.2011.10589806>
37. Takatsuji T., Takayanagi H., Morishita K. et al. (2010) Induction of micronuclei in germinating onion seed root tip cells irradiated with high energy heavy ions. *J. Rad. Res.*, vol. 51(3), pp.315-323.
38. Tkalec M., Malarić K., Pavlica M., Pevalek-Kozlina B., Vidaković-Cifrek Ž. (2009) Effects of radiofrequency electromagnetic fields on seed germination and root meristematic cells of *Allium cepa* L. *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*, vol.672, is.2, pp.76-81. <https://doi.org/10.1016/j.mrgentox.2008.09.022>.
39. Vajjapurkar S.G., Agarwal D., Chaudhuri S.K., Senwar K.R., Bhatnagar P.K. (2001) Gamma-irradiated onions as a biological indicator of radiation dose. *Radiation Measurements*, vol. 33, is.5, pp.833-836. [https://doi.org/10.1016/S1350-4487\(01\)00246-3](https://doi.org/10.1016/S1350-4487(01)00246-3).
40. Xavier M.N., Novaes J.A.T., Silva A.C.C., Silva Alves A.V., Santos M.J.B.A., De Moraes Pantaleão S., Scher R., D'Errico F., De Souza S.O. (2023) Cytogenetic effects of β -particles in *Allium cepa* cells used as a biological indicator for radiation damages. *Journal of Environmental Radioactivity*, vol. 259-260, pp.107-109. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2023.107109>.
41. Zhang W., Fujikawa K., Endo S., Ishikawa M., Ohtaki M., Ikeda H., Hoshi M. (2003) Energy-dependent RBE of neutrons to induce micronuclei in root-tip cells of *Allium cepa* onion irradiated as dry dormant seeds and seedlings. *J. Radiat. Res.*, vol.44(2), pp.171-177. <https://doi.org/10.1269/jrr.44.171>

Information about authors:

Cherednichenko Oksana Gennadiyevna (corresponding author) – Candidate of Biological Sciences, Head of the Laboratory of Genetic Monitoring of the Institute of Genetics and Physiology of the SC MSHE RK (Almaty, Kazakhstan, email: cherogen70@mail.ru).

Nuraliev Serikbai Kenzhebaevich – PhD, senior researcher at the laboratory of genetic monitoring of the Institute of Genetics and Physiology of the SC MSHE RK (Almaty, Kazakhstan, email: nur-kenzhe@mail.ru).

Pilyugina Anastasia Leonidovna – senior researcher at the laboratory of genetic monitoring of the Institute of Genetics and Physiology of the SC MSHE RK (Almaty, Kazakhstan, email: labgenmon@mail.ru).

Azizbekova Dinara Elmuradovna – junior researcher at the laboratory of genetic monitoring of the Institute of Genetics and Physiology of the SC MSHE RK (Almaty, Kazakhstan, email: azizbekovad@gmail.com).

Сведения об авторах:

Чердниченко Оксана Геннадьевна (автор-корреспондент) – кандидат биологических наук, заведующая лабораторией генетического мониторинга Института генетики и физиологии КН МНВО РК (Алматы, Казахстан, e-mail: cherogen70@mail.ru).

Нуралиев Серикбай Кенжебаевич – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории генетического мониторинга Института генетики и физиологии КН МНВО РК (Алматы, Казахстан, e-mail: nur-kenzhe@mail.ru).

Пилюгина Анастасия Леонидовна – старший научный сотрудник лаборатории генетического мониторинга Института генетики и физиологии КН МНВО РК (Алматы, Казахстан, e-mail: labgenmon@mail.ru).

Азизбекова Динара Эльмурадовна – младший научный сотрудник лаборатории генетического мониторинга Института генетики и физиологии КН МНВО РК (Алматы, Казахстан, e-mail: azizbekovad@gmail.com).

Поступила 5 ноября 2023 года
Повторно загружена 9 февраля 2024 года
Принята 20 февраля 2024 года