

СРАВНЕНИЕ ЦИТОГЕНЕТИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ ИМПУЛЬСНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ И ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НА КЛЕТКИ МЕРИСТЕМЫ ПРОРОСТКОВ ЛУКА (*ALLIUM CEPA* L.)

© 2024 г. А. Е. Алдибекова*, @, Е. В. Стяжкина*, **, Г. А. Тряпицына*, **, Е. А. Пряхин*

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки “Уральский научно-практический центр радиационной медицины Федерального медико-биологического агентства России”,
ул. Воровского, 68а, Челябинск, 454141 Россия

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования “Челябинский государственный университет”, ул. Братьев Кашириных, 129, Челябинск, 454001 Россия

@ E-mail: albinaaes@gmail.com

Поступила в редакцию 02.02.2023 г.

После доработки 04.06.2023 г.

Принята к публикации 05.06.2023 г.

Сравнивали действие импульсного магнитного поля (ИМП) на клетки меристемы проростков семян лука с эффектами острого гамма-облучения с помощью аллиум-теста. Выявлено, что ИМП с несущей частотой 1.8 МГц, частотой повторения импульсов 28 кГц, индукцией магнитного поля в импульсе 75 мТл приводит к увеличению митотического индекса, преимущественно за счет увеличения доли клеток в профазе, увеличению частоты клеток с хромосомными aberrациями в ана-телофазе и не влияет на частоту клеток с микроядрами. Высказано предположение, что ИМП вызывает в клетках растений неспецифический оксидативный стресс, сопровождающийся задержкой клеточного цикла в сверхочной точке (G2/M) и индукции повреждений ДНК. По этим показателям ИМП напоминает действие ионизирующего излучения в дозах 0.05–0.5 Гр.

Ключевые слова: импульсное магнитное поле, гамма-облучение, allium test, хромосомные aberrации, клеточный цикл, микроядра

DOI: 10.31857/S1026347024010012, **EDN:** LXFYFN

Магнитное поле (МП) является фактором окружающей среды, который оказывал влияние на живые организмы в течение всего периода их эволюции на Земле. В последние сто лет происходит массовое внедрение оборудования и технологий, что приводит к широкому распространению воздействия на живые организмы, в том числе и человека, магнитных и электромагнитных полей (ЭМП) с частотами, модуляцией и интенсивностями, отличающимися от природных МП. Поскольку воздействие техногенных ЭМП на живые организмы с эволюционной точки зрения началось лишь недавно, у них не было возможности адаптироваться к ней (Belyavskaya, 2004). Это требует, с одной стороны, определения безопасных уровней воздействия ЭМП на биологические системы, а с другой — дает возможность использовать эти электромагнитные поля в качестве одного из стрессоров для изучения функционирования биологических систем.

Механизмы биологического действия МП остаются далекими от полного понимания. Результаты

некоторых исследований *in vitro* показывают, что электромагнитные поля не оказывают прямого мутагенного действия на ДНК, но модифицируют активность ферментов (Loeschinger *et al.*, 1998); МП может генерировать в биологических системах индукционные токи и таким образом менять мембранный клеточный потенциал (Goodman *et al.*, 1986).

Импульсные магнитные поля (ИМП) применяются в научных исследованиях, материаловедении, геологии, медицине (Livshiz, Gafr, 1999; Shaburova *et al.*, 2022). “Пороговая” чувствительность, начиная с которой регистрируются биологические реакции, оценивается в 3 мТл для переменного магнитного поля и в 0.1 мТл для ИМП (Боголюбов, 1978).

Одним из способов изучения биологического действия ИМП может быть сравнение его эффектов с действием факторов, для которых биологическое действие хорошо изучено, например с гамма-излучением. Ионизирующее излучение приводит к широкому спектру биологических эффектов

Таблица 1. Экспериментальные группы

№ группы	Воздействие ИМП, время	№ группы	Доза гамма-облучения, Гр
1	Ложное воздействие		
2	1 с	8	0,05
3	10 с	9	0,1
4	30 с	10	0,5
5	60 с	11	1,0
6	5 мин	12	3,0
7	30 мин	13	5,0

(от стимуляции развития до угнетения и гибели) при изучении влияния на растениях и животных (Donà *et al.*, 2013; Bolsunovsky *et al.*, 2018). При этом основной мишенью для гамма-излучения является ДНК (Olive, 1998).

Аллиум-тест (Allium test) – растительная тест-система, используемая при оценке мутагенного влияния факторов различной природы (Evseeva *et al.*, 2005; Kumar *et al.*, 2020; Priakhin *et al.*, 2020).

Целью настоящего исследования является сравнительный анализ цитогенетических эффектов в клетках растений при воздействии ИМП и острого гамма-облучения с использованием аллиум-теста.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объектом исследования являлись проростки семян лука репчатого (*Allium cepa* L.) сорта “Забияка” (ООО «Группа компаний “Гавриш”», партия 25753).

Характеристики факторов воздействия. Гамма-облучение проводили на исследовательской гамма-установке радиобиологической ИГУР-1М с 4 источниками ^{137}Cs . Мощность дозы гамма-излучения составляла 0.7 Гр/мин, неравномерность гамма-поля в рабочем пространстве не более 5%. Острое γ -облучение проросших семян проводили в дозах 0.05; 0.1; 0.5; 1; 3 и 5 Гр.

В экспериментах использовали генератор импульсного магнитного поля, предназначенный для оценки влияния импульсного магнитного поля на биологические объекты (Галузо, Козлов, 2006). Прибор генерирует импульсное магнитное поле, которое имеет следующие параметры: несущая частота 1.8 МГц, импульсное магнитное поле модулировано импульсами с фронтом длительностью 40 нс и плавным нисходящим спадом, напоминающим параболу. Частота повторения импульсов – 28 кГц, длительность импульса по уровню 0.7 равна 2.7 мкс. Индукция МП в месте расположения

биологических объектов составила 75 мТл. Воздействие ИМП на проросшие семена проводили в течение 1; 30; 60 с; 5 и 30 мин.

Схема эксперимента. Аллиум-тест проводили с использованием семян лука в соответствии с протоколом (Паушева, 1988). Семена лука для синхронизации клеточного цикла до эксперимента хранили в холодильнике при температуре 4–5°C в течение суток. За 1 час до начала эксперимента семена извлекали из холодильника.

В эксперименте было сформировано 12 групп (табл. 1), в том числе группа ложного воздействия, где проростки семян лука подвергали таким же манипуляциям, как при воздействии ИМП или гамма-облучения, но без воздействия исследуемых физических факторов.

Для исследования семена помещали в чашки Петри с фильтровальной бумагой (“Красная лента”), добавляли по 3.0 мл дистиллированной воды и оставляли в термостате при $t = 24.0^\circ\text{C}$. На третьи сутки семена с проростками длиной 1 см помещали в пробирки Эппендорфа объемом 1.5 мл по 20 проростков семян в 1 пробирку, в пробирки добавляли 100 мкл дистиллированной воды и подвергали воздействию острого гамма-излучения или ИМП согласно протоколу эксперимента. После экспериментального воздействия семена переносили в новые чашки Петри с фильтровальной бумагой, добавляли по 3 мл дистиллированной воды и помещали в термостат при температуре 24.0°C. Через 24 ч проростки фиксировали фиксатором Кларка (спирт 96%, ледяная уксусная кислота в соотношении 3:1) в течение суток при температуре 4°C, затем промывали и фиксировали 70% спиртом для длительного хранения.

Для приготовления давленного препарата фиксированные корешки промывали дистиллированной водой, помещали в 2% раствор ацетоорсеина, нагревали до появления признаков кипения, оставляли на сутки. Далее из корня проростка скальпелем отделяли участок меристемы (2 мм с апикального конца) и готовили давленный препарат для микроскопии. Анализ проводили на микроскопе ZEISS AXIO Scope.A1, объектив 40×/0.75, окуляры 10×/23.

Показатели. Определяли митотическую активность, частоту клеток с микроядрами и частоту ана- и телофаз с аберрациями (Grant, 1982; Fiskesjo, 1985; Прохорова и др., 2005). Для оценки митотической активности меристематической ткани подсчитывали процент делящихся клеток от общего числа проанализированных клеток (МИ, % доля делящихся клеток). Определяли соотношение фазных индексов как долю клеток в каждой фазе митоза: профазы, метафазы, анафазы, телофазы (Паушева, 1988). Было проанализировано более 9000 клеток меристемы.

Был проведен анализ хромосомных aberrаций в ана-телофазе (фрагменты, мосты, отставшие хромосомы и др.) и рассчитана частота клеток с aberrациями. Было проанализировано не менее 500 клеток на стадии ана-телофазы в каждой экспериментальной группе. Частоту клеток с aberrациями рассчитывали как отношение суммы ана- и телофазных клеток, в которых были зарегистрированы хромосомные aberrации, к общему числу проанализированных ана-телофаз (% клеток с нарушениями).

Был проведен анализ спектра aberrаций, для этого выделяли три группы нарушений согласно работе (Удалова и др., 2016): хроматидные (одиночные мосты (m1) и фрагменты (f1)), хромосомные (двойные мосты (m2) и фрагменты (f2)), геномные (отстающие хромосомы (lg) и многополюсные митозы (3p)).

Для определения частоты клеток с микроядрами было проанализировано не менее 7000 клеток меристемы лука. Выявляли микроядра в цитоплазме интерфазных клеток, рассчитывали долю клеток с микроядрами (МЯ,%).

Статистический анализ. Данные обрабатывали методами вариационной статистики с использованием пакета MS Excel и Past 3.10. При регрессионном анализе использовали метод наименьших квадратов. Для проверки нормальности распределения использовали критерий Шапиро – Уилка. Для сравнения показателей митотического индекса применяли двухвыборочный t-критерий Стьюдента (Barberio *et al.*, 2011). При сравнении средних показателей частоты клеток с хромосомными aberrациями, различные типы aberrаций и частота клеток с микроядрами использовали непараметрический метод χ^2 (Rank, 2003). Различия принимали статистически значимыми при $p < 0,05$. Сравнения 3 групп по количественным показателям с ненормальным распределением проводили с помощью критерия Краскела – Уоллиса с дальнейшим попарным расчетом критерия Манна – Уитни (Кузовлев и др., 2021). Согласно поправке Бонферрони коррективировка производится по формуле $\alpha_B = \alpha/m$, где α – первоначальный уровень альфа (0.050); α_B – скорректированный уровень α с помощью поправки Бонферрони; m – число сравнений (гипотез) (Наркевич и др., 2020). Различия принимали статистически значимыми при $p < 0.017$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

1. Анализ влияния исследуемых факторов на митотический индекс

Распределение величины митотического индекса статистически значимо не отличалось от нормального: $W_{(47)} = 0.99$; $p = 0.87$. В группе ложного

воздействия митотическая активность составляла $8.1 \pm 0.3\%$ (табл. 2).

Величина митотической активности клеток меристемы в корнях проростков семян лука после воздействия ИМП во всех экспериментальных группах была статистически значимо выше уровня ложного воздействия ($t = 8.89$; $p < 0.001$). При проведении регрессионного анализа не было выявлено зависимости митотического индекса от времени воздействия ИМП ($R^2 = 0.02$; $F = 0.49$; $p = 0.48$). Профазный индекс во всех группах ИМП был статистически значимо ($t = 15.16$, $p < 0.001$) выше, чем в группе ложного воздействия.

При анализе митотической активности клеток меристемы после гамма-облучения не было выявлено четкой зависимости от дозы этого показателя ($R^2 = 0.0003$; $F = 0.008$; $p = 0.93$). Статистически значимое увеличение показателя митотической активности было зарегистрировано при облучении проростков семян в дозах 0.05; 0.5; 1.0; 5.0 Гр. Такие изменения происходили преимущественно за счет увеличения длительности профазы. При анализе данных было обнаружено, что профазный индекс во всех группах с воздействием гамма-излучения статистически значимо был выше ($p < 0.001$), чем в группе ложного воздействия. При проведении регрессионного анализа не было выявлено статистически значимой зависимости профазного индекса от дозы ($R^2 = 0.004$; $F = 0.1$, $p = 0.7$).

Кроме профазного индекса в клетках меристемы проростков лука гамма-излучение приводило к изменению длительности анафазы и телофазы. При проведении регрессионного анализа было показано, что анафазный индекс снижался с увеличением дозы облучения согласно линейной функции ($R^2 = 0.16$; $F = 5.5$; $p = 0.02$). Телофазный индекс был статистически значимо меньше в группах с гамма-облучением в дозах 0.05; 0.5, 1.0 и 3.0 Гр.

2. Анализ влияния исследуемых факторов на частоту клеток в ана-телофазе с aberrациями

Распределение величины частоты клеток с aberrациями статистически значимо отличались от нормального ($W_{(47)} = 0.64$; $p < 0.001$). Частота клеток с aberrациями в ана-телофазе меристемы проростка лука в группе ложного воздействия составила $4.6 \pm 1.0\%$ (табл. 3). ИМП приводило к повышению частоты клеток с aberrациями: статистически значимое увеличение показателя было зарегистрировано в группах с воздействием ИМП в течение 10 с, 60 с, 5 мин и 30 мин. При воздействии ИМП в течение 1 и 30 с частота клеток с aberrациями статистически значимо не отличалась от значения показателя в группе ложного воздействия.

Регрессионный анализ показал отсутствие зависимости частоты клеток с aberrациями от времени

Таблица 2. Показатели митотической активности клеток меристемы проростков семян *Allium cepa* L.

Экспериментальные группы	Митотический индекс, %	Профазный индекс, %	Метафазный индекс, %	Анафазный индекс, %	Телофазный индекс, %
1	8.1 ± 0.3	32.7 ± 1.5	23.1 ± 1.4	15.8 ± 1.2	28.3 ± 1.5
2	10.8 ± 0.3*	43.0 ± 1.5*	21.7 ± 1.2	11.8 ± 1.0*	23.4 ± 1.3*
3	9.3 ± 0.3*	37.2 ± 1.5*	23.0 ± 1.3	9.2 ± 0.9*	30.7 ± 1.4
4	10.0 ± 0.3*	31.9 ± 1.5	25.2 ± 1.4	14.4 ± 1.1	28.5 ± 1.4
5	11.5 ± 0.3*	42.5 ± 1.4*	21.6 ± 1.2	10.0 ± 0.8*	26.0 ± 1.2
6	12.6 ± 0.4*	43.0 ± 1.5*	19.0 ± 1.2*	10.7 ± 0.9*	27.4 ± 1.4
7	9.6 ± 0.3*	43.5 ± 1.5*	20.1 ± 1.2	10.0 ± 0.9*	27.0 ± 1.4
Среднее для всех групп ИМП	11.0 ± 0.1	40.4 ± 1.8	21.7 ± 0.5	11.0 ± 0.4	27.0 ± 0.5
8	11.1 ± 0.3*	40.8 ± 1.3*	22.0 ± 1.1	12.7 ± 0.8*	24.6 ± 1.1*
9	8.8 ± 0.2	39.0 ± 1.4*	21.7 ± 1.3	12.0 ± 0.9*	27.5 ± 1.3
10	10.2 ± 0.3*	46.0 ± 1.5*	20.5 ± 1.2	10.2 ± 0.9*	23.3 ± 1.2*
11	9.7 ± 0.3*	41.2 ± 1.4*	23.8 ± 1.3	13.0 ± 1.0*	22.1 ± 1.2*
12	8.1 ± 0.2	44.4 ± 1.5*	24.2 ± 1.4	8.3 ± 0.8*	23.1 ± 1.2*
13	10.4 ± 0.3*	38.0 ± 1.5*	21.6 ± 1.5	9.4 ± 0.9*	31.0 ± 1.5
Среднее для всех групп гамма-облучения	10.0 ± 0.1*	41.6 ± 1.8*	22.3 ± 0.5	11.0 ± 0.4*	25.1 ± 0.5*

Примечание. * – статистически значимое отличие от группы контроля при значении $p < 0.05$. ** – статистически значимое отличие всех доз гамма-облучения от группы всех сроков воздействия ИМП при значении $p < 0.017$.

Таблица 3. Частота клеток с абберациями в ана-телофазе в меристеме проростков семян *Allium cepa* L.

Экспериментальные группы	Условия эксперимента	Кол-во А-Т	ХА, %
1	Ложное воздействие	500	4.6 ± 1.0
2	ИМП, 1 с	613	6.0 ± 1.1
3	ИМП, 10 с	580	8.3 ± 1.2*
4	ИМП, 30 с	453	5.2 ± 1.0
5	ИМП, 60 с	501	10.6 ± 1.3*
6	ИМП, 5 мин	452	8.0 ± 1.2*
7	ИМП, 30 мин	505	10.0 ± 1.4*
Среднее для всех групп ИМП	ИМП, все сроки	3041	8.0 ± 1.2*
8	γ-облучение, 0.05 Гр	613	8.3 ± 1.1*
9	γ-облучение, 0.1 Гр	580	9.0 ± 1.2*
10	γ-облучение, 0.5 Гр	453	10.8 ± 1.5*
11	γ-облучение, 1.0 Гр	501	15.0 ± 1.6*
12	γ-облучение, 3.0 Гр	452	25.0 ± 2.0*
13	γ-облучение, 5.0 Гр	505	38.4 ± 2.2*
Среднее для всех групп гамма-облучения	γ-облучение, все дозы	3104	17.7 ± 1.6*

Примечание. * – статистически значимое отличие от группы контроля при значении $p < 0.05$, ** – статистически значимое отличие всех доз гамма-облучения от группы всех сроков воздействия ИМП при значении $p < 0.017$

воздействия ИМП ($R^2 = 0.026$; $F = 1.21$; $p = 0.3$). Таким образом, ИМП независимо от длительности воздействия (в исследуемом диапазоне до 30 мин) приводит к повышению частоты клеток с абберациями на 57% по сравнению с ложным воздействием.

Цитогенетический анализ показал, что гамма-излучение приводит к дозозависимому повышению частоты абберантных клеток в ана-телофазе (рис. 1).

Статистически значимое повышение частоты клеток с абберациями было обнаружено при радиационном воздействии в дозе 0.05 Гр и выше. В диапазоне доз до 5 Гр частота клеток с хромосомными абберациями линейно зависит от дозы гамма-облучения ($R^2 = 98.40$; $F = 309.90$; $p < 0.001$).

В ходе ана-телофазного анализа проводили анализ спектра аббераций хромосом (табл. 4). В группе ложного воздействия регистрировали только хроматидные абберации. В группах воздействия ИМП основной вклад в спектр нарушений вносили хроматидные абберации ($7.4 \pm 0.3\%$) и в меньшей степени хромосомные абберации ($0.2 \pm 0.2\%$) и геномные ($0.3 \pm 0.2\%$).

Средняя частота хроматидных аббераций при гамма-облучении в дозах 0.05–0.5 Гр составила $8.8 \pm 1.2\%$; частота хромосомных аббераций – $0.5 \pm 0.3\%$; геномных – $0.13 \pm 0.13\%$. При гамма-облучении в дозах 1.0–5.0 Гр частота всех типов аббераций была существенно больше: частота хроматидных аббераций составила $19.0 \pm 1.8\%$; частота хромосомных аббераций – $3.9 \pm 0.8\%$; частота геномных – $2.6 \pm 0.7\%$.

Результаты однофакторного дисперсионного анализа показали, что значения средних статистически значимо отличаются в трех группах (ИМП; гамма-облучение в дозах 0.05–0.5 Гр; гамма-облучение в дозах 1.0–5.0 Гр) ($N = 7.2$; $p = 0.03$). Попарное сравнение методом Манна – Уитни показало, что они были обусловлены различиями частоты аббераций в группе ИМП и гамма-облучения в дозе 1.0–5.0 Гр, для хроматидных аббераций значение $p = 0.03$; для хромосомных аббераций – $p = 0.02$; для геномных аббераций – $p = 0.03$. Но с учетом поправки Бонферрони в этих группах не было выявлено статистически значимого отличия, как и при сравнении группы ИМП и гамма-облучения в дозах 0.05–0.5 Гр: частота хроматидных ($p = 0.2$), хромосомных ($p = 0.5$) и геномных аббераций ($p = 0.6$).

3. Анализ влияния исследуемых факторов на частоту клеток с микроядрами

Распределение величины частоты клеток с абберациями статистически значимо отличалось от нормального: $W_{(47)} = 0.71$; $p < 0.001$. При анализе

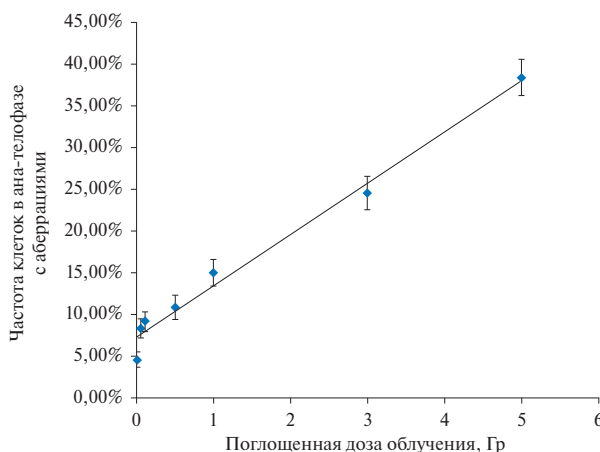


Рис. 1. Линейная модель зависимости частоты клеток с хромосомными абберациями от дозы облучения гамма-излучения.

частоты клеток с микроядрами в группе ложного воздействия было выявлено, что этот показатель составляет $0.09 \pm 0.03\%$. Частота клеток меристемы проростков с микроядрами ни в одной из экспериментальных групп после воздействия ИМП статистически значимо не отличалась от группы ложного воздействия (табл. 5).

Гамма-излучение приводило к повышению частоты клеток с микроядрами. Статистически значимые отличия частоты клеток с микроядрами регистрировались при радиационном воздействии 0.1 Гр ($\chi^2 = 12.4$; $p < 0.001$) и больше. При дозе 1 Гр частота клеток с микроядрами достигала $2.2 \pm 0.1\%$, и далее с увеличением дозы γ -облучения в наших экспериментах показатель существенно не менялся.

При проведении регрессионного анализа зависимости частоты клеток меристемы с микроядрами через 24 ч после гамма-облучения в дозах до 5 Гр было выявлено, что линейная модель (рис. 2) удовлетворительно описывает данную зависимость ($R^2 = 0.41$; $F = 21.3$; $p < 0.001$).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Широкое распространение применения технологий, связанных с использованием ИМП в медицине, материаловедении, научных исследованиях, требует прояснения механизмов действия этого физического фактора (Wahab, 2007; Tkalec, 2009; Yalçın, Erdem, 2012). Несмотря на успехи в этом направлении, остается очень много вопросов (Sarraf *et al.*, 2020). Одним из подходов к изучению биологического действия ИМП может быть сравнение его эффектов с действием хорошо изученных физических факторов, например ионизирующего излучения. Одним из удобных и эффективных

Таблица 4. Спектр aberrаций в ана-телофазе клеток меристемы проростков семян лука

Группа	f' + m', %	f'' + m'', %	lg, %
0	4.6 ± 0.9	0.0 ± 0.0	0.0 ± 0.0
1	5.4 ± 1.0	0.2 ± 0.2	0.2 ± 0.2
10	7.9 ± 1.2*	0.2 ± 0.2	0.2 ± 0.2
30	5.0 ± 0.9	0.2 ± 0.2	0.0 ± 0.0
60	9.4 ± 1.3*	0.2 ± 0.2	0.9 ± 0.4*
300	7.4 ± 1.2	0.2 ± 0.2	0.2 ± 0.2
1800	9.5 ± 1.3*	0.2 ± 0.2	0.2 ± 0.2
Среднее для всех групп ИМП	7.4 ± 1.2*	0.2 ± 0.2	0.3 ± 0.2
0,05	8.2 ± 1.1*	0.0 ± 0.0	0.2 ± 0.2
0,1	8.3 ± 1.1*	0.9 ± 0.4*	0.0 ± 0.0
0,5	9.9 ± 1.4*	0.7 ± 0.4	0.2 ± 0.2
1	13.6 ± 1.5*	0.4 ± 0.3	1.0 ± 0.4*
3	18.4 ± 1.8*	2.9 ± 0.8*	3.8 ± 0.9*
5	25.2 ± 1.9*	8.5 ± 1.2*	3.2 ± 0.8*
Среднее для всех групп гамма-облучения	13.6 ± 1.5*	2.1 ± 0.6*	1.3 ± 0.5*

Примечание. f' + m' – хроматидные aberrации; f'' + m'' – хромосомные aberrации; lg – геномные aberrации; одиночные мосты (m') и фрагменты (f'), двойные мосты (m'') и фрагменты (f''), отстающие хромосомы (l), * – статистически значимое отличие от группы контроля при значении $p < 0.05$, ** – статистически значимое отличие всех доз гамма-облучения от группы всех сроков воздействия ИМП при значении $p < 0.017$.

Таблица 5. Частота клеток с микроядрами в меристеме проростков семян лука *Allium cepa* L.

Экспериментальные группы	Условия эксперимента	Кол-во подсчитанных клеток	Частота клеток с микроядрами, %
1	Ложное воздействие	10898	0.09 ± 0.03
2	ИМП, 1 с	9362	0.2 ± 0.04
3	ИМП, 10 с	10312	0.06 ± 0.02
4	ИМП, 30 с	8961	0.1 ± 0.03
5	ИМП, 60 с	9620	0.1 ± 0.04
6	ИМП, 5 мин	7459	0.1 ± 0.04
7	ИМП, 30 мин	10107	0.2 ± 0.04
Среднее для всех групп ИМП	ИМП, все сроки	55821	0.1 ± 0.04
8	γ-облучение, 0.05 Гр	11274	0.05 ± 0.02
9	γ-облучение, 0.1 Гр	12372	0.3 ± 0.05*
10	γ-облучение, 0.5 Гр	9197	0.3 ± 0.06*
11	γ-облучение, 1.0 Гр	11274	2.2 ± 0.1*
12	γ-облучение, 3.0 Гр	11738	2.2 ± 0.1*
13	γ-облучение, 5.0 Гр	8618	2.0 ± 0.2*
Среднее для всех групп гамма-облучения	γ-облучение, все дозы	64473	1.2 ± 0.1*

Примечание. * – статистически значимое отличие от группы контроля при значении $p \leq 0.05$, ** – статистически значимое отличие всех доз гамма-облучения от группы всех сроков воздействия ИМП при значении $p < 0.017$.

биологических объектов для изучения действия физических факторов являются клетки растений, в частности *Allium cepa* L. Аллиум-тест является одним из очень эффективных инструментов оценки генотоксического действия различных факторов (Evseeva *et al.*, 2005; Kumar *et al.*, 2020; Pryakhin *et al.*, 2020).

Изменение митотической активности клеток меристемы можно рассматривать как интегральный показатель воздействия исследуемых факторов на клеточный цикл. На основании полученных результатов делают вывод о митотоксическом или митостимулирующем действии изучаемого фактора (Прохорова и др., 2003). В то же время известно, что снижение величины МИ ниже 50% от контрольной величины (порог цитотоксичности) может привести к сублетальному эффекту для организма (Panda *et al.*, 1985). Также большое значение имеет процентное соотношение клеток, находящихся в различных фазах митоза. Данные показатели нужны для выявления возможных отклонений в продолжительности стадий митоза и регулярности прохождения клеточного цикла.

В наших экспериментах величина митотической активности клеток меристемы в корнях проростков семян лука после воздействия ИМП во всех экспериментальных группах достоверно увеличивалась в диапазоне от 9.3 до 12.6%, что на 14–55% больше по сравнению с группой ложного воздействия. Однако говорить о митостимулирующем действии на пролиферацию в данном случае преждевременно, так как повышение МИ, как обсуждалось в работах (Калаев и др., 2003; Удалова и др., 2016), может быть связано с задержкой на стадии G2/M, что проявлялось в повышении профазного индекса в наших экспериментах, который во всех группах с воздействием ИМП статистически значимо был выше, чем в группе ложного воздействия.

Похожие эффекты в виде увеличения МИ были выявлены при действии малых доз ионизирующего излучения на клетки меристемы корня лука. Так, при внешнем γ -облучении луковиц *A. cepa* в дозах 0.1 и 0.2 Гр было обнаружено стимулирующее действие на митотическую активность ионизирующего излучения (Синовец и др., 2009). В наших экспериментах также было выявлено статистически значимое увеличение показателя МИ при облучении проростков семян в дозах 0.05; 0.5; 1.0; 5.0 Гр. Такие изменения происходили так же, как и при воздействии ИМП, преимущественно за счет увеличения длительности профазы.

В наших экспериментах ИМП приводило к повышению частоты клеток в ана-телофазе с абберациями: статистически значимое увеличение показателя было зарегистрировано в группах с воздействием ИМП в течение 10 с, 60 с, 5 мин и 30 мин. Полученные данные указывают на то, что ИМП

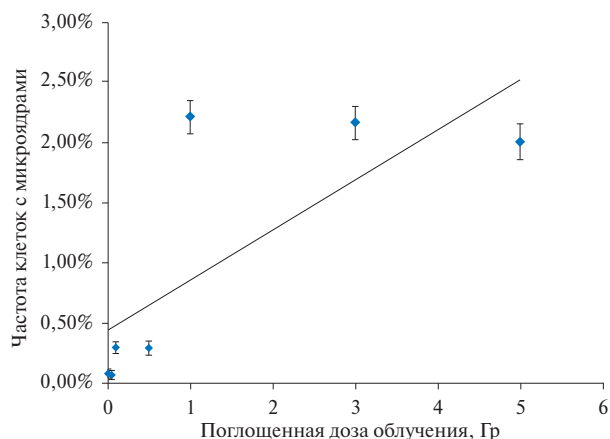


Рис. 2. Линейная модель зависимости частоты клеток с микроядрами от поглощенной дозы облучения.

с несущей частотой 1.8 МГц, частотой повторения импульсов 28 кГц, индукцией МП 75 мТл в импульсе обладает генотоксическим эффектом. При этом регрессионный анализ показал отсутствие зависимости частоты клеток с абберациями от времени воздействия ИМП. Таким образом, ИМП, независимо от длительности воздействия (от 10 с до 30 мин), приводит к повышению частоты клеток с абберацией в среднем на 57% по сравнению с ложным воздействием.

В ряде работ также были выявлены генотоксические эффекты ИМП при воздействии на клетки грибов и животных. Исследования на животных показали, что электромагнитные поля могут оказывать генотоксическое воздействие и приводить к значительному увеличению повреждения ДНК у крыс после воздействия магнитных полей с частотой 60 Гц и магнитной индукцией 10 Тл в течение 24 или 48 часов (Singh, Lai, 1998). Импульсные магнитные поля при длительном воздействии (частота — 25 Гц, магнитная индукция в импульсе — 1.5 мТл, при воздействии 8 ч/сут в течение 16 сут) приводило к увеличению спонтанной деградации ДНК геномной ДНК дрожжей (López-Díaz *et al.*, 2014).

Гамма-облучение в наших экспериментах приводило к четкой линейной зависимости частоты клеток с абберациями от дозы. Следует отметить, что генотоксические эффекты ИМП в наших экспериментах были сопоставимы с генотоксическими эффектами острого гамма-облучения в дозах 0.05–0.5 Гр ($p = 0.25$).

В работах С. А. Гераськина (Geras'kin *et al.*, 2007) и А. А. Удаловой (Удалова и др., 2016) было показано, что взаимосвязь между частотой абберантных клеток в меристеме проростков ячменя и поглощенной дозой является нелинейной. Начиная с дозы гамма-облучения 0.05 Гр до 0.5 Гр, частота клеток с абберациями была резко увеличена

и в этом диапазоне была одинаковой, не зависела от дозы; этот участок авторы обозначили как “плато”; в дальнейшем с увеличением дозы гамма-облучения частота клеток с ХА линейно увеличивалась с увеличением дозы гамма-облучения (Oudalova *et al.*, 2002; Geras'kin *et al.*, 2007). Результаты, полученные в наших экспериментах по изучению влияния гамма-излучения на частоту клеток с абберациями в клетках меристемы лука, не противоречат этим данным. Авторы объясняют плато в диапазоне от 0.05 до 0.5 Гр эффективной системой адаптивного ответа и конститутивной репликативной репарацией.

В наших экспериментах одинаковый уровень частоты аббераций при воздействии ИМП (в диапазоне от 10 с до 30 мин), напоминающий “плато” в зависимости дозы — эффект, выявленная в эксперименте С. А. Гераськина (Geras'kin *et al.*, 2007), позволяет предположить, что ИМП, гамма-облучение в дозах 0.05–0.5 Гр и, возможно, другие неблагоприятные факторы индуцируют в клетках растения неспецифическую, одинаковой степени выраженности реакцию, которая сопровождается и повреждением ДНК, и включением адапционных систем репарации. Так, в работе было показано, что электрические поля и ИМП могут индуцировать в клетках оксидативный стресс (Panagoropoulos *et al.*, 2021).

Для сравнения механизмов действия ИМП и гамма-облучения был проведен анализ спектра аббераций, регистрируемых в аллиум-тесте. В группах воздействия ИМП основной вклад в спектр нарушений вносили хроматидные абберации. Следует отметить, что данные эффекты ИМП в наших экспериментах были сопоставимы с действием острого гамма-облучения в дозах 0.05–0.5 Гр. При сравнении показателей в группах ИМП и гамма-облучения в дозах 0.05–0.5 Гр не было выявлено статистически значимых отличий частоты хроматидных ($p = 0.2$), хромосомных ($p = 0.5$) и геномных ($p = 0.6$) аббераций. Эти результаты не противоречат высказанной выше гипотезе о том, что ИМП и малые дозы ИИ индуцируют в клетках оксидативный стресс.

Анализ частоты клеток в меристеме с микроядрами является широко используемым приемом при проведении аллиум-теста (Синовец, 2009; Bolsunovsky *et al.*, 2018). Микроядра в клетках формируются в результате повреждения ДНК или как следствие геномной нестабильности (Ильинских и др., 1992; Sommer *et al.*, 2020). Механизмы формирования микроядер хорошо известны и описаны в литературе (Fenech, Morley, 1985; Sommer *et al.*, 2020). Основными механизмами являются: формирование микроядер из ацентрических фрагментов хромосом (Ильинских и др., 1992; Цховребова и др., 2017); нарушение расхождения хромосом в результате дисфункции центромер, кинетохор,

веретена деления (Sommer *et al.*, 2020); дигенетический разрыв хромосом (Fenech *et al.*, 2011); нестабильность хромосом (Terradas *et al.*, 2009); агрегирование двойных мини-хромосом (Кисурин-Евгеньева и др., 2016, Sommer *et al.*, 2020). Воздействие радиации вызывает образование в том числе двунитевые разрывы ДНК, что в дальнейшем проявляется в возникновении клеток с микроядрами (Terradas *et al.*, 2009).

В наших экспериментах, вероятнее всего, повышение частоты клеток с микроядрами при воздействии гамма-излучения было связано с формированием микроядер из фрагментов хромосом или отстающих хромосом в клетках, которые на момент облучения находились на стадии S/G2 клеточного цикла и которые за 24 ч после облучения успели пройти митоз.

Частота клеток с микроядрами после воздействия ИМП статистически значимо не отличалась от значения показателя в группе ложного воздействия. Эти данные соответствуют результатам анализа частоты хромосомных и геномных аббераций: во всех группах воздействия ИМП не было выявлено статистически значимого изменения этих типов аббераций. Наши результаты не противоречат данным, полученным в работе С. Б. Редди (Reddy *et al.*, 2010), которые не выявили изменений частоты клеток с микроядрами в полихроматофильных эритроцитах периферической крови и костного мозга у мышей, подвергшихся воздействию ИМП. Таким образом, наши данные свидетельствуют о том, что ИМП приводит к повышению частоты хроматидных аббераций и не вызывает изменений частоты хромосомных и геномных аббераций, которые могут реализовываться в повышении частоты клеток с микроядрами (Цховребова и др., 2017).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Воздействие ИМП на клетки меристемы проростков семян лука, как и гамма-излучение, приводило к увеличению профазного индекса, что в свою очередь было связано с увеличением митотического индекса. Полученные нами результаты позволяют полагать, что ИМП (несущая частота — 1.8 МГц, частотой повторения импульсов — 28 кГц, длительность импульса по уровню 0.7 равной 2.7 мкс с индукцией магнитного поля в месте расположения биологических объектов 75 мТл) так же, как и гамма-облучение, может вызывать задержку клеточного цикла в сверочной точке G2/M.

ИМП приводит к повышению частоты клеток меристемы проростка семян лука на стадии ана-телофазы с абберациями (при воздействии в течение 10 с, 60 с—30 мин) в среднем на 80%. По выраженности этот эффект в наших экспериментах был аналогичен эффекту гамма-облучения в дозах 0.05–0.5 Гр.

В группах воздействия ИМП основной вклад в спектр нарушений вносили хроматидные аберрации и в меньшей степени хромосомные аберрации и геномные. ИМП по спектру генотоксических эффектов было сопоставимо с эффектами гамма-облучения в дозах 0.05–0.5 Гр и отличалось от эффектов гамма-облучения в дозах 1.0–5.0 Гр.

ИМП не приводило к повышению частоты клеток с микроядрами, что, вероятно, связано с преобладанием хроматидного типа аберраций при таком воздействии, которые не приводят к образованию микроядр. По этому показателю ИМП отличалось от эффектов гамма-облучения, которое приводило к повышению частоты клеток с микроядрами при облучении в дозах больше 0.1 Гр.

Высказано предположение, что ИМП приводит к индукции в клетках оксидативного стресса, сопровождающегося остановкой клеточного цикла в сверочной точке (G2/M) и индукции повреждений ДНК, реализующихся в виде хроматидных аберраций при проведении аллиум-теста. ИМП по индукции такого оксидативного стресса похоже на действие малых доз ионизирующего излучения.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при поддержке Российского фонда содействия развитию. Фундаментальные исследования, проект №. 19-52-40003.

ЭТИЧЕСКОЕ ОДОБРЕНИЕ И СОГЛАСИЕ УЧАСТВОВАТЬ

Эта работа не содержит каких-либо исследований с участием человека и тематика животных.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Боголюбов В.М., Скурихина Л.А. Биологическое действие постоянного и переменного низкочастотного магнитного поля // Вопросы курортологии, физиотерапии и ЛФК. 1978. № 6. С. 64–72.

Галузо С.Ю., Козлов В.И. Импульсное магнитное поле: лабораторный практикум по общей физике (электричество и магнетизм). М.: МГУ, 2006. 10 с.

Ильинских Н.Н., Новицкий В.В., Ванчугова Н.Н., Ильинских И.Н. Микроядерный анализ и цитогенетическая нестабильность. Томск: Изд-во Томского ун-та, 1992. 272 с.

Калаев В.Н., Буторина А.К., Панов А.В., Левин М.Н. Влияние электрического поля на цитогенетические показатели клеток апикальной меристемы проростков семян дуба черешчатого (*Quercus*

robur L.) // Вестник ВГУ. Серия Химия. Биология. Фармация. 2003. № 2. С. 136–141.

Кисурин-Евгеньева О.П., Сулягина О.И., Онищенко Г.Е. Биогенез микроядер // Биохимия. 2016. Т. 81. Вып. 5. С. 612–624.

Кузовлев А.Н., Ядгаров М.Я., Берикашвили Л.Б., Рябова Е.В., Гончарова Д.Д., Переходов С.Н., Лихванцев В.В. Выбор метода статистического анализа // Анестезиология и реаниматология. 2021. № 3. С. 88–93.
<https://doi.org/10.17116/anaesthesiology202103188>

Наркевич А.Н., Виноградов К.А., Гржибовский А.М. Множественные сравнения в биомедицинских исследованиях: проблемы и способы решения // Экология человека. 2020. № 10. С. 55–64.
<https://doi.org/10.33396/1728-0869-2020-10-55-64>

Паушева З.П. Практикум по цитологии растений. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Агропромиздат, 1988. 271 с.

Прохорова И.М., Ковалева М.И., Фомичева А.Н. Генетическая токсикология: лабораторный практикум. Ярославль: ЯрГУ, 2005. 132 с.

Прохорова И.М., Ковалева М.И., Фомичева А.М. Оценка митотоксического и мутагенного действия факторов окружающей среды: метод. указания. Ярославль: ЯрГУ, 2003. 140 с.

Синовец С.Ю., Пяткова С.В., Козьмин Г.В. Экспериментальное обоснование использования аллиум-теста в радиоэкологическом мониторинге // Известия вузов. 2009. № 1. С. 32–38.

Удалова А.А., Пяткова С.В., Гераськин С.А., Киселев С.М., Ахромеев С.В. Оценка цито- и генотоксичности подземных вод, отобранных на промплощадке Дальневосточного центра по обращению с радиоактивными отходами // Радиационная биология. Радиоэкология. 2016. Т. 56. № 2. С. 208–219.
<https://doi.org/10.7868/S0869803116020132>

Цховребова Л.В., Агаджанян А.В., Македонов Г.П. Эффект радиоадаптивного ответа после воздействия рентгеновского излучения и гамма-квантов на лимфоциты периферической крови здоровых доноров // Auditorium. Электронный научный журнал Курского государственного университета. 2017. № 2 (14).

Barberio A., Voltolini J.C., Mello M.L.S. Standardization of bulb and root sample sizes for the *Allium cepa* test // Ecotoxicology. 2011. V 20. P. 927–935.
<https://doi.org/10.1007/s10646-011-0602-8>

Belyavskaya N.A. Biological effects due to weak magnetic field on plants // Advances in Space Research. 2004. V. 34. № 7. P. 1566–1574.
<https://doi.org/10.1016/j.asr.2004.01.021>

Bolsunovsky A. Ya., Dementyev D.V., Trofimova E.A. Initkina E.M., Kladko Yu.V., Petrichenkov M.V. Cytogenetic effects of γ -radiation in onion (*Allium cepa* L.)

- seedlings // *Doklady Biochemistry and Biophysics*. 2018. V. 481. P. 181–185.
<https://doi.org/10.1134/S1607672918040014>
- Donà M., Ventura L., Macovei A., Confalonieri M., Savio M., Giovannin A., Carbonera D., Balestrazzi A. Gamma irradiation with different dose rates induces different DNA damage responses in *Petunia x hybrida* cells // *Journal of Plant Physiology*. 2013. V. 170. P. 780–787.
<https://doi.org/10.1016/j.jplph.2013.01.010>
- Evseeva T.I., Geras'kin S.A., Shuktomova I.I., Taskaev A.I. Genotoxicity and cytotoxicity assay of water sampled from the underground nuclear explosion site in the north of the Perm region (Russia) // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2005. V. 80. P. 59–74.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2004.08.014>
- Fenech M., Morley A. Measurement of micronuclei in lymphocytes // *Mutat. Res.* 1985. № 147. P. 29–36.
[https://doi.org/10.1016/0165-1161\(85\)90015-9](https://doi.org/10.1016/0165-1161(85)90015-9)
- Fenech M., Kirsch-Volders M., Natarajan A.T., Surralles J., Crott J.W., Parry J., Norppa L.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. V. 26. P. 125–132.
<https://doi.org/10.1093/mutage/geq052>
- Fiskesjö G. The Allium test as a standard in environmental monitoring // *Hereditas*. 1985. V. 102. P. 99–112.
<https://doi.org/10.1111/j.1601-5223.1985.tb00471.x>
- Geras'kin S.A., Oudalova A.A., Kim J.K., Dikarev V.G., Dikareva N.S. Cytogenetic effect of low dose c-radiation in *Hordeum vulgare* seedlings: non-linear dose–effect relationship // *Radiat Environ Biophys.* 2007. V. 46. № 1. P. 31–41.
<https://doi.org/10.1007/s00411-006-0082-z>
- Grant W.F. Chromosome aberration assays in Allium. A report of the US Environmental Protection Agency Gene-Tox program // *Mutation Research*. 1982. V. 99. P. 273–291.
[https://doi.org/10.1016/0165-1110\(82\)90046-X](https://doi.org/10.1016/0165-1110(82)90046-X)
- Goodman E.M., Sharpe P.T., Greenebaum B., Marron M.T. Pulsed magnetic fields alter the cell surface // *FEBS Lett.* 1986. V. 199. № 2. P. 275–278.
[https://doi.org/10.1016/0014-5793\(86\)80494-x](https://doi.org/10.1016/0014-5793(86)80494-x)
- Kumar A., Kaur S., Chandel S., Singh H.P., Batish D.R., Kohli R.K. Comparative cyto- and genotoxicity of 900 MHz and 1800 MHz electromagnetic field radiations in root meristems of *Allium cepa* // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2020. V. 188.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.109786>
- Livshiz Y., Gafri O. Technology and equipment for industrial use of pulse magnetic fields // *Digest of Technical Papers. 12th IEEE International Pulsed Power Conference. Cat. No. 99CH36358*. 1999. V. 1. P. 475–478.
- Loeschinger M., Thumm S., Haemmerle H., Rodemann H.P. Stimulation of protein kinase A activity and induced terminal differentiation of human skin fibroblasts in culture by low-frequency electromagnetic fields // *Toxicology Letters*. 1998. V. 96–97. P. 369–376.
[https://doi.org/10.1016/s0378-4274\(98\)00095-2](https://doi.org/10.1016/s0378-4274(98)00095-2)
- López-Díaz B., Mercado-Sáenz S., Martínez-Morillo M., Sendra-Portero F., Ruiz-Gómez M.J. Long-term exposure to a pulsed magnetic field (1.5 mT, 25 Hz) increases genomic DNA spontaneous degradation // *Electromagnetic Biology and Medicine*. 2014. V. 33. № 3. P. 228–235.
<https://doi.org/10.3109/15368378.2013.802245>
- Olive P.L. The role of DNA single- and double-strand breaks in cell killing by ionizing radiation // *Radiation Research Society*. 1998. V. 150. № 5. Supplement: Madame Curie's Discovery of Radium (1898): A Commemoration by Women in Radiation Sciences (1998). P. 42–51.
- Oudalova A.A., Geras'kin S.A., Dikarev V.G., Nesterov Y.B., Dikareva N.S. Induction of chromosome aberrations is non-linear within the low dose region and depends on dose rate // *Radiation Protection Dosimetry*. 2002. V. 99. P. 245–248.
<https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.rpd.a006774>
- Priakhin E.A., Urutskoev L.I., Stiazhkina E.V., Tryapitsyna G.A., Aldibekova A.E., Peretykin A.A., Priakhin E.E., Alabin K.A., Pilia N.D., Chikovani N.Z., Voitenko D.A., Arshba R.M. Biological Detection of Physical Factors Related to the High-Current Electric Explosion of Conductors in a Vacuum // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. 2020. V. 84. № 11. P. 1341–1348.
<https://doi.org/10.3103/S1062873820110222>
- Panda B.B., Sahu U.K. Induction of abnormal spindle function and cytokinesis inhibition in mitotic cells of *Allium cepa* by the organophosphorus insecticide fen-sulfotion // *Cytobios*. 1985. V. 42. P. 147–155.
- Panagopoulos D.J., Karabarbounis A., Yakymenko I., Chrousos G.P. Human made electromagnetic fields: Ion forced oscillation and voltage gated ion channel dysfunction, oxidative stress and DNA damage (Review) // *Int J Oncol*. 2021. V. 59. № 5.
<https://doi.org/10.3892/ijo.2021.5272>
- Rank J. The method of Allium anaphase-telophase chromosome aberration assay // *Ekologija Vilnius*. 2003. V. 1. P. 38–42.
- Reddy S.B., Weller J., Desjardins-Holmes D., Winters T., Keenlside L., Prato F.S., Prihoda T.J., Thomas V., Thomas A.W. Micronuclei in the blood and bone marrow cells of mice exposed to specific complex time-varying pulsed magnetic fields // *Bioelectromagnetics*. 2010. V. 31. № 6. P. 445–453.
<https://doi.org/10.1002/bem.20576>
- Sarraf M., Kataria S., Taimourya H., Oliveira Santos L., Menegatti R.D., Jain M., Ihtisham M., Liu, S. Magnetic Field (MF) Applications in Plants: An Overview // *Plants*. 2020. V. 9. P. 1139.
<https://doi.org/10.3390/plants9091139>
- Shaburova N., Krymsky V., Moghaddam A.O. Theory and practice of using pulsed electromagnetic processing of metal melts // *Materials*. 2022. V. 15.
<https://doi.org/10.3390/ma15031235>

- Singh N.P., Lai H.* 60 Hz magnetic field exposure induces DNA crosslinks in rat brain cells // *Mutat Res.* 1998. V. 400. № 1–2. P. 313–320.
[https://doi.org/10.1016/s0027-5107\(98\)00017-7](https://doi.org/10.1016/s0027-5107(98)00017-7)
- Sommer S., Buraczewska I., Kruszewski M.* Micronucleus Assay: The State of Art, and Future Directions // *Int J Mol Sci.* 2020. V. 21 (4). P. 1534.
<https://doi.org/10.3390/ijms21041534>
- Tkalec M., Malarić K., Pavlica M., Pevaljek-Kozlina B., Vidaković-Cifrek Z.* Effects of radiofrequency electromagnetic fields on seed germination and root meristematic cells of *Allium cepa* L. // *Mutation Research.* 2009. V. 672. № 2. P. 76–81.
<https://doi.org/10.1016/j.mrgentox.2008.09.022>
- Terradas M., Martin M., Tusell L., Genesca, A.* DNA lesions sequestered in micronuclei induce a local defective damage response // *DNA Repair.* 2009. № 8. P. 1225–1234.
<https://doi.org/10.1016/j.dnarep.2009.07.004>
- Yalçın S., Erdem G.* Biological effects of electromagnetic fields // *African Journal of Biotechnology.* 2012. V. 11. № 17. P. 3933–3941.
<https://doi.org/10.5897/AJB11.3308>
- Wahab M.A., Podd J.V., Rapley B.I., Rowland R.E.* Elevated sister chromatid exchange frequencies in dividing human peripheral blood lymphocytes exposed to 50 Hz magnetic fields // *Bioelectromagnetics.* 2007. V. 28. № 4. P. 281–288.
<https://doi.org/10.1002/bem.20289>

Comparison of the Cytogenetic Effects of a Pulsed Magnetic Field and Gamma Radiation on Meristem Cells of Onion Seed Sprouts (*Allium cepa* L.)

A. E. Aldibekova^{1, #}, E. V. Styazhkina^{1,2}, G. A. Tryapitsyna^{1,2}, E. A. Pryakhin¹

¹Urals Research Center for Radiation Medicine, st. Vorovskogo, 68a, Chelyabinsk, 454141 Russia

²Chelyabinsk State University, st. Bratiev Kashirinykh, 129, Chelyabinsk, 454001 Russia

[#]e-mail: albinaaes@gmail.com

The effect of a pulsed magnetic field (PMF) on meristem cells of onion seedlings was compared with the effects of acute gamma irradiation using the allium test. It was found that a pulse with a carrier frequency of 1.8 MHz, a pulse repetition rate of 28 kHz, and a magnetic field induction of 75 mT per pulse leads to an increase in the mitotic index, mainly due to an increase in the proportion of cells in the prophase, an increase in the frequency of cells with chromosome aberrations in the ana-telophase and does not affect the frequency of cells with micronuclei. It has been suggested that UTI causes nonspecific oxidative stress in plant cells, accompanied by a delay in the cell cycle at the check point (G2/M) and induction of DNA damage. According to these indicators, the PMF resembles the effect of ionizing radiation in doses of 0.05–0.5 Gy.

Keywords: pulsed magnetic field, gamma irradiation, allium test, chromosomal aberrations, cell cycle, micronuclei