

ЦИТОГЕНЕТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ В КОРНЕВОЙ МЕРИСТЕМЕ ПРОРОСТКОВ САЛАТА ПРИ ОБЛУЧЕНИИ СЕМЯН БЫСТРЫМИ НЕЙТРОНАМИ В ДОЗЕ 10 Гр И ИХ МОДИФИКАЦИЯ ГИПОМАГНИТНЫМИ УСЛОВИЯМИ ПРОРАЩИВАНИЯ

© 2021 г. Н.Г. Платова*, В.М. Лебедев**, А.В. Спасский**, К.А. Труханов*

*ГНЦ РФ Институт медико-биологических проблем РАН, 123007, Москва, Хорошевское шоссе, 76а

**НИИ ядерной физики имени Д.В. Скобелева, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, 119991, Москва, Ленинские горы, 1/2

E-mail: nataliaspl@inbox.ru

Поступила в редакцию 24.12.2019 г.

После доработки 24.12.2019 г.

Принята к публикации 19.08.2021 г.

Семена салата посевного *Lactuca sativa* L. облучали нейтронами со средней энергией 1.6 МэВ в дозе 10 Гр. Облучение производилось в конце предельного срока сохранения кондиционной свежести семян. Семена проращивали в гипомагнитной камере при величинах магнитной индукции $1 \cdot 10^3$ нТл, $1.4 \cdot 10^2$ нТл, $2 \cdot 10^1$ нТл, что соответствует ослаблению геомагнитного поля в $5 \cdot 10^1$, $3.6 \cdot 10^2$ и до $2.5 \cdot 10^3$ раз, а также в лабораторных условиях ($5 \cdot 10^1$ мкТл). При прорастании в гипомагнитных условиях происходит увеличение процента клеток с хромосомными aberrациями в корневой меристеме проростков, выросших из облученных семян, при всех рассматриваемых величинах ослабления геомагнитного поля. Отмечено синергическое взаимодействие факторов по критерию клеток с хромосомными aberrациями и антагонистическое взаимодействие для среднего количества делящихся клеток в стадиях ана-телофазы.

Ключевые слова: гипомагнитные условия, облучение быстрыми нейтронами, *Lactuca sativa*, семена салата, хромосомные aberrации, долговечность семян.

DOI: 10.31857/S0006302921060120

В связи с перспективами дальних и длительных космических полетов встает проблема безопасности экипажа за пределами магнитосферы Земли. Одним из малоизученных факторов являются гипомагнитные условия космоса (ГМУ). При полетах в околоземном пространстве на орбитальных станциях геомагнитное поле (ГМП) снижено незначительно. На лунных и марсианских базах, при межпланетных полетах снижение ГМП составит несколько порядков величины.

Имеются данные о негативном влиянии ГМУ на различные биологические объекты. Так, экспонирование крыс в течение десяти суток в ГМУ при около 100 нТл приводило к повышению внутривидовой агрессии и нарушению памяти [1]. Инкубирование яиц японского перепела *Coturnix coturnix japonica* в условиях сниженного в 80–100 раз ГМП вызвало у эмбрионов нарушения в формировании сердечно-сосудистой системы и

других систем [2]. При воздействии сверхслабого статического магнитного поля в экранирующей камере из магнитомягкого материала с величиной магнитной индукции в центре камеры 0.2 мкТл фибробласты здорового донора демонстрировали картину, подобную той, которая возникает при повреждении ДНК – повышение количества белков P53 и P21, формирование фокусов 53BP1 [3]. В ГМУ повышается частота хромосомных aberrаций в клетках эмбрионов плотвы *Rutilus rutilus* [4]

Радиационная обстановка в космическом полете формируется галактическими и солнечными космическими лучами, а также вторичным излучением в веществе корабля, в особенности, нейтронным, возникающим вследствие ядерных реакций под действием высокоэнергетических протонов галактических космических лучей. Среднесуточная мощность эквивалентной дозы нейтронного излучения в каналах тканеэквивалентного фантома, расположенного внутри Малого исследовательского модуля (МИМ1), в период основных экспедиций на Международной

Сокращения: ГМУ – гипомагнитные условия, ГМП – геомагнитное поле, ОБЭ – относительная биологическая эффективность.

Таблица 1. Варианты проращивания семян салата

Облучение семян	Величина магнитной индукции			
	$5 \cdot 10^1$ мкТл, магнитное поле Земли	$2 \cdot 10^1$ нТл, ослабление в $2.5 \cdot 10^3$ раз	$1.4 \cdot 10^2$ нТл, ослабление в $3.6 \cdot 10^2$ раз	$1 \cdot 10^3$ нТл, ослабление в $5.0 \cdot 10^1$ раз
необлученные семена	К-К	К-1	К-2	К-3
облученные семена	10-К	10-1	10-2	10-3

космической станции (МКС-35/36 и МКС-41/42) составила от 77 ± 13 до 157 ± 25 мкЗв/сут, что соответствует от 17 до 28% полной дозы [5]. С увеличением толщины пассивной радиационной защиты космического корабля возрастает вклад вторичных нейтронов. Определенную опасность представляют также альбедные быстрые нейтроны от поверхности Луны. Для быстрых нейтронов с энергией около 0.45 МэВ уточненные максимальные коэффициенты относительной биологической эффективности (ОБЭ) для доз 0.01–0.05 Гр при рассмотрении начальных стадий помутнения хрусталика составили 41 [6]. При тотальном облучении мышей нейтронами с энергией 1.5 МэВ в дозах 2.5–25 Гр коэффициенты ОБЭ через 24 и 72 ч после облучения по критериям снижения митотического индекса, а также образования aberrантных митозов оказались в пределах от 4.1 ± 0.1 до 7.3 ± 0.1 [7].

Имеются единичные работы, посвященные комбинированному действию ГМУ и радиации. Так, при проращивании в ГМУ семян салата, облученных ионами аргона с энергией 290 МэВ/нуклон и углерода с энергией 400 МэВ/нуклон в дозе 1 Гр, получено увеличение тяжести радиационного поражения по тесту хромосомных aberrаций [8, 9]. Семена салата были многократно использованы в ряде космических экспериментов. В силу биологических особенностей их можно экспонировать в условиях космоса от нескольких суток до года и более [10]. Предельные сроки сохранения кондиционной свежести семян салата – 3–4 года [11]. Радиационное старение возможно частично смоделировать использованием длительно хранившихся семян. В гипомангнитных условиях (ГМУ) будут прорасти семена в космических оранжереях, подвергаясь одновременно действию космической радиации, в том числе и действию нейтронов вторичного излучения.

Целью данной работы было изучение реакции семян в конце периода хранения, сохраняющего кондиционную свежесть, на комбинированное воздействие облучения нейтронами и ГМУ.

МЕТОДИКА

В эксперименте использовали семена салата посевного *Lactuca sativa* L. сорта Московский парниковый урожая 2012 г. Семена были получены в условиях защищенного грунта в Московской области на Опытно-производственной базе Федерального научного центра овощеводства. Семена облучали нейтронами со средней энергией 1.6 МэВ на биологическом оборудовании Будапештского исследовательского реактора в июле 2016 г. Мощность дозы составила 14.2 мГр/с, доля γ -излучения – 10%, неопределенность – не менее 5%. Семена россыпью упаковывали в пакетики из кальки размером 2×2 см. Неоднородность внутри одной упаковки была менее 3%. Воздушно-сухие семена хранили в холодильнике при температуре 4°C.

Семена проращивали в октябре 2016 г. в чашках Петри на фильтровальной бумаге, смоченной дистиллированной водой, при температуре $21.0 \pm 0.5^\circ\text{C}$. Варианты проращивания семян салата представлены в табл. 1. Количество семян, поставленных на проращивание, составило 100 штук на вариант.

Проращивание происходило в гипомангнитной камере с рабочим объемом 35 л, изготовленной из рулонного магнитомягкого материала [12]. При открытой крышке в камере создается градиент ослабления ГМП, что позволяет разместить семена в местах с разной кратностью ослабления ГМП. Семена прорастали при величинах магнитной индукции $1.0 \cdot 10^3$ нТл, $1.4 \cdot 10^2$ нТл, $2.0 \cdot 10^1$ нТл, что соответствует ослаблению геомагнитного поля в $5.0 \cdot 10^1$, $3.6 \cdot 10^2$ и до $2.5 \cdot 10^3$ раз, а также в лабораторных условиях при $5.0 \cdot 10^1$ мкТл. Величину магнитной индукции измеряли трехкомпонентным магнитометром типа НВ0204.4А (ООО «НПО ЭНТ», Санкт-Петербург) с диапазоном от 10 нТл до 100 мкТл и точностью измерений 10 нТл.

Учитывали энергию прорастания как процент проросших семян на третьи сутки и всхожесть как процент проросших на седьмые сутки. Проросшими считались семена с длиной корня 2–4 мм, что соответствует первому митозу в корневой меристеме. Проростки фиксировали, окрашивали

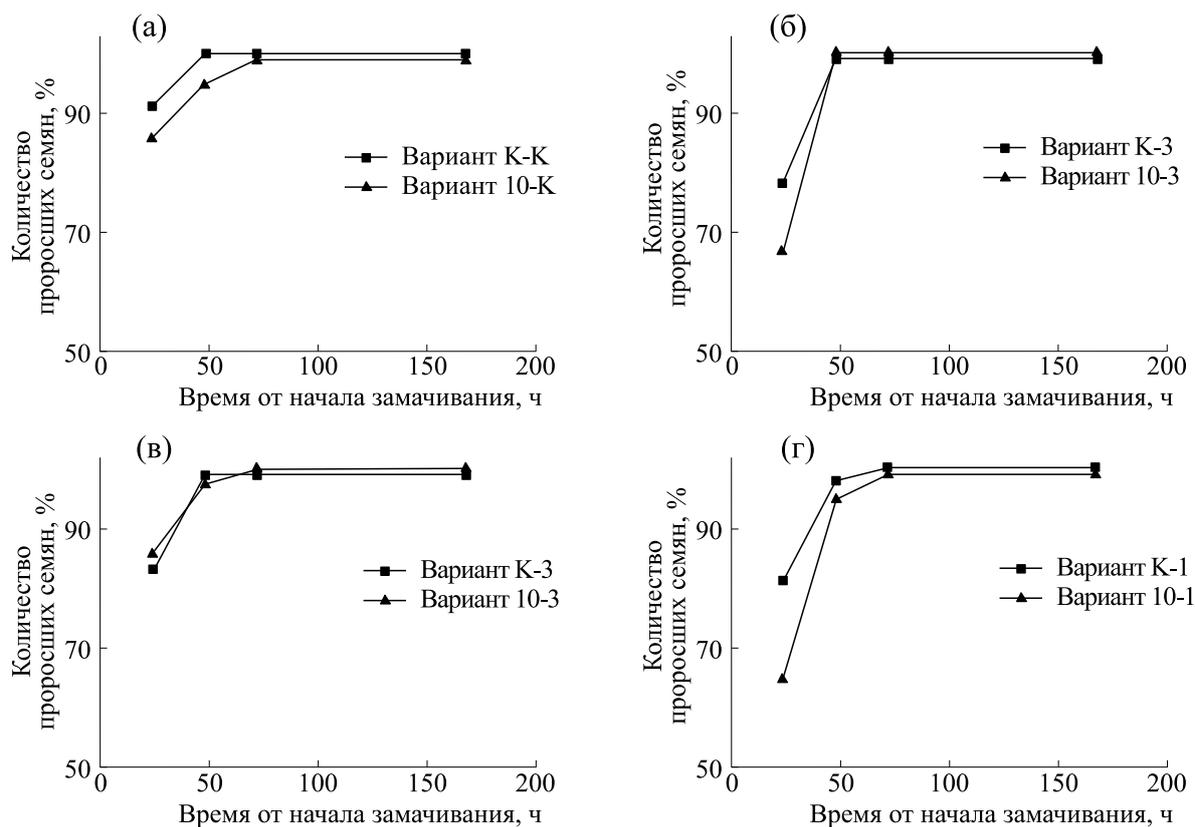


Рис. 1. Прорастание семян салата при величине магнитной индукции $5 \cdot 10^1$ мкТл (а), $1 \cdot 10^3$ нТл (б), $1,4 \cdot 10^2$ нТл (в) и $2 \cdot 10^1$ нТл (г).

ацет-орцеином и приготавливали временные препараты по стандартной методике. Для дальнейшего цитогенетического анализа брали семена, проросшие на первые сутки. Препараты просматривали под микроскопом с увеличением в 945 раз по 30–31 корешку на вариант. Использовали ана-телофазный метод анализа, учитывали хромосомные и хроматидные мосты и фрагменты, рассчитывали среднее количество делящихся клеток на корешок, количество aberrаций на одну aberrантную клетку, процент клеток с хромосомными aberrациями и клеток с множественными aberrациями.

Статистический анализ результатов проводили с помощью *t*-критерия Стьюдента. Коэффициент синергического усиления рассчитывали, как описано в работе [9].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 представлены данные по прорастанию семян в различных условиях. Рисунок демонстрирует, что количество необлученных семян, проросших в ГМУ, на первые сутки оказалось сниженным на 9–14% по вариантам, ко вторым суткам эти различия нивелируются и ко-

личество проросших семян составляет 98–100%. Необлученные семена этой же партии при проращивании двумя годами ранее также демонстрировали задержку прорастания в ГМУ [9]. При прорастании в обычных условиях количество проросших облученных семян (вариант 10-К) на первые сутки снижено на 5% по сравнению с необлученными, прораставшими в этих же условиях, при этом энергия прорастания и всхожесть находятся на уровне контроля. Такую же высокую энергию прорастания и всхожесть необлученные семена демонстрировали при проращивании двумя годами ранее. Тогда при проращивании семян, облученных ионами углерода с энергией 400 МэВ/нуклон в дозе 1 Гр, снижение количества проросших семян на первые сутки составило 14% от контрольных необлученных семян [9]. В ГМУ при $2,0 \cdot 10^1$ нТл и $1,0 \cdot 10^3$ нТл количество облученных нейтронами проросших семян на первые сутки снижено более чем на 20% по сравнению с теми же семенами, прораставшими при обычных условиях, а при $1,4 \cdot 10^2$ нТл процент проросших семян на первые сутки не изменяется. При этом энергия прорастания и всхожесть всех вариантов составляет 99–100%. Следует отме-

Таблица 2. Результаты цитогенетических исследований проростков салата при прорастании в обычных и гипомагнитных условиях

Вариант	Количество просмотренных делящихся клеток (анателофаз)	Доля aberrантных клеток, %	Доля клеток с множественными aberrациями, %	Количество aberrаций на одну aberrантную клетку	Среднее количество ана- и телофаз на 1 корешок
К-К	3403	1.09 ± 0.18	0.15 ± 0.07	1.14	130.9 ± 4.5
К-3	2215	0.90 ± 0.20	-	1.00	71.5 ± 3.2***
К-2	2334	0.30 ± 0.11***	0.04 ± 0.04	1.14	77.8 ± 2.6***
К-1	3108	1.00 ± 0.18	0.10 ± 0.06	1.10	103.6 ± 4.7***
10-К	1387	17.81 ± 1.03***	4.04 ± 0.53***	1.26	46.2 ± 2.8***
10-3	1274	26.96 ± 1.23*** ^^	5.57 ± 0.64***	1.23	42.5 ± 2.5***
10-2	1785	22.97 ± 1.00*** ^^	3.59 ± 0.44**	1.18	59.5 ± 3.1*** ^^
10-1	2137	23.54 ± 0.92*** ^^	3.79 ± 0.41***	1.18	71.2 ± 1.3*** ^^

Примечание. ** – Различия варианта от лабораторного контроля достоверны при уровне значимости $p \leq 0.01$; *** – различия варианта от лабораторного контроля достоверны при уровне значимости $p \leq 0.001$; ^^ – различия варианта от семян, облученных нейтронами и прораставших в лабораторных условиях (вариант 10-К) достоверны при уровне значимости $p \leq 0.001$.

тить, что речь идёт о лабораторной, а не полевой всхожести.

Максимальное количество делящихся клеток в стадиях ана-телофазы отмечено у необлученных семян варианта К-К, прораставших в обычных условиях (табл. 2). При прорастании необлученных семян в ГМУ происходит уменьшение числа делящихся клеток на 45% при $1.0 \cdot 10^3$ нТл, на 41% при $1.4 \cdot 10^2$ нТл и на 21% – при $2.0 \cdot 10^1$ нТл. Снижение количества делящихся клеток отмечено в ГМУ при прорастании необлученных семян в начале срока хранения [8]. Облученные семена, прораставшие в обычных условиях (вариант 10-К), также показывают снижение количества делящихся клеток на 65%. Уменьшение количества клеток в стадиях ана-телофазы было продемонстрировано и в корневой меристеме проростков, полученных из семян салата, облученных ионами аргона [8] и углерода [9]. При облучении семян этой же партии тремя годами ранее нейтронами с теми же параметрами пучка в дозе 10 Гр было зафиксировано снижение количества делящихся клеток в два раза [13]. Таким образом, обнаружено более сильное подавление клеточного деления в проростках, полученных из облученных семян в конце срока кондиционной годности. При прорастании в ГМУ облученных семян происходит увеличение количества делящихся клеток в кор-

невой меристеме проростков при $1.4 \cdot 10^2$ нТл и при $2.0 \cdot 10^1$ нТл. Это, возможно, связано с компенсаторным увеличением при данных условиях ослабления ГМП.

В проростках, полученных из необлученных семян, отмечено значимое уменьшение процента клеток с хромосомными aberrациями при $1.4 \cdot 10^2$ нТл (табл. 2), уменьшается процент хромосомных мостов и не наблюдаются хроматидные фрагменты (табл. 3), при этом количество aberrаций на одну aberrантную клетку остается неизменным. Отсутствуют клетки с множественными aberrациями при $1.0 \cdot 10^3$ нТл. В проведенных нами ранее экспериментах [9, 14] наблюдалось увеличение процентной доли клеток с хромосомными aberrациями в корневой меристеме проростков, полученных из необлученных семян, при прорастании в аналогичных условиях ослабления ГМП. Рассматриваемое в данной статье облучение было проведено через два года с семенами той же партии, и полученные результаты, видимо, связаны со старением семян и изменениями, произошедшими в результате хранения.

Проростки, полученные из облученных семян, прораставшие в обычных условиях (вариант 10-К), имели повышенный процент клеток с хромосомными aberrациями и множественными хромосомными aberrациями (табл. 2). Это объяс-

Таблица 3. Типы хромосомных aberrаций

Вариант	Доля хромосомных мостов, %	Доля хромосомных фрагментов, %	Доля хроматидных мостов, %	Доля хроматидных фрагментов, %
К-К	0.88 ± 0.16	0.15 ± 0.07	0.18 ± 0.07	0.03 ± 0.03
К-3	0.86 ± 0.20	–	0.05 ± 0.05	–
К-2	$0.30 \pm 0.11^{**}$	–	0.04 ± 0.04	–
К-1	0.97 ± 0.18	–	0.13 ± 0.06	–
10-К	$13.63 \pm 0.92^{***}$	$6.56 \pm 0.66^{***}$	$1.80 \pm 0.36^{***}$	$0.36 \pm 0.16^*$
10-3	$23.63 \pm 1.19^{*** \wedge \wedge}$	$3.77 \pm 0.53^{*** \wedge \wedge}$	$4.71 \pm 0.59^{*** \wedge \wedge}$	0.08 ± 0.08
10-2	$18.04 \pm 0.91^{*** \wedge \wedge}$	$4.93 \pm 0.51^{***}$	$3.81 \pm 0.45^{*** \wedge \wedge}$	0.22 ± 0.11
10-1	$21.24 \pm 0.88^{*** \wedge \wedge}$	$2.71 \pm 0.35^{*** \wedge \wedge}$	$3.79 \pm 0.41^{*** \wedge \wedge}$	0.09 ± 0.06

Примечание. * – различия варианта от лабораторного контроля достоверны при уровне значимости $p \leq 0.05$; ** – различия варианта от лабораторного контроля достоверны при уровне значимости $p \leq 0.01$; *** – различия варианта от лабораторного контроля достоверны при уровне значимости $p \leq 0.001$; $\wedge \wedge$ – различия варианта от семян, облученных нейтронами и прораставших в лабораторных условиях (вариант 10-К), достоверны при уровне значимости $p \leq 0.001$.

няется серьезным повреждающим воздействием облучения нейтронами в такой дозе. Близкий процент aberrантных клеток (17.1 ± 1.0) был получен при γ -облучении семян салата в дозе 150 Гр при мощности дозы 90.9 сГр/с [15]. Таким образом, коэффициент ОБЭ нейтронов при данной дозе составляет 15. Усредненное значение ОБЭ для быстрых нейтронов равно 10 [16]. В то же время ОБЭ зависит от дозы, критерия оценки эффекта и вида биообъекта.

Проростки, полученные из семян, облученных ионами аргона [8], а также из семян, экспониро-

ванных в течение 231 суток на Международной космической станции [17], демонстрировали увеличение процента клеток с хромосомными aberrациями и клеток с множественными aberrациями только при прорастании при $2 \cdot 10^1$ нТл. При прорастании в ГМУ семян, облученных ионами углерода, происходит увеличение процентной доли клеток с хромосомными aberrациями при $1.4 \cdot 10^2$ нТл и $2.0 \cdot 10^1$ нТл [9]. При прорастании в ГМУ семян, облученных нейтронами в дозе 10 Гр, происходит увеличение процента клеток с хромосомными aberrациями ($p \leq 0.001$) при всех рассматриваемых ослаблениях ГМП, при этом процентная доля клеток с множественными aberrациями существенно не изменяется (табл. 2). Это, видимо, связано с большим повреждением меристемы при облучении в большей дозе. Увеличение процентной доли клеток с хромосомными aberrациями идет за счет увеличения доли хромосомных мостов и доли хроматидных мостов, при этом доля хроматидных фрагментов существенно не изменяется, а доля хромосомных фрагментов – уменьшается при величине магнитной индукции $1.0 \cdot 10^3$ нТл и $2.0 \cdot 10^1$ нТл (табл. 3).

Для оценки взаимного влияния ГМУ и радиации был рассчитан коэффициент синергического усиления k , показывающий, во сколько раз эффект комбинированного воздействия превышает эффект при сложении действия независимых факторов (рис. 2). Для процентной доли клеток с

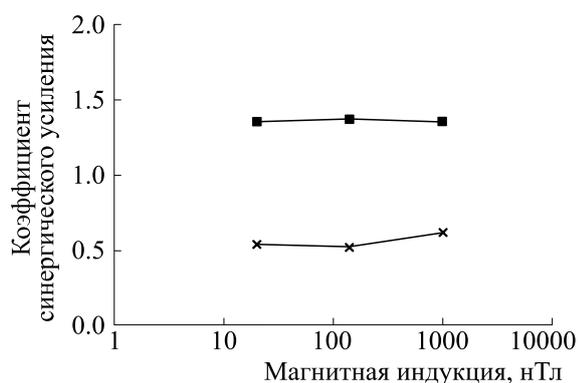


Рис. 2. Синергическое усиление комбинированного воздействия на семена салата: квадраты – доля клеток с хромосомными aberrациями; крестики – среднее количество (на корешок) делящихся клеток в стадиях ана-телофазы.

хромосомными aberrациями при всех режимах ослабления ГМП отмечено синергическое взаимодействие ($k > 1$), тогда как для семян, облученных ионами углерода в дозе 1 Гр, — только при среднем и максимальном ослаблении [8]. Это, видимо, связано со степенью радиационного поражения клеток. Для среднего количества делящихся клеток в стадиях ана-телофазы отмечено антагонистическое действие факторов ($k < 1$). Такая же направленность эффекта по этому критерию была отмечена при облучении семян салата ионами углерода.

Наблюдаемые эффекты могут быть связаны с затруднением репарационных процессов в ГМУ. В работе [18] на основании анализа литературных данных было высказано предположение о полиэкстремальной зависимости биологического эффекта от величины ослабления ГМП. В эту концепцию укладываются и данные по интенсивности деления планарий при различных ослаблениях ГМП [19]. Полторачасовое экспонирование перитонеальных нейтрофилов мышей при магнитном экранировании в ГМУ при остаточном постоянном магнитном поле 20 нТл вызывает снижение внутриклеточной продукции активных форм кислорода [20, 21]. Эритроциты крыс, подвергавшиеся воздействию ослабленным магнитным полем 0.192 мкТл, продуцировали больше кислородных радикалов, чем экспонированные в магнитном поле Земли [22, 23]. Магнитные поля могут индуцировать спиновые триплет-синглетные переходы в паре радикалов и ион-радикалов, изменять их спиновое состояние и реакционную способность. Имеются данные о возможности магнитоиндуцированного синтеза АТФ и ДНК [24]. ГМУ могут вносить изменения в сложившуюся систему магнитных взаимодействий, с чем может быть связана полиэкстремальная зависимость наблюдаемых эффектов.

ВЫВОДЫ

При облучении семян салата нейтронами со средней энергией 1.6 МэВ в дозе 10 Гр в конце периода предельного срока сохранения кондиционной свежести можно отметить следующее:

1. Энергия прорастания и всхожесть при совместном и раздельном воздействии облучения и ГМУ остается на уровне 99–100%.
2. Отмечена задержка прорастания на первые сутки под действием облучения на 5%. Количество проросших на первые сутки необлученных семян в ГМУ уменьшается при всех рассмотренных ослаблениях по сравнению с прорастанием в обычных условиях, облученных семян — при $2.0 \cdot 10^1$ нТл и $1.0 \cdot 10^3$ нТл.
3. Происходит снижение среднего количества делящихся клеток в стадии ана-телофазы на ко-

решок при проращивании необлученных семян в ГМУ.

4. ГМУ способствуют увеличению митотической активности облученных семян. Наблюдается антагонистическое взаимодействие ГМУ и облучения по данному параметру, коэффициент синергического усиления меньше единицы.

5. Процент клеток с хромосомными aberrациями уменьшается при проращивании необлученных семян при $1.4 \cdot 10^2$ нТл, что не наблюдалось при проращивании свежих семян.

6. Процентная доля клеток с хромосомными aberrациями увеличивается при проращивании в ГМУ облученных семян при всех режимах ослабления ГМП. Наблюдается синергическое взаимодействие ГМУ и облучения по данному параметру, коэффициент синергического усиления больше единицы.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность J.K. Pálfalvi (Hungarian Academy of Sciences, Centre for Energy Research (MTA EK), Budapest, Hungary) за помощь и облучение семян.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке программы фундаментальных исследований ГНЦ РФ — ИМБП РАН, при использовании оборудования, приобретенного НИИЯФ МГУ за счет Программы развития Московского университета.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

Настоящая работа не содержит описания исследований с использованием людей и животных в качестве объектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Н. А. Кривова, К. А. Труханов, Т. А. Замошина и др., Авиакосмическая и экологическая медицина **42** (6/1), 30 (2008).
2. К. А. Труханов, Т. С. Гурьева, О. А. Дадашева и др. Радиационная биология. Радиоэкология **54** (2), 179 (2014).
3. И. М. Спивак, М. Л. Куранова, Г. Р. Мавропуло-Столяренко и др., Биофизика **61** (3), 516 (2016).
4. М. Г. Таликина, Ю. Г. Изюмов и В. В. Крылов, Биология внутренних вод **2**, 121 (2017).

5. С. В. Хулапко, В. И. Лягушин, В. В. Архангельский и др., *Авиакосмическая и экологическая медицина* **50** (2), 47 (2016).
6. А. В. Шафиркин, Ю. Г. Григорьев и И. Б. Ушаков, *Авиакосмическая и экологическая медицина* **53** (1), 23 (2019). DOI: 10.21687/0233-528X-2019-53-1-23-32
7. С. В. Ворожцова, Т. М. Булынина и А. А. Иванов, *Авиакосмическая и экологическая медицина* **50** (1), 55 (2016).
8. Н. Г. Платова, В. М. Лебедев, А. В. Спасский и др., *Авиакосмическая и экологическая медицина* **50** (3), 35 (2016).
9. Н. Г. Платова, В. М. Лебедев, А. В. Спасский и К. А. Труханов, *Авиакосмическая и экологическая медицина* **53** (4), 93 (2019). DOI: 10.21687/0233-528X-2019-53-4-93-100
10. Е. В. Каминская, Л. В. Невзгодина и Н. Г. Платова, *Авиакосмическая и экологическая медицина* **43** (5), 8 (2009).
11. В. А. Лудилов, *Семеноведение овощных и бахчевых культур* (ФГНУ «Росинформагротех», М., 2005).
12. С. А. Гудошников, С. Н. Венедиктов, Ю. Б. Гребенщиков и др., *Измерительная техника*, № 3, 58 (2012).
13. Н. Г. Платова, в кн. *Тезисы докладов VII съезда по радиационным исследованиям (радиобиология, радиоэкология, радиационная безопасность)* (М., РУДН, 2014), с. 192.
14. В. М. Лебедев, Н. Г. Платова, А. В. Спасский и К. А. Труханов, *Изв. РАН. Сер. физич.* **80** (3), 378, (2016).
15. Н. М. Папьян и Л. В. Невзгодина, *Радиобиология* **10** (5), 770 (1970).
16. И. Н. Гудков, А. Г. Кудяшева и А. А. Москалёв, *Радиобиология с основами радиоэкологии* (Издательство СыктГУ, Сыктывкар, 2015).
17. Н. Г. Платова, В. М. Лебедев, А. В. Спасский и др., в кн. *Матер. XI междунар. науч.-практич. конф.* (Звездный городок, 2015), с. 193.
18. К. А. Труханов, в кн. *Труды Междунар. конф. «Влияние космической погоды на человека: в космосе и на Земле»* (ИКИ РАН, М., 2012), с. 249.
19. В. В. Новиков, Л. М. Шейман и Е. Е. Фесенко, *Биофизика* **52** (5), 912 (2007).
20. В. В. Новиков, Е. В. Яблокова и Н. И. Новикова, *Актуальные вопросы биологической физики и химии* **3** (1), 23, (2018).
21. В. В. Новиков, Е. В. Яблокова и Е. Е. Фесенко, *Биофизика* **63** (3), 484 (2018).
22. М. А. Терпиловский, Д. А. Хмелевской, А. Д. Надеев и др., в кн. *Научные труды VIII Междунар. конгр. «Слабые и сверхслабые поля и излучения в биологии и медицине»* (СПб., 2018), с. 85.
23. М. А. Терпиловский, Д. А. Хмелевской, Б. Ф. Щеголев и др., *Биофизика* **64** (3), 486 (2019). DOI: 10.1134/S0006302919030086
24. А. Л. Бучаченко, *Успехи химии* **83** (1), 1 (2014).

Cytogenetic Effects of Fast Neutron Seed Irradiation (10 Gy) on the Root Meristem Cells of *Lactuca sativa* L. Seedlings and Modification of Seed Germination in Hypomagnetic Environment

N.G. Platova*, V.M. Lebedev**, A.V. Spassky**, and K.A. Trukhanov*

*Institute of Biomedical Problems, Russian Academy of Sciences, Khoroshevskoe shosse 76a, Moscow, 123007 Russia

**Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory 1/2, Moscow, 119991 Russia

The lettuce seeds of *Lactuca sativa* L. were exposed to 10 Gy of fast neutrons (mean energy 1.6 MeV). Seeds close to the end of limiting time of conditioned freshness were used for irradiation. Seeds were germinated inside the hypomagnetic chamber with different values of the magnetic induction ($1 \cdot 10^3$ nT, $1.4 \cdot 10^2$ nT, and $2 \cdot 10^1$ nT). The chamber was able to weaken the geomagnetic fields (by $5 \cdot 10^1$, $3.6 \cdot 10^2$ and up to $2.5 \cdot 10^3$ times, respectively). Seeds also germinated in laboratory environment ($5 \cdot 10^1$ μ T). During germination of seeds exposed to hypomagnetic conditions, the percentage of cells with chromosome aberration increase in the root meristem of seedlings grown from irradiated seeds was seen under all above-mentioned values of the magnetic induction. It was shown that there is a synergistic relationship between factors as criteria for cells with chromosome aberrations and antagonistic interdependence for the test of mean amount of dividing cell in anaphase stage.

Keywords: hypomagnetic conditions, fast neutron irradiation, Lactuca sativa, lettuce seeds, chromosome aberration, durability of seeds