

УДК 539.1.04, 53.098, 57.042, 57.033

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ 120 см ЦИКЛОТРОНА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СОВМЕСТНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ И ГИПОМАГНИТНЫХ УСЛОВИЙ НА СЕМЕНА САЛАТА

© 2020 г. В. М. Лебедев<sup>1</sup>, Н. Г. Платова<sup>2</sup>, А. В. Спасский<sup>1</sup> \*,  
К. А. Труханов<sup>2</sup>, Э. Ф. Загирдинова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
“Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова”,

Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына, Москва, Россия

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки “Государственный научный центр  
Российской Федерации Институт медико-биологических проблем Российской академии наук”, Москва, Россия

\*E-mail: [aspas@yandex.ru](mailto:aspas@yandex.ru)

Поступила в редакцию 30.10.2019 г.

После доработки 25.11.2019 г.

Принята к публикации 27.12.2019 г.

На 120 см циклотроне НИИЯФ МГУ изучено воздействие ионизирующего излучения и гипоманнитных условий на семена салата *Lactuca sativa* L. Семена облучали дейтронами с энергией около 13.7 МэВ в дозе 65 Гр, 0.55 и 5.5 кГр, а затем проращивали в условиях ослабленного в 50 и 10<sup>3</sup> раз геомагнитного поля. Проанализировано изменение ответа семян на радиационное облучение в зависимости от ослабления геомагнитного поля.

DOI: 10.31857/S0367676520040171

### ВВЕДЕНИЕ

При космических полётах в дальнем космосе, на окололунных орбитах и на лунной базе экипаж и элементы биологических систем жизнеобеспечения будут находиться в условиях повышенного радиационного фона, а также пониженной (на 3–5 порядков) напряженности магнитного поля по сравнению с привычными земными величинами и величинами на обычных околоземных орбитах. Повышенный радиационный фон будет определяться галактическими (ГКЛ) и солнечными космическими лучами, в которых присутствуют тяжелые заряженные частицы (ТЗЧ) с высокими величинами линейной передачи энергии (ЛПЭ), а пониженное значение магнитного поля (гипомагнитные условия, ГМУ) — удалением от Земли и практическим отсутствием собственного магнитного поля у Луны и Марса.

Результаты экспериментальных исследований указывают, что оба эти фактора (ТЗЧ [1] и ГМУ [2]) могут отрицательно влиять на экипаж корабля, персонал базы и на биологические элементы системы их жизнеобеспечения. Особенно отрицательное влияние они оказывают, по-видимому, на биологические объекты на начальных стадиях их развития [3–5]. В настоящее время активно ведутся работы по исследованию воздействия ионизирующего излучения (ИИ) и ГМУ на различные

биологические объекты с целью выяснения механизма их воздействия и создания условий, удовлетворяющих безопасности таких полетов.

Кроме прикладного характера, связанного с обеспечением безопасности длительных и дальних космических полетов, исследование воздействия ГМУ на биологические объекты имеет и фундаментальную ценность, связанную с пониманием механизма влияния на живые организмы столь слабого фактора действия, каким является магнитное поле Земли. Казалось бы, что такие поля не способны вызывать биологическую реакцию. Однако имеются экспериментальные данные, опровергающие такую оценку ([2] и ссылки там).

Исследования воздействия ГМУ, в том числе на производстве и в быту, показали, что систематическое пребывание людей в течение 6–8 ч в сутки даже в незначительно ослабленном ГМП отрицательно влияет на их здоровье. В исследованиях, выполненных в Институте медицины труда РАМН и в других организациях, выяснилось, что при систематической работе в ГМУ особенно страдают нервная, сердечно-сосудистая и иммунная системы, система крови и др. [6, 7]. В России впервые в мире установлены ограничения на предельные величины коэффициента ослабления ГМП в быту и на производстве (Сан-Пин 2.1.8/2.2.4.2489-09).

Несмотря на актуальность исследований в этой области имеются лишь единичные публикации, посвященные комбинированному действию ГМУ и ИИ на биологические объекты. В работах [8–13] исследовано совместное воздействие ИИ с высоким значением ЛПЭ и гипомангнитных условий на скорость прорастания семян салата и частоту хромосомных нарушений в них. Так, в работе [10] приведены результаты раздельного и комбинированного воздействия ядер аргона с энергией 290 МэВ/нуклон и ослабленного в 50, 140 и более чем в  $10^3$  раз ГМП на семена салата *Lactuca sativa*. Отмечается, что совместное воздействие этих факторов значительно превышает простой суммарный эффект их раздельного действия, т.е. наблюдается синергизм в действии ИИ и ГМУ. Кроме того, в этих работах наблюдалась немонотонная полиэкстремальная зависимость частоты хромосомных нарушений от величины ослабления поля. Это характерно для воздействия ГМУ, что отмечено в [14]. Именно такая полиэкстремальная зависимость от величины ослабления геомагнитного поля наблюдалась для скорости деления планарий в [15]. В [16] были выявлены нарушения среднесрочной памяти при действии ослабленного геомагнитного поля в 35 раз у линии дикого типа *Drosophila melanogaster Canton-S*. Напротив, у мутанта дрозофилы *agns3* данное стрессовое воздействие приводило к восстановлению способности к обучению и формированию памяти.

Очевидно требуется продолжение исследований по лабораторному моделированию влияния ИИ и ГМУ на разнообразные биологические объекты.

В настоящей работе демонстрируется возможность использования ускорителя с относительно невысокой энергией и, соответственно, с частицами небольших пробегов для получения значимых результатов исследования, моделирующего совместное влияние ионизирующего излучения и гипомангнитных условий, характерных для дальнего космоса, на биологический объект — семена салата. По результатам наших прежних экспериментов было выдвинуто предположение, что пребывание в ГМУ может способствовать прорастанию ослабленных семян. Для проверки этой гипотезы нами были выбраны дозы облучения, близкие к летальным в полевых условиях и превышающие их.

## МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В качестве ИИ использовались дейтроны с энергией 15.3 МэВ и энергетической шириной пучка около 120 кэВ из 120-см циклотрона НИИЯФ МГУ [17]. Облучение семян проводили пучком дейтронов, которые выводились из вакуумного ионопровода на воздух через “окно” из алюминиевой

фольги толщиной 50 мкм. Мониторинг пучка осуществляли, измеряя величину заряда пучка дейтронов, попадающих на диафрагму, кювету и другие детали установки, изолированные от “земли”. Заряд измеряли калиброванным интегратором тока. Для улучшения равномерности плотности пучка на облучаемой кювете пучок после ускорителя несколько разфокусировали магнитными квадрупольными линзами ускорителя и периодически контролировали визуально с помощью пластины с ZnS. Абсолютная погрешность определения величины заряда, прошедшего через семена, и, соответственно, величины поглощенной дозы, была оценена в 30%. Относительная погрешность отдельных серий облучения не превышала 10%. Все серии облучений выполняли при одинаковой средней интенсивности пучка (с точностью 30%, определяемой нестабильностью пучка дейтронов из циклотрона). Среднее время облучения составляло около 3 мин для получения поглощенной дозы 1 кГр.

В эксперименте использовали семена салата *Lactuca sativa L* сорта Московский парниковый, полученные в условиях открытого грунта на опытно-производственной базе ФГБНУ ФНЦО, урожая 2017 г. Облучение проводили в феврале 2019 г. Семена салата помещали в специально изготовленную кольцеобразную кювету. Кювета состояла из двух одинаковых фигурных колец с внешним и внутренним диаметрами 60 и 20 мм соответственно, толщиной по 15 мм и тефлонового кольца толщиной 0.5 мм между ними. Конструкция соединена болтами. В центральной части кюветы между двумя лавсановыми пленками толщиной 20 мкм, натянутыми на внутреннюю часть дюралевых колец кюветы, помещали семена салата практически вплотную друг к другу в один слой. Всего в кювету помещалось около 100 семян салата. Кювету помещали на расстоянии 5 см за “окном” ионопровода.

Потери энергии дейтронов в “окне” ионопровода, слое воздуха и лавсановой пленке составили 1.6 МэВ, так что энергия дейтронов на поверхности семян была 13.7 МэВ. Средняя толщина семян салата составляла  $273 \pm 24$  мкм, а соответствующая потеря энергии в семенах составила 2.6 МэВ. Предполагалось, что семена салата по тормозной способности близки к крахмалу; для воды эта величина составила бы 1.6 МэВ. Величина ЛПЭ ( $dE/dx$ ) составляет  $9.6 \text{ кэВ} \cdot \text{мкм}^{-1}$  для крахмала и около  $6.5 \text{ кэВ} \cdot \text{мкм}^{-1}$  для воды. Эти значения ЛПЭ соответствуют примерно релятивистским ядрам углерода ГКЛ.

Каждая экспозиция облучения семян выполнялась дважды — с разных сторон кюветы, что обеспечило более равномерное распределение дозовой нагрузки по толщине семени. Облучение семян было выполнено для трех значений погло-

**Таблица 1.** Варианты проращивания семян салата

Облучение семян		Величина магнитной индукции		
		45 мкТл	50 нТл	1 мкТл
Необлученные семена		К-К	К-1	К-3
Семена, облученные в дозе	65 Гр	1-d-K	1-d-1	1-d-3
	0.55 кГр	2-d-K	2-d-1	2-d-3
	5.5 кГр	3-d-K	3-d-1	3-d-3

щенной дозы: 65 Гр, 0.55 и 5.5 кГр. Расчеты поглощенной дозы выполнены в предположении равномерной толщины слоя семян.

Дозы облучения семян салата посевного листового по критерию выживаемости растений в конце вегетационного периода составляют  $LD_{50} = 150$  Зв, а  $LD_{100} > 250$  Зв. В то же время дозы, вызывающие 100%-ую гибель семян в лабораторных и полевых условиях, могут различаться в несколько десятков раз [18].

Облученные семена проращивались в условиях ослабленного и нормального геомагнитного поля. Для ослабления геомагнитного поля использовалась камера из магнитомягкого материала (пермаллоя), разработанная в ФГУП “Прометей” (СПб) и ИЗМИРАН (Москва, Троицк) [19] и ослабляющая геомагнитное поле до  $10^3$  раз.

Камера имеет цилиндрический рабочий объем около 35 л (диаметр 30 см, глубина 50 см), позволяющий разместить в нем достаточно большой набор чашек Петри с семенами салата. Отметим также, что при снятых (с одной стороны) боковых крышках камеры в ней создается градиент ослабления магнитного поля, что позволяет одновременно проводить эксперименты с разной кратностью ослабления ГМП.

Проращивание семян проводили в чашках Петри, которые располагались в гипомангнитной камере (ГМК) на деревянном столике в глубине и на выходе камеры. Соответствующие значения магнитного поля были около 50 и  $10^3$  нТл (ослабление ГМП в  $10^3$  и 50 раз). Кроме того, контрольная порция семян проращивалась при значении поля 45 мкТл, близком к значению ГМП, обычному для московского региона (около 50 мкТл). Измерения магнитного поля внутри и вне ГМК выполнялись магнитометром типа НВ0204.4А (ООО “НПО ЭНТ”) с динамическим диапазоном от 10 нТл до 100 мкТл.

Варианты облучения и проращивания семян салата представлены в табл. 1. Семена проращивали через 11 дней после облучения, их размещали в чашках Петри, разделенных на 4 сектора, в каждом секторе по 25 семян. Количество семян, поставленных на проращивание, составляло  $2 \times 25$  шт. для облучения дозой 65 Гр (1-d-K по  $2 \times 23$  шт.) и

по  $4 \times 25$  шт. для остальных вариантов (2-d-K и 3-d-K по  $4 \times 21$  шт.). Семена проращивались при температуре  $21.0 \pm 1.5^\circ\text{C}$ , их располагали на фильтровальной бумаге, смоченной дистиллированной водой. Находили средний процент проросших семян по секторам и ошибку среднего.

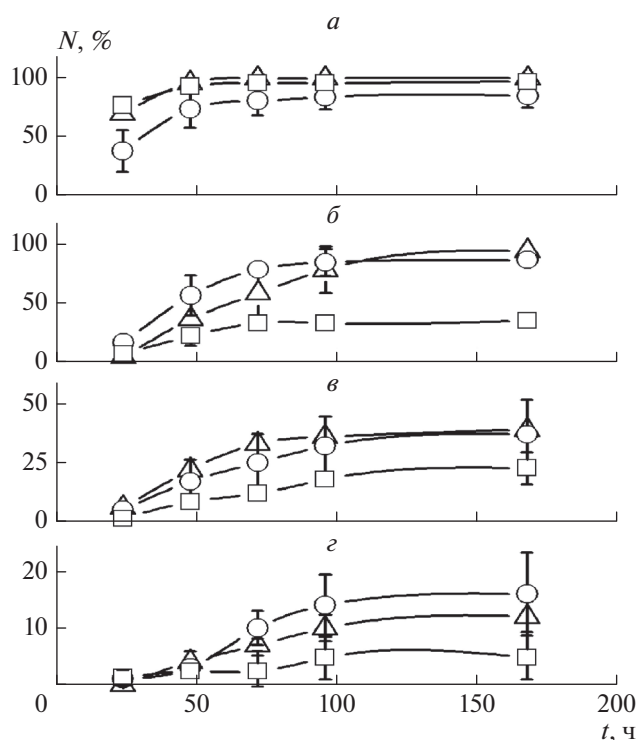
Проращивание в гипомангнитной камере продолжалось 7 сут, каждые сутки записывали количество вновь проросших семян. Проросшими считали семена, имеющие длину корня 2–4 мм. Энергию прорастания отмечали на 3 сутки и всхожесть на 7 сут от начала замачивания. Рассчитывали средне-взвешенное значение периода прорастания семян  $T_{cp}$ , согласно [20]. Измеряли длину корня на 7 сут. Для оценки совместного действия ИИ и ГМУ рассчитывали коэффициент синергического усиления или коэффициент синергизма, как описано в [13].

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Некоторые результаты эксперимента представлены на рис. 1 и 2. Процент проросших семян на 3 сут (энергия прорастания) и на 7 сут (всхожесть), а также средне взвешенное значение периода прорастания семян  $T_{cp}$  представлены в табл. 2.

**Таблица 2.** Характеристики прорастания семян

Вариант	Энергия прорастания, %	Всхожесть, %	$T_{cp}$ , сут
К-К	$95 \pm 4$	$96 \pm 3$	1.29
К-3	$80 \pm 12$	$84 \pm 10$	1.76
К-1	$99 \pm 1$	$99 \pm 1$	1.34
1-d-K	$33 \pm 3$	$35 \pm 6$	2.44
1-d-3	$78 \pm 8$	$86 \pm 8$	2.33
1-d-1	$58 \pm 20$	$94 \pm 3$	3.47
2-d-K	$12 \pm 5$	$23 \pm 7$	3.68
2-d-3	$25 \pm 12$	$37 \pm 15$	3.14
2-d-1	$33 \pm 2$	$39 \pm 3$	2.82
3-d-K	$2.4 \pm 2.8$	$4.8 \pm 3.9$	3.25
3-d-3	$10 \pm 3$	$16 \pm 7$	3.50
3-d-1	$7.0 \pm 1.2$	$12.0 \pm 2.7$	3.58

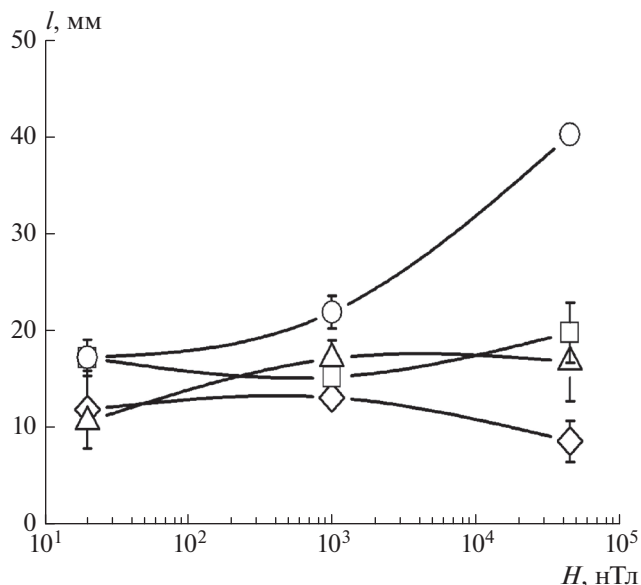


**Рис. 1.** Зависимости количества  $N$  проросших семян от времени  $t$  после замачивания: *a* – контрольные измерения – необлученные семена в ГМК при ослаблении в 50 (кружки) и  $10^3$  (треугольники) раз и необлученные семена в ГМП (квадраты); *б* – семена, облученные в дозе 65 Гр и пророщенные в ГМК при ослаблении в 50 (кружки) и  $10^3$  (треугольники) раз и контроль (квадраты); *в* – семена, облученные в дозе 0.55 кГр и пророщенные при тех же условиях, что и на рис. 1б; *г* – семена, облученные в дозе 5.5 кГр и пророщенные при тех же условиях, что и на рис. 1б. Здесь и далее приведены ошибки, большие размера точек.

Рисунок 1 демонстрирует динамику прорастания семян. Для необлученных семян (рис. 1а) отмечена задержка начала прорастания на 1-е сут при 50-кратном ослаблении ГМП. Причем энергия прорастания и всхожесть этого варианта оказываются сниженными по сравнению с контрольными необлученными семенами и семенами, прораставшими при 1000-кратном ослаблении ГМП (табл. 2).

Облучение семян приводит к подавлению энергии прорастания и их всхожести – примерно на 60, 75 и 90% для величины поглощенной дозы 65 Гр, 0.55 и 5.5 кГр соответственно (К-К, 1-d-К, 2-d-К и 3-d-К (табл. 2)).

Кроме того, оказалось, что облученные семена активнее прорастают в ГМУ для всех значений поглощенной дозы (рис. 1б–1г), т.е. наблюдается стимулирующее действие ГМУ. Наиболее заметен этот эффект при прорастании семян, облученных в дозе 65 Гр (рис. 1б). В этом случае процент проросших семян на 3-и сут при 50-кратном ослабле-



**Рис. 2.** Зависимость длины корешка семян  $L$  на 7 день проращивания от величины ослабления магнитного поля  $H$  (квадраты, ромбы, кружки и треугольники – необлученные семена и облученные в дозе 65 Гр, 0.55 и 5.5 кГр соответственно).

нии превышает число облученных семян, прораставших в обычных условиях (вариант 1-d-К), на 136%, а при 1000-кратном – на 76% (табл. 2, варианты 1-d-3 и 1-d-1 соответственно). Стимуляция ГМУ проявляется и при максимальной дозе облучения 5.5 кГр. Для показателей энергии прорастания и всхожести коэффициент синергического усиления меньше 1, что указывает на антагонистическое действие ИИ и ГМУ. Заметим, что такое же действие ИИ и ГМУ наблюдалось ранее для среднего количества делящихся клеток в стадии ана-телофазы в корневой меристеме проростков салата, полученных из семян, облученных ионами углерода с энергией 400 МэВ/нуклон в дозе 1 Гр [13].

В табл. 2 также представлены средневзвешенные значения среднего срока прорастания семян  $T_{cp}$ . При проращивании необлученных семян в обычных условиях максимальное количество семян (около 75%) прорастает в первые сутки, меньшее на вторые (около 15%), далее прорастают единичные семена. Соответственно вариант КК имеет минимальный показатель  $T_{cp}$ . При 50-кратном ослаблении ГМП количество проросших семян на 1-е сут снижается и увеличивается на 2-е сут, однако  $T_{cp}$  все же остается меньше 2. Облученные семена характеризуются растянутым во времени прорастанием, при этом небольшое количество семян прорастает на 1-е сут.

Максимальная длина корня на 7 сут отмечена при прорастании контрольных необлученных се-

мян в условиях обычного геомагнитного поля (рис. 2). В этих же условиях с увеличением дозы длина корня уменьшается. При прорастании необлученных семян при  $10^3$  нТл длина корня оказывается сниженной примерно на 45%, а при 50 нТл – на 55%. Проращивание в ГМУ приводит к уменьшению длины корня у проростков, полученных из семян, облученных в дозе 65 Гр. При проращивании семян, облученных в дозе 0.55 кГр, снижение длины корня отмечено при 50 нТл. Наблюдается некоторая стимуляция и увеличение длины корня при прорастании в ГМУ семян, облученных в дозе 5.5 кГр, что может быть связано с активацией процесса растяжения клеток корня.

Таким образом, облучение семян салата дейтронами с энергией 13.7 МэВ приводит к сильному подавлению энергии их прорастания и всхожести. Проращивание облученных семян в ГМУ существенно влияет на основные характеристики их прорастания, частично нивелируя действие ИИ.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ полученных результатов позволил сделать следующие выводы.

1. Облучение семян салата *Lactuca sativa* дейтронами в дозах 65 Гр, 0.55 и 5.5 кГр приводит к задержке начала прорастания и снижению количества проросших семян.

2. Проращивание семян в ГМУ приводит к изменению ответа семян, облученных радиацией в зависимости от дозы. В частности, в ГМУ увеличивается количество проросших семян, облученных в дозах, близких к летальным или превышающим летальные в полевых условиях.

Итак, использование пучка заряженных частиц (дейтронов), ускоренных с помощью 120-см циклотрона до энергии 15.3 МэВ, и гипомагнитной камеры, ослабляющей геомагнитное поле до  $10^3$  раз, позволяет успешно моделировать совместное воздействие на биологические объекты двух негативных факторов при космических полетах за магнитосферой Земли – ИИ и ГМУ.

Полученные результаты могут быть важны для решения проблемы обеспечения радиационной и гипомагнитной безопасности как для экипажей, так и для биологических элементов систем их жизнеобеспечения на окололунных станциях, будущей лунной базе и пилотируемых дальних космических кораблей.

Значительная часть результатов получена впервые и имеет практическую и фундаментальную научную ценность.

Работа выполнена при использовании оборудования, приобретенного НИИЯФ МГУ за счет

“Программы развития Московского университета” и поддержке программы фундаментальных исследований ГНЦ РФ ИМБП РАН.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Невзгодина Л.В., Григорьев Ю.Г., Маренный А.М.* Действие тяжелых ионов на биологические объекты. М.: Энергоатомиздат, 1990. 216 с.
2. *Бинги В.Н.* Принципы электромагнитной биофизики. М.: Физматлит, 2011. 592 с.
3. *Казначеев В.П., Михайлова Л.П.* Биоинформационная функция естественных электромагнитных полей. Новосибирск: Наука, 1985. 185 с.
4. *Asashima M., Shimada R., Pfeifer C.J.* // *Bioelectromagnetics*. 1991. V. 12(4). P. 215.
5. *Осипенко М.А., Межевикина Л.М., Крастс И.В. и др.* // *Биофиз.* 2008. Т. 53. № 4. С. 705.
6. *Походзей Л.В.* // Матер. междунар. совещания “Электромагнитные поля. Биологическое действие и гигиеническое нормирование”. Женева: изд. ВОЗ, 1999. С. 237.
7. *Походзей Л.В., Пальцев Ю.П., Рубцова Н.Б.* // *Ежегодник РНКЗНИ.* М.: АЛЛАНА, 2012. С. 69.
8. *Платова Н.Г., Лебедев В.М., Спасский А.В. и др.* // *Авиакосм. и экол. медицина.* 2016. Т. 50. № 5. С. 172.
9. *Лебедев В.М., Платова Н.Г., Спасский А.В. и др.* // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2016. Т. 80. № 3. С. 378; *Lebedev V.M., Platova N.G., Spassky A.V. et al.* // *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 2016. V. 80. № 3. P. 343.
10. *Платова Н.Г., Лебедев В.М., Спасский А.В. и др.* // *Авиакосм. и экол. медицина.* 2016. Т. 50. № 3. С. 35.
11. *Платова Н.Г., Лебедев В.М., Спасский А.В. и др.* // *Изв. РВМА.* 2017. Т. 36. № 2(1). С. 204.
12. *Платова Н.Г., Лебедев В.М., Спасский А.В. и др.* // *Авиакосм. и экол. медицина.* 2018. Т. 52. № 7. С. 189.
13. *Платова Н.Г., Лебедев В.М., Спасский А.В. и др.* // *Авиакосм. и экол. медицина.* 2019. Т. 53. № 4. С. 93.
14. *Труханов К.А.* // *Тр. междунар. конф. “Влияние косм. погоды на человека в космосе и на Земле.* Т. 1. М.: Изд-во ИКИ, 2013. С. 249.
15. *Новиков В.В., Шейман И.М., Фесенко Е.Е.* // *Биофиз.* 2007. Т. 52. № 5. С. 912; *Novikov V.V., Sheiman I.M., Fesenko E.E.* // *Biophys.* 2007. V. 52. № 5. P. 498.
16. *Никитина Е.А., Медведева А.В., Герасименко М.С. и др.* // *Журн. высшей нерв. деят.* 2017. Т. 67. № 2. С. 246.
17. *Саркисян Л.А., Кирьянов Е.Ф., Воробьев Ю.А.* // *ПТЭ.* 1979. № 1. С. 19.
18. *Преображенская Е.И.* Радиоустойчивость семян растений. М.: Атомиздат, 1971. 232 с.
19. *Гудошников С.А., Венедиктов С.Н., Гребенищikov Ю.Б. и др.* // *Изв. техн.* 2012. № 3. С. 58; *Gudoshnikov S.A., Venediktov S.N., Grebenshchikov Yu.B. et al.* // *Meas. Techn.* 2012. № 3. P. 329.
20. *Бухаров А.Ф., Балеев Д.Н., Бухарова А.Р.* // *Изв. ТСХА.* 2017. № 2. С. 5.