

УДК 537.58:53.047

БИОЛОГИЧЕСКОЕ ДЕТЕКТИРОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ, СВЯЗАННЫХ С СИЛЬНОТОЧНЫМ ЭЛЕКТРОВЗРЫВОМ ПРОВОДНИКОВ В ВАКУУМЕ

© 2020 г. Е. А. Пряхин^{1, *}, Л. И. Уруцкоев², Е. В. Стяжкина^{1, 3}, Г. А. Тряпицына^{1, 3}, А. Е. Алдибекова¹, А. А. Перетыкин¹, Е. Е. Пряхин⁴, К. А. Алабин⁵, Н. Д. Пилиа⁶, Н. З. Чиковани⁶, Д. А. Войтенко⁶, Р. М. Аршба⁶

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
“Уральский научно-практический центр радиационной медицины
Федерального медико-биологического агентства России”, Челябинск, Россия

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
“Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации”,
Москва, Россия

³Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
“Челябинский государственный университет”, Челябинск, Россия

⁴Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования и науки
“Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж.И. Алфёрова
Российской академии наук”, Санкт-Петербург, Россия

⁵Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Федеральный исследовательский центр “Институт общей физики имени А.М. Прохорова
Российской академии наук”, Москва, Россия

⁶Государственное научное учреждение “Сухумский физико-технический институт” Академии наук Абхазии,
Сухум, Абхазия

*E-mail: pryakhin@yandex.ru

Поступила в редакцию 18.06.2020 г.

После доработки 10.07.2020 г.

Принята к публикации 27.07.2020 г.

Исследовано влияние физических факторов, связанных с сильноточным электровзрывом проводников в вакууме (импульсное магнитное поле, световое воздействие, излучение, оставляющее специфические треки на ядерных эмульсиях и других материалах) на биологические системы. Влияние оценивали по уровню повреждений ядерной ДНК в лейкоцитах периферической крови человека, частоте хромосомных aberrаций в делящихся клетках корня лука, скорости роста зеленых одноклеточных водорослей, прорастанию и скорости роста семян растений.

DOI: 10.31857/S036767652011023X

ВВЕДЕНИЕ

Электровзрыв металлических микропроводников интенсивно исследуется с начала 1960-х гг. [1]. В настоящее время интерес к этому явлению сохраняется в связи с его широким применением как в технике, так и в фундаментальных научных исследованиях [2–5]. В ряде работ было показано наличие связи между факторами, связанными с электровзрывом проводников (сверхсильные магнитные поля, плотная неидеальная низкотемпературная плазма), и слабыми ядерными процессами [6–9]. В ряде экспериментов было показано, что электровзрыв проводников сопровождается появлением неизвестного вида излучения, оставляющего необычные следы на ядерных эмульсиях и рентгеновских пленках [10, 11]. Была высказана

гипотеза, что эти графические характеристики треков, взятые в комплексе, могут характеризовать новый тип проникающего излучения неизвестной природы (“странное” излучение) [10].

Вопрос о природе и механизмах взаимодействия с веществом “странного” излучения, кроме фундаментальной физической стороны проблемы, имеет дополнительный аспект, связанный с необходимостью изучения взаимодействия этого излучения с биологическими системами. Биологические системы могут рассматриваться как один из возможных способов детектирования излучения, а также являются инструментом оценки опасности “странного” излучения для здоровья человека и других биологических объектов. Помимо “странного” излучения электровзрыв про-

водников сопровождается индукцией ряда факторов, способных оказывать биологическое действие: световая вспышка и импульс магнитного поля. В ряде экспериментов были выявлены изменения реакции биологических систем на воздействие физических факторов электровзрыва, в том числе “странного” излучения [12, 13]. Настоящая работа представляет собой попытку выделить среди действующих факторов электровзрыва биологические эффекты собственно “странного” излучения.

Целью настоящей работы была оценка возможности детектирования факторов, связанных с сильноточным взрывом вольфрамовой проволоочки в вакууме, с применением таких биологических объектов как лейкоциты человека, семена лука (*Allium cepa*), семена латука (*Lactuca sativa*), одноклеточные водоросли (*Scenedesmus quadricauda*).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В экспериментах по изучению действия факторов, связанных с возникновением низкотемпературной плазмы, на биологические объекты, использовали установку Гелиос, с помощью которой осуществлялся сильноточный электровзрыв вольфрамовой проволоочки в вакууме [14]. Подробное описание условий экспериментов по изучению влияния факторов электровзрыва на биологические объекты приведено в [15]. Коротко можно отметить, что сильноточный электровзрыв проволоочек сопровождался мощной вспышкой света с уровнем освещенности $\sim 10^9$ лк, импульсом магнитного поля с амплитудой ≤ 10 Гс в месте расположения биологических объектов, и не было зарегистрировано ионизирующих излучений методами ТЛД дозиметрии [15]. Кроме этого, на стеклах, расположенных внутри разрядной камеры (рис. 1а и 1б), и на рентгеновских пленках, расположенных в месте расположения биологических объектов (рис. 1в и 1г), были зарегистрированы артефакты, очень похожие на описанные ранее треки “странного” излучения [10, 11].

Для выяснения роли светового воздействия, импульсного магнитного поля и “странного” излучения в индукции биологических эффектов использовали различные виды экранирования биологических объектов во время электровзрыва. Биологические объекты без экранирования подвергались воздействию всего комплекса факторов. Экранирование черной фотонепроницаемой бумагой толщиной 150 мкм устраняло действие видимого и ультрафиолетового световых излучений. Экранирование с использованием алюминиевой фольги толщиной 40 мкм, пластины из бериллия (100 мкм), свинцовой фольги (200 мкм) устраняло воздействие излучений видимого и ультрафиолетового спектров, а также воздействие импульсного магнитного поля.

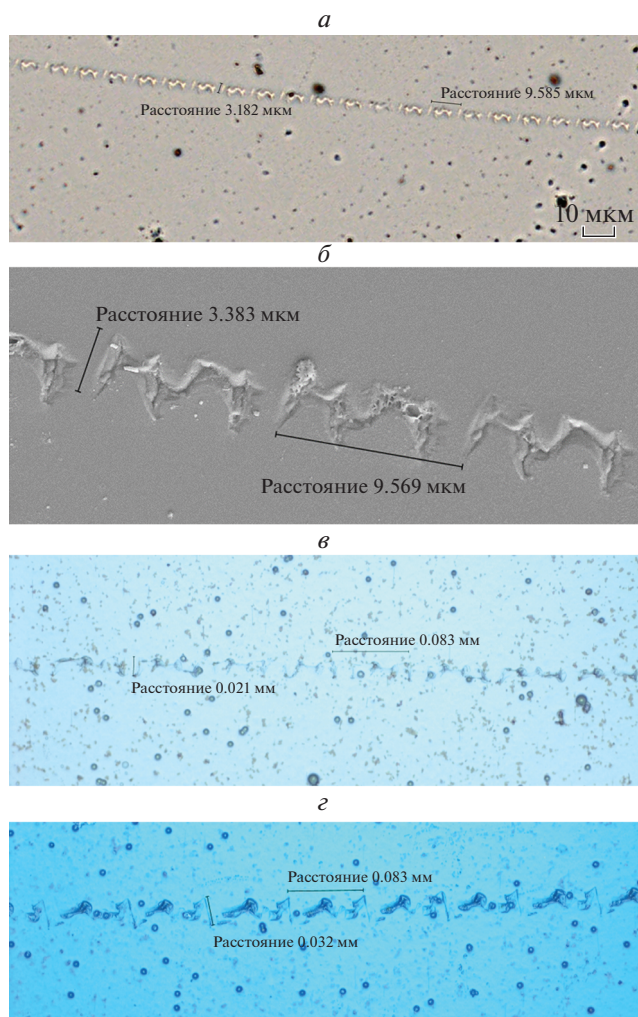


Рис. 1. Трек “странного” излучения, зарегистрированный на стекле, расположенном во время электровзрыва внутри разрядной камеры, световая микроскопия (а); трек “странного” излучения, зарегистрированный на стекле, расположенном во время электровзрыва внутри разрядной камеры, электронная сканирующая микроскопия (б); треки “странного” излучения, зарегистрированные на рентгеновских пленках Carestream D-Speed, расположенных в месте расположения биологических объектов во время электровзрыва снаружи разрядной камеры, световая микроскопия (в, г).

трафиолетового спектров, а также воздействие импульсного магнитного поля.

В качестве тест-систем при оценке биологического действия факторов электровзрыва использовали: лейкоциты периферической крови человека (оценка генотоксического действия по изменению уровня повреждения клеточной ДНК методом ДНК-комет), проростки семян лука (*Allium cepa*) (оценка генотоксического действия по изменению частоты хромосомных aberrаций в делящихся клетках корня проростка семян), лабораторную культуру одноклеточных зеленых водорослей



Рис. 2. Расположение контейнеров с биологическими объектами вокруг кварцевой стенки разрядно-взрывной камеры.

Scenedesmus quadricauda (оценка влияния на скорость роста культуры водорослей) и семена латука (*Lactuca sativa*) (оценка влияния на всхожесть и скорость роста проростка семян).

Для осуществления воздействия на биологические объекты, они были помещены в полиэтиленовые пробирки Эппендорфа. Перед экспозицией пробирки Эппендорфа с биологическими объектами помещали в алюминиевые контейнеры, размером $10 \times 10 \times 40$ мм, изготовленные из алюминиевого швеллера с размерами $10 \times 15 \times 10 \times 1$ мм (длиной 40 мм). Одна из сторон контейнера была открыта. С открытой стороны проводили экранирование биологических объектов черной бумагой, алюминиевой фольгой, бериллиевой пластиной и свинцовой фольгой. Контейнеры с образцами располагали с внешней стороны разрядно-взрывной камеры вплотную к кварцевой стенке, экранированной стороной по направлению к вольфрамовой проволочке (рис. 2).

С помощью метода ДНК-комет на субклеточном (молекулярном) уровне оценивали генотоксическое действие исследуемых факторов на клетки периферической крови человека, а именно, повреждение молекулы ДНК, связанное с повышением вероятности злокачественного опухолевого процесса. Использовали периферическую кровь пяти взрослых здоровых добровольных доноров. Образцы от каждого из доноров подвергались воздействию отдельного взрыва. Уровень повреждения ДНК определяли с применением щелочного варианта метода ДНК-комет [11]. Этот метод оценивает количество повреждений молекулы ДНК на основе количества и размеров отрицательно заряженных фрагментов ДНК, мигрирующих в электрическом поле в агарозном геле (чем больше повреждений ДНК, тем больше количество фраг-

ментов ДНК и меньше их размеры и, соответственно, больше длина хвоста “кометы” и доля мигрировавшей ДНК). У каждого донора в каждой экспериментальной группе оценивали состояние ДНК в 70–100 отдельных клетках крови. Генотоксическое действие исследуемых факторов, кроме оценки с применением клеток человека, оценивали по изменению частоты хромосомных aberrаций (повреждения ДНК, видимые как нарушения целостности, количества, формы или внутренней структуры хромосом под микроскопом во время деления клеток) в делящихся клетках корня проростка семян лука (*Allium cepa*) с помощью Allium-теста [16]. В исследовании использовали семена лука репчатого сорта “Забяка” (ООО “Группа компаний “Гавриш”, партия № 25753, 2018). В каждой группе анализировали частоту хромосомных aberrаций в не менее 500 ана-телофаз. Оценку влияния факторов электровзрыва на рост одноклеточных зеленых водорослей *Scenedesmus quadricauda* проводили в соответствии с методикой, описанной в [17]. В соответствии с этой методикой можно оценить токсическое (подавление роста) или стимулирующее действие (стимуляция роста в благоприятных условиях) исследуемых факторов на отдельные клетки, которые в данном случае представляют целый одноклеточный организм. Было проведено две независимых серии экспериментов. Для определения относительного количества различных групп клеток (ценобиев) подсчитывали не менее 200 ценобиев. Всхожесть и скорость роста проростка семян латука проводили в соответствии с методикой [18]. В исследовании использовали семена латука (ГУП Семена ОАО “Флора”, партия № 1010, 2018). Семена представляют собой многоклеточный организм, а стадия прорастания является наиболее чувствительной к действию различных факторов, что позволяет оценить действие исследуемых факторов на уровне целого многоклеточного организма. Было проведено три серии независимых экспериментов. В каждой серии на экспериментальную группу приходилось 95–120 семян.

Статистический анализ [18, 19] включал в себя расчет средних значений анализируемых биологических показателей и определение стандартной ошибки. Различия средних значений определяли с помощью *t*-критерия Стьюдента. Проводили многофакторный дисперсионный анализ признаков сопряженности в главной линейной модели. Анализировали качество модели по значению коэффициента детерминации (R^2), статистическую значимость влияния анализируемых факторов оценивали с помощью *F*-критерия Фишера. О направленности влияния анализируемых факторов на зависимый показатель судили по значению коэффициентов в уравнении в главной линейной модели. Различия принимали статистически значимыми при вероятности 0-гипотезы $p < 0.05$.

Таблица 1. Момент хвоста в клетках периферической крови человека после экспериментального воздействия в различных экспериментальных группах (метод ДНК-комет)

Группа	Условия экспериментов	Момент хвоста	Сравнение с контролем
1	Контроль	144.0 ± 7.8	
2	ЭВ, без экранирования	139.2 ± 6.4	$t = 0.48; p = 0.63$
3	ЭВ, экранирование черной бумагой	135.7 ± 8.0	$t = 0.74; p = 0.46$
4	ЭВ, экранирование (Al)	131.8 ± 6.3	$t = 1.23; p = 0.22$
5	ЭВ, экранирование (Be)	83.0 ± 5.4	$t = 6.42; p = 3.0 \cdot 10^{-10}$
6	ЭВ, экранирование (Pb)	215.9 ± 9.8	$t = 5.73; p = 1.7 \cdot 10^{-8}$

Здесь и далее в таблицах представлено среднее значение ± стандартная ошибка. ЭВ – электровзрыв проволоочки в вакууме.

Таблица 2. Результаты многофакторного дисперсионного анализа влияния различных факторов электровзрыва на момент хвоста в клетках периферической крови человека после экспериментального воздействия (метод ДНК-комет)

Факторы	<i>F</i>	<i>p</i>	Коэффициент ГЛМ
“Донор”	510.1	≤0.001	донор 1: 45.3 ± 6.6 донор 2: 2.2 ± 6.5 донор 3: 233.2 ± 6.2 донор 4: 146.8 ± 6.1 донор 5: 0
“Странное” излучение	45.0	$2.8 \cdot 10^{-11}$	-42.2 ± 6.3
Световое воздействие	28.9	$8.7 \cdot 10^{-8}$	39.8 ± 7.4
ИМП	1.1	0.30	0
Материал экранирования	317.6	$5.0 \cdot 10^{-65}$	0.557 ± 0.031

$$R^2 = 0.596$$

Здесь и далее ГЛМ – главная линейная модель, ИМП – импульсное магнитное поле.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Показатели состояния ядерной ДНК лейкоцитов периферической крови человека, представлены в табл. 1. В таблице приведен показатель “момент хвоста” кометы, который принято считать оптимальным при оценке степени деградации ДНК методом ДНК-комет [20]. “Момент хвоста” представляет собой безразмерный показатель, полученный путем произведения длины миграции ДНК и процента мигрировавшей из ядерной области фрагментов ДНК. Чем больше уровень повреждения ДНК, тем больше показатель момента хвоста. При оценке уровня повреждения ДНК методом ДНК-комет было показано, что фоновые (исходные) состояния ядерной ДНК в лейкоцитах периферической крови доноров заметно отличались друг от друга, что, очевидно, отражало индивидуальные особенности доноров. Значения момента хвоста в лейкоцитах периферической крови, которые не были экранированы во время электровзрыва, а также в группах с экранированием фотонепроницаемой черной бумагой и алюминиевой фольгой были несколько ниже, чем в

группе контроля, однако эти отклонения не были статистически значимыми (табл. 1). В группе с экранированием пластиной из бериллия было выявлено статистически значимое снижение значения параметра повреждения ДНК – момента хвоста кометы – на 42% ($t = 6.42; p = 3.0 \cdot 10^{-10}$) по сравнению со значением показателя в контрольной группе. При экранировании образцов крови фольгой из свинца отмечали статистически значимое увеличение уровня повреждения ДНК на 50% ($t = 5.73; p = 1.7 \cdot 10^{-8}$), по сравнению со значениями параметра момента хвоста кометы в контрольной группе.

При проведении многофакторного дисперсионного анализа в главной линейной модели было выявлено (табл. 2), что уровень повреждения ядерной ДНК зависит от индивидуальных особенностей доноров ($F = 825.8; p \leq 0.001$). Значение коэффициента для фактора “световое воздействие” (39.8 ± 7.4) в главной линейной модели показывает, что этот компонент воздействия факторов электровзрыва приводит к статистически значимому повышению уровня повреждения ядер-

Таблица 3. Частота хромосомных aberrаций в клетках меристемы корня проростка семян лука через сутки после экспериментального воздействия в различных экспериментальных группах.

Группа	Условия экспериментов	Частота клеток с хромосомными aberrациями, %	Сравнение с контролем
1	Контроль	1.39 ± 0.52	
2	ЭВ, без экранирования	7.6 ± 1.2	$t = 4.75; p = 2.3 \cdot 10^{-6}$
3	ЭВ, экранирование черной бумагой	9.3 ± 1.3	$t = 5.65; p = 2.1 \cdot 10^{-8}$
4	ЭВ, экранирование (Al)	4.17 ± 0.89	$t = 2.70; p = 7.5 \cdot 10^{-3}$
5	ЭВ, экранирование (Be)	6.5 ± 1.1	$t = 4.20; p = 2.9 \cdot 10^{-5}$
6	ЭВ, экранирование (Pb)	5.46 ± 0.99	$t = 3.64; p = 2.9 \cdot 10^{-4}$

ной ДНК ($F = 28.9; p = 8.7 \cdot 10^{-8}$). Импульсное магнитное поле не оказывало статистически значимого влияния на уровень повреждения ДНК ($F = 1.1; p = 0.3$), а “странное” излучение с высоким уровнем значимости ($F = 45.0; p = 2.8 \cdot 10^{-11}$) приводило к снижению уровня повреждения ДНК (коэффициент для этого фактора в главной линейной модели был равен -42.2 ± 6.3). Одновременно с этим было выявлено, что материал экранирования существенно модифицирует эффекты “странного” излучения ($F = 317.6; p = 5.0 \cdot 10^{-65}$). Уровень повреждения ядерной ДНК повышался в зависимости от атомной массы материала экранирования с коэффициентом 0.557 ± 0.031 на единицу атомной массы. Следует отметить, что развитая модель хорошо описывает экспериментальные данные ($R^2 = 0.596$).

Среди других факторов электровзрыва световое воздействие может повреждать ДНК преимущественно за счет ультрафиолетовой компоненты в спектре светового излучения [21]. Для объяснения снижения уровня повреждений ДНК под действием “странного” излучения можно сформулировать 2 гипотезы: 1) “странное” излучение приводит к выраженной стимуляции процессов репарации ядерной ДНК, так, что даже фоновый уровень теплового повреждения ДНК становится более низким; 2) “странное” излучение, модифицированное взаимодействием с материалами, обладающими низкой атомной массой, приводит к индукции сшивок ДНК–ДНК и ДНК–белок, что тоже может проявляться в снижении фонового уровня повреждений ядерной ДНК в клетках периферической крови человека. В ряде работ было показано, что агенты, способные индуцировать сшивки ДНК–ДНК и ДНК–белок, приводят к снижению уровня повреждений ДНК, индуцированных перекисью водорода или гамма-облучением [22].

Повышение уровня повреждения ядерной ДНК в зависимости от атомной массы материала экранирования позволяет предположить, что “странное” излучение по-разному взаимодействует с ве-

ществом в зависимости от его атомной массы. В результате такого взаимодействия либо происходит существенно изменение физических свойств “странного” излучения, либо происходит индукция вторичного излучения, которое количественно или качественно зависит от атомной массы экранирующего материала и, соответственно, индуцирует в биологических системах различные по направленности биологические эффекты.

Кроме оценки влияния исследуемых факторов на целостность ядерной ДНК лейкоцитов периферической крови человека, был проведен эксперимент по оценке действия факторов, связанных с электровзрывом на индукцию хромосомных aberrаций с применением Allium-теста (определение мутагенного действия факторов по изменению частоты хромосомных aberrаций в клетках корня лука).

В наших экспериментах было выявлено, что во всех группах, где корни проростка семян лука подвергались воздействию во время электровзрыва, было зарегистрировано статистически значимое повышение частоты хромосомных aberrаций (табл. 3). Максимально выраженным такой эффект был в группе, где проростки семян лука экранировали во время электровзрыва черной бумагой (увеличение частоты хромосомных aberrаций в 6.7 раза), а минимальным в группе с экранированием алюминием (повышение частоты хромосомных aberrаций в 3 раза).

Проведение многофакторного дисперсионного анализа показало, что частота хромосомных aberrаций зависела от воздействия “странного” излучения ($F = 9.73; p = 0.002$), что проявлялось в повышении показателя в среднем на $4.0 \pm 1.3\%$, и действия импульсного магнитного поля ($F = 9.50; p = 0.002$), что приводило к сопоставимому с эффектом “странного” излучения действию – повышению частоты хромосомных aberrаций на $3.9 \pm 1.3\%$ (табл. 4). При этом не было выявлено статистически значимого влияния фактора светового воздействия ($F = 1.42; p = 0.23$) и материала экра-

Таблица 4. Результаты многофакторного дисперсионного анализа влияния различных факторов электровзрыва на частоту хромосомных aberrаций в клетках корня проростка семян лука (*Allium*-тест)

Факторы	<i>F</i>	<i>p</i>	Коэффициент ГЛМ
“Странное” излучение	9.73	0.002	4.0 ± 1.3
Световое воздействие	1.42	0.23	0
ИМП	9.50	0.002	3.9 ± 1.3
Материал экранирования	0.005	0.94	0

$R^2 = 0.011$

Таблица 5. Доля одноклеточных ценобиев в культуре водорослей *Scenedesmus quadricauda* через 3 сут после экспериментального воздействия в различных экспериментальных группах

Группа	Условия экспериментов	Доля одноклеточных ценобиев, %	Сравнение с контролем
1	Контроль	20.9 ± 7.3	
2	ЭВ, без экранирования	11.8 ± 7.2	$t = 0.89; p = 0.39$
3	ЭВ, экранирование черной бумагой	20.9 ± 8.9	$t = 0; p = 1.0$
4	ЭВ, экранирование (Al)	11.5 ± 6.6	$t = 0.95; p = 0.36$
5	ЭВ, экранирование (Be)	7.7 ± 5.0	$t = 1.49; p = 0.17$
6	ЭВ, экранирование (Pb)	14.1 ± 5.5	$t = 0.75; p = 0.47$

нирования ($F = 0.005; p = 0.94$) на анализируемый показатель.

Результаты *Allium*-теста позволяют уверенно отклонить гипотезу о том, что “странное” излучение приводит к резкому повышению эффективности репарации и, наоборот, не противоречит гипотезе о индукции “странным” излучением таких повреждений ДНК, как сшивки ДНК–ДНК и сшивки ДНК–белок.

Действие факторов, связанных с сильноточным взрывом проводников в вакууме, на клеточном уровне оценивали в модели роста одноклеточных зеленых водорослей *Scenedesmus quadricauda*. Эти одноклеточные водоросли могут существовать как одноклеточные организмы, одновременно с этим они могут формировать группы (ценобии) из 4, 8 и 16 клеток [23]. Влияние факторов электровзрыва на одноклеточные водоросли оценивали по следующим показателям: скорость роста культуры водорослей (количество клеток *Scenedesmus quadricauda* на 4 сут культивирования), доля 1, 2, 4 и 8 клеточных ценобиев (%). Оценка воздействия выполнена в двух сериях экспериментов.

В ходе исследований не было выявлено статистически значимого влияния факторов электровзрыва на скорость роста одноклеточных водорослей *Scenedesmus quadricauda*. В благоприятных условиях зеленые водоросли *Scenedesmus quadricauda* формируют преимущественно 4 клеточные ценобии. Неблагоприятные для жизнедеятельности водорослей условия приводят к повышению в

культуре доли одноклеточных ценобиев и, наоборот, при более благоприятных условиях в культуре повышается доля 4, 8 даже 16 клеточных ценобиев. В наших экспериментах в группе контроля доля одноклеточных ценобиев составила 20.9 ± 7.3% (табл. 5). Изменения доли одноклеточных ценобиев во всех экспериментальных группах не достигали статистической значимости. Однако проведение многофакторного дисперсионного анализа с использованием общей линейной модели позволило выявить, что доля одноклеточных ценобиев зависела от серии эксперимента ($F = 84.25; p = 4.6 \cdot 10^{-10}$), “странное” излучение приводило к статистически значимому ($F = 6.2; p = 0.015$) снижению показателя в среднем на 11.8 ± 5.5% (табл. 6). Кроме этого, на биологический эффект “странного” излучения статистически значимое влияние ($F = 4.66; p = 0.039$) оказывало импульсное магнитное поле. Действие этого фактора приводило к повышению доли одноклеточных ценобиев на 11.5 ± 5.4%.

Действие факторов, связанных с сильноточным взрывом проводников в вакууме на организменном уровне, оценивали в модели прорастания семян латука. Влияние исследуемых факторов на семена латука оценивали по следующим показателям: прорастание семян (%), длина корня проростка (мм), длина ростка проростка (мм). Было выполнено 3 независимых серии экспериментов. В ходе исследований не было выявлено статистически значимого влияния факторов электровзрыва на всхожесть и длину корня проростка семян латука. Средняя длина ростка проростка семян

Таблица 6. Результаты многофакторного дисперсионного анализа влияния различных факторов электровзрыва на долю одноклеточных ценобиев в культуре водорослей *Scenedusmus quadricauda* через 3 сут после экспериментального воздействия

Факторы	F	p	Коэффициент ГЛМ
Серия экспериментов	45.85	$1.65 \cdot 10^{-7}$	Серия 1: $24.0 \pm 3,5$ Серия 2: 0
ЭВ, “странное” излучение	4.66	0.039	-11.8 ± 5.5
ЭВ, световое воздействие	2.06	0.16	0
ЭВ, ИМП	4.62	0.040	11.5 ± 5.4
ЭВ, материал экранирования	0.78	0.38	0
$R^2 = 0.64$			

Таблица 7. Длина ростка проростка семян латука в различных экспериментальных группах

Группа	Условия экспериментов	Длина ростка, мм	Сравнение с контролем
1	Контроль	14.60 ± 0.54	
2	ЭВ, без экранирования	13.28 ± 0.52	$t = 1.76; p = 0.08$
3	ЭВ, экранирование черной бумагой	12.89 ± 0.51	$t = 2.3; p = 0.022$
4	ЭВ, экранирование (Al)	12.16 ± 0.53	$t = 3.23; p = 0.0013$
5	ЭВ, экранирование (Be)	13.09 ± 0.53	$t = 2.0; p = 0.046$
6	ЭВ, экранирование (Pb)	13.67 ± 0.52	$t = 1.24; p = 0.22$

латука в контрольной группе при анализе данных 3 серий эксперимента составила 14.60 ± 0.54 мм. При анализе длины ростка латука в различных экспериментальных группах было выявлено, что статистически значимое снижение показателя по сравнению с контролем было зарегистрировано в группах, где семена во время электровзрыва были экранированы черной бумагой (снижение длины ростка на 12%), бериллиевой пластиной (13%), алюминиевой фольгой (17%) (табл. 7).

При проведении многофакторного дисперсионного анализа влияния исследуемых факторов на длину ростка семян латука было выявлено, что дли-

на ростка статистически значимо различалась в различных сериях эксперимента ($F = 7.56, p = 0.001$) (табл. 8). Кроме этого, было выявлено статистически значимое влияние на этот показатель “странного” излучения ($F = 7.27, p = 0.007$), что проявлялось в снижении длины ростка в среднем на 1.60 ± 0.59 мм. Другие факторы электровзрыва не оказывали статистически значимого влияния на длину ростка проростка семян латука.

Таким образом, на организменном уровне (биологическая модель прорастания семян латука) среди факторов сильнооточного электровзрыва в вакууме единственным биологически значи-

Таблица 8. Результаты многофакторного дисперсионного анализа влияния различных факторов электровзрыва на длину ростка пророста семян латука

Факторы	F	p	Коэффициент ГЛМ
Серия эксперимента	7.56	0.001	Серия 1: 3.48 ± 0.96 Серия 2: 1.24 ± 0.53 Серия 3: 0
ЭВ, “странное” излучение	7.27	0.007	-1.60 ± 0.59
ЭВ, световое воздействие	0.24	0.62	0
ЭВ, ИМП	0.62	0.43	0
ЭВ, материал экранирования	1.46	0.23	0
$R^2 = 0.018$			

мым является фактор “странного” излучения. Наиболее чувствительным к действию этого фактора является росток проростка. Направленность биологических эффектов – снижение длины роста и всего проростка не противоречит данным о генотоксических эффектах, регистрируемых методом ДНК-комет и с помощью Allium-теста и может быть проявлением индукции в клетках сшивок макромолекул (белков и ДНК).

Проведенные ранее исследования по оценке биологического действия факторов, связанных с электровзрывом проводников (титановая фольга) в конденсированных средах (40% водный раствор глицерина), показали, что при экспозиции мышей в течение 4 сут во время 14 электровзрывов у них развивалась реакция по типу адаптивного ответа, которая проявлялась в снижении частоты эритроцитов костного мозга с микроядрами (результат грубых хромосомных aberrаций), индуцированных дополнительным тестирующим общим внешним гамма-излучением в дозе 2 Гр [19]. Кроме этого было показано, что экранирование мышей алюминием и железом модифицировало биологические эффекты факторов электровзрыва [19]. Следует отметить, что в проведенных ранее исследованиях было сложно разделить эффекты светового, звукового воздействия, импульсного магнитного поля и обоснованно связать выявленные биологические эффекты с действием “странного” излучения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Постановка экспериментов с применением различных материалов для экранирования и проведенный статистический анализ дали возможность разделить биологические эффекты светового воздействия, импульсного магнитного поля и “странного” излучения, что позволило впервые получить результаты, которые можно интерпретировать как биологическое действие “странного” излучения.

Результаты проведенных экспериментов показали, что применение биологических систем для индикации “странного” излучения подтверждает, что это излучение является проникающим и позволяет сформулировать гипотезу, о том, что материал экранирования модифицирует “странное” излучение в зависимости от атомной массы материала экранирования. Кроме того, полученные результаты в виде снижения уровня повреждения ядерной ДНК в клетках периферической крови человека вместе с повышением частоты хромосомных aberrаций в делящихся клетках корня проростка лука позволяют поставить вопрос о возможном благоприятном или неблагоприятном действии “странного” излучения на здоровье человека при воздействии с уровнями, характерными для электровзрыва в вакууме непосредственно вблизи разрядной камеры.

Были зарегистрированы следующие факторы, связанные с высокоточным взрывом проводников в вакууме: световое воздействие; импульсное магнитное поле; “странное” излучение, подтвержденное регистрацией треков на стекле внутри взрывной камеры и на рентгеновских пленках в месте расположения биологических объектов. В ходе многофакторного дисперсионного анализа в главной линейной модели показано, что во всех 4 биологических моделях (лейкоциты периферической крови человека, семена лука и латука, одноклеточные зеленые водоросли *Scenedesmus quadricauda*) обнаруживается биологическое действие проникающего “странного” излучения. Это воздействие проявлялось в следующих эффектах: 1) снижение уровня повреждения ДНК в лейкоцитах периферической крови человека; 2) повышение частоты хромосомных aberrаций в клетках корня лука; 3) снижение длины роста семян латука; 4) снижение доли одноклеточных ценобиов в культуре зеленых водорослей *Scenedesmus quadricauda*.

Материалы, используемые для экранирования (бериллий, бумага, алюминий, свинец), модифицируют биологическое действие “странного” излучения: уровень повреждений ядерной ДНК нарастает с увеличением атомной массы материала экранирования, что позволяет предположить, что физическое взаимодействие “странного” излучения с веществом зависит от атомной массы вещества. Результаты исследования позволяют сформулировать гипотезу о том, что биологическое действие “странного” излучения связано с повреждением ДНК за счет индукции сшивок ДНК–ДНК и сшивок ДНК–белок.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Академии наук Абхазии (проект № 19-52-40003). Авторы благодарят А.И. Марколия и Б.А. Лазба за поддержку и проявленный интерес к работе, а также М.К. Кокоеву, А.С. Гамисония и А.К. Торосян за помощь в проведении экспериментов, а также И.В. Зубареву и М.В. Тюхаю за проведение электронно-микроскопических исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рухадзе А.А. Взрывающиеся проволоки. М.: Иностранная литература, 1963.
2. Бурцев В.А., Калинин Н.В., Лучинский А.В. Электрический взрыв проводников и его применение в электрофизических установках. М.: Энергоатомиздат, 1990, 289 с.
3. Лернер М.И., Сваровская Л.В., Псахье С.Г. и др. // Росс. нанотехнол. 2009. Т. 4. № 11–12. С. 56.
4. Русских А.Г., Бакшт Р.Б., Лабеецкий А.Ю. и др. // Физ. плазмы. 2006. Т. 32. № 10. С. 893.
5. Тер-Оганесян А.Е., Ткаченко С.И., Романова В.М. и др. // Физ. плазмы. 2005. Т. 31. № 11. С. 989.

6. Филиппов Д.В. Влияние ионизации и возбуждения атомов электромагнитным полем на условия стабильности ядер и процессы радиоактивного распада: Дис. ... докт. физ.-мат. наук. Москва, 2008.
7. Уруцкоев Л.И., Филиппов Д.В., Рухадзе А.А. и др. // Инж. физ. 2015. № 2. С. 6.
8. Уруцкоев Л.И., Филиппов Д.В. // Инж. физ. 2016. № 5. С. 3.
9. Волкович А.Г., Говорун А.П., Гуляев А.А. и др. // Кр. сообщ. по физ. ФИАН. 2002. № 8. С. 45.
10. Уруцкоев Л.И., Ликсонов В.И., Циноев В.Г. // Прикл. физ. 2000. № 4. С. 1.
11. Priem D., Racineux G., Lochak G. et al. // Ann. Fond. L. de Broglie. 2008. V. 33. № 1–2. P. 129.
12. Pryakhin E.A., Urutskoyev L.I., Tryapitsina G.A. et al. // Ann. Fond. L. de Broglie. 2006. V. 31. № 4. P. 463.
13. Ивойлов Н.Г., Поздеев О.К., Закиров Т.Р. и др. // Инж. физ. 2011. № 8. С. 29.
14. Уруцкоев Л.И., Филиппов Д.В., Рухадзе А.А. и др. // Прикл. физ. 2012. № 4. С. 60.
15. Пряхин Е.А., Уруцкоев Л.И., Тряпицына Г.А. и др. // Инж. физ. 2019. № 12. С. 3.
16. Прохорова И.М., Ковалева М.И., Фомичева А.Н. Генетическая токсикология: лабораторный практикум. Ярославль: ЯрГУ, 2005. 132 с.
17. Методика определения токсичности вод, водных вытяжек из почв, осадков сточных вод и отходов по изменению уровня флуоресценции хлорофилла и численности клеток водорослей: биологические методы контроля. ФР.1.39.2007.03223. М.: Акварос, 2007. 52 с.
18. Hirsch R.P., Riegelman R.K. Statistical first aid: interpretation of medical research data. Instructor's manual paperback. Blackwell Sci. Inc., 1993. 432 p.
19. Гланц С. Медико-биологическая статистика. М.: Практика, 1998. 459 с.
20. Методика определения токсичности воды и водных вытяжек из почв, осадков сточных вод, отходов производства и потребления по изменению длины корня проростка семян латука (*Lactuca sativa* L.). МОТВл-БМ-004. 2008. Челябинск: УНПЦ РМ, 2008. 39 с.
21. Pryakhin E.A., Urutskoyev L.I., Tryapitsina G.A. et al. // Ann. Fond. L. de Broglie. 2008. V. 33. № 1–2. P. 139.
22. Singh N.P. // Mutat. Res. 2000. V. 455. P. 111.