

Использование терагерцевого излучения для ослабления последствий воздействия радиации

© Н.Т. Баграев,^{1,2} П.А. Головин,³ В.В. Георгиади,⁴ Л.Е. Клячкин,^{1,2} А.М. Маляренко,^{1,2} Б.А. Новиков,² В.С. Хромов,¹ К.В. Сивак⁵

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия

² ООО „Дипольные структуры“,
197376 Санкт-Петербург, Россия

³ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
195251 Санкт-Петербург, Россия

⁴ Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет,
190005 Санкт-Петербург, Россия

⁵ НИИ гриппа им. А.А. Смородинцева Минздрава России,
197376 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: klyachkin@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 8 декабря 2021 г.

В окончательной редакции 21 февраля 2022 г.

Принято к публикации 10 марта 2022 г.

Представлены экспериментальные данные по влиянию широкополосного излучения терагерцевого диапазона, модулированного в гигагерцевом диапазоне, на выживаемость мышей, получивших острое отравление соединениями обедненного урана. Впервые полученные результаты свидетельствуют о клинически значимом увеличении времени жизни мышей, контрольных сроков развития терминальной почечной недостаточности и смерти, а также об увеличении выживаемости мышей на 50%. Отдаленные последствия, формирующиеся в период после терапии антидотами/хелаторами токсичных металлов, могут быть предотвращены или существенно ослаблены предлагаемым методом физиотерапевтического воздействия, который может решить многие проблемы, стоящие перед обществом, как в обеспечении профессионального здоровья, так и здоровья населения в целом при авариях на объектах атомной энергетики.

Ключевые слова: профессиональное здоровье, широкополосное терагерцевое излучение, гигагерцевая модуляция, отравление соединениями обедненного урана, выживаемость мышей.

DOI: 10.21883/JTF.2022.07.52667.311-21

Введение

Одним из проблемных мест профессионального здоровья является влияние радиации на организм человека. Это серьезная проблема для работников атомной промышленности, ликвидаторов аварий на АЭС, медицинских работников, экипажей самолетов, космонавтов, экипажей морских судов, работников в горных выработках [1–3].

В результате воздействия радиации возбуждение отдельных атомов может привести к внутримолекулярному и межмолекулярному переносу энергии, активации свободнорадикальных процессов, трансмутационных реакций, разрывам химических связей и т. п. Общебиологические изменения в организме при этом характеризуются биохимическими, физиологическими и структурными, а также эпигенетическими изменениями [4]. Пораженными могут оказаться жизненно необходимые для нормальной клеточной деятельности биополимеры и липиды. Таким образом, радиация и продукты ядерного деления воздействуют на организм на микроуровне, вызывая повреждения, которые заметны не сразу, а проявляют

себя через долгие годы. Поражение отдельных групп белков, находящихся в клетке, может вызвать онкологические заболевания, а также генетические мутации, передающиеся через несколько поколений. Воздействие (влияние радиации) малых доз облучения представляет собой существенные диагностические трудности, при этом данное воздействие наносит серьезный вред здоровью человека как в раннем периоде, так и спустя длительное время после воздействия.

Опасность радиоактивных веществ при их попадании в организм связана с пространственным распределением поглощенной энергии и химической токсичностью радионуклидов (токсичность радиоактивного изотопа) [4]. При этом существующие методы элиминации радионуклидов и тяжелых металлов из организма разработаны не в полной мере [2].

В последние годы для обеспечения радиационной безопасности особое внимание уделяется противорадиационным препаратам, которые должны обладать высоким защитным эффектом без выраженных побочных действий и обеспечивать противолучевую защиту в любых условиях профессиональной деятельности, а также при

различных видах облучения (хроническое, пролонгированное, острое) и дозах воздействия, не превышающих 10 Gy (1000 rad) [5]. Однако на сегодняшний день не все радиопротекторы имеют достаточную широту терапевтического действия. Так, перспективный радиопротектор для защиты от радиационных поражений при авариях на атомных энергетических установках мелатонин (N-ацетил-5-метокситриптамин) обладает выраженным антиоксидантным и антирадикальным действием, но у некоторых чувствительных людей может способствовать развитию артериальной гипотензии, вызывать нарушение ритма сердечных сокращений [6,7].

Наиболее эффективными средствами лечения отравлений радиоактивными веществами являются антидоты, что связано с простотой их применения и возможностью использования в любых условиях, в том числе при катастрофах [8]. Эти специальные фармакологические средства позволяют остановить процесс отравления организма токсикантами, но не предотвращают уже наступившие патологические изменения в органах и тканях. В связи с этим поиск комплексных средств и методов фармакологической и физиотерапевтической поддержки адаптационных и регенеративных способностей организма, а также профилактики последствий радиационных поражений является актуальной задачей здравоохранения [4].

В последние 10–15 лет был достигнут существенный прогресс в области создания полупроводниковых источников и приемников излучения терагерцевого (THz) диапазона длин волн, что сразу же привлекло внимание врачей, исследователей и разработчиков медицинской техники, поскольку открылись перспективы для создания принципиально новой физиотерапевтической аппаратуры и методик лечения широкого круга заболеваний [9].

THz-излучение или „терагерцы“ охватывает широкий диапазон спектра электромагнитного излучения между 100 GHz и 30 THz (длина волны излучения приблизительно от 3 mm до 10 μm). Этот диапазон граничит с микроволновым диапазоном и простирается на дальний и средний инфракрасный (ИК) диапазоны.

THz-кванты не представляют ионизационной опасности для биологических тканей, поскольку обладают намного меньшей энергией по сравнению с квантами видимого и рентгеновского диапазонов длин волн. На первый взгляд может показаться нереальным, что чрезкожное воздействие излучением THz-диапазона может стимулировать терапевтический эффект, поскольку на глубине нескольких сотен микрон от поверхности кожи его интенсивность ослабляется в тысячу раз. Тем не менее было продемонстрировано, что проникающее излучение мощностью даже десятки–сотни нановатт эффективно воздействует на ход важнейших биохимических реакций [9]. Кроме того, важным обстоятельством для физиотерапевтического воздействия оказалось то, что THz-излучение является резонансным для белковых молекул, возбуждает их вращательные и колебательные

моды, которые принадлежат к THz-частотному диапазону [10].

В современной открытой научной литературе работ, посвященных изучению механизма действия излучения THz-диапазона частот на организм млекопитающих, крайне мало. Исследования влияния излучения THz-диапазона частот на живые организмы при стрессе и патологии продемонстрировали высокую эффективность THz-физиотерапии [11,12]. Было показано [11], что облучение в THz-диапазоне частот интактных животных не сопровождается изменениями гемодинамики в магистральных сосудах и микроциркуляторном русле, но приводит к нормализации параметров гемодинамики в условиях стрессирования. Также THz-облучение при остром и длительном стрессе вызывало восстановление микроциркуляторной гемодинамики в головном мозге, сердце, печени, почках и желудке крыс. Одним из возможных механизмов действия THz является активация NO-синтазного компонента цикла оксида азота и ограничение активации каскадной гипоталамо-гипофизарно-надпочечниковой осей стресс-реакции при остром и длительном стрессе [13]. Эффективность коррекции стресса с помощью THz зависит от пола животного и фазы эстрального цикла у самок крыс: эффективность максимальна в фазе эструса по сравнению с фазой диэструса или самцами [13]. Наряду с указанным выше, в литературе описаны и альтернативные объяснения эффективности THz-излучения.

Перспективным подходом к терапии радиационных поражений может быть применение экзогенных белков теплового шока или индукции синтеза эндогенных *in situ*. Изучение токсичности соли урана (альфа-излучающего радионуклида) при многократном введении показало, что крысы были устойчивы к повторному введению 5 mg/kg уранил ацетата через 1–2 недели после первой инъекции той же дозы токсиканта из-за увеличения уровня почечного HSP73 до $148 \pm 12\%$ от исходного уровня, а повреждение канальцев и повышение сывороточного креатинина после второй дозы яда были значительно ниже, чем после первой дозы [14].

Анализ влияния THz-излучения при остром и длительном стрессе на ось гипофиз-щитовидная железа (гипофизарно-тиреоидная ось) приведен в работе [12]. Автор показал, что ежедневное (5 суток) в течение 15 min воздействие THz способствует частичной нормализации гормонообразовательной функции щитовидной железы, а 5 min облучение является неэффективным. Воздействие излучением с частотой 129 GHz в течение 30 min приводит к полной нормализации уровня кортикостерона в крови у крыс. Автор подчеркивает, что экспозиции менее 15 min (а в ряде экспериментов и менее 30 min) не являются эффективными, а рабочие частоты составляют для кислорода 129.0 GHz, азота оксида — 150.1–150.7 GHz. Данные диапазоны и 5-дневная схема по 30 min определяют стресс-лимитирующую функцию исследуемого диапазона THz-частоты.

Однако, несмотря на хорошие результаты, к недостаткам работ [11–13] следует отнести то обстоятельство, что авторами в обоих случаях использовался узкополосный излучатель с частотой около 150 GHz, что, конечно, не позволило провести всесторонние исследования влияния THz-излучения на живые организмы. Отчасти это было связано с отсутствием необходимого оборудования на рынке THz-техники.

Поэтому целью настоящей работы являлось проведение экспериментальных исследований по влиянию широкополосного излучения THz-диапазона, модулированного в гигагерцевом диапазоне (физиотерапевтический аппарат „ИК-Диполь“, „Дипольные структуры“, С.Петербург), на выживаемость мышей с острым отравлением соединениями обедненного урана.

Техника эксперимента

В настоящей работе применялось излучение THz-диапазона, модулированное в GHz-диапазоне, генерируемое твердотельными излучателями, изготовленными с использованием кремниевой нанотехнологии на основе монокристаллического кремния. Излучатели представляют собой управляемые генераторы THz-излучения в диапазоне длин волн от 1 до 650 μm с GHz-модуляцией во всем спектре излучения [9]. Создание таких излучателей стало возможным благодаря реализации квантоворазмерных p – n -переходов на поверхности монокристаллического кремния с глубиной от 20 до 30 nm и сверхтонкими изолирующими перегородками размером 2 nm. Одновременно нанотехнология таких квантоворазмерных p – n -переходов, используя процессы самоорганизации наноструктур, позволяет формировать систему фрактальных микрорезонаторов, встроенных в плоскость p – n -перехода, наличие которых позволяет многократно усилить интенсивность THz-излучения в широком диапазоне длин волн. Реализация нанотехнологии получения самосогласованных систем подобных фрактальных микрорезонаторов в сочетании с квантоворазмерными p – n -переходами позволила впервые в мировой практике получить генерацию THz-излучения с использованием кремниевых наноструктур. GHz-модуляция излучения по всему спектру в частотном диапазоне 40–1200 GHz обеспечивает усиление фотовоздействия в несколько раз, поскольку GHz-излучение является резонансным для белковых молекул [15].

Первые опытные модификации аппарата THz-терапии „ИК-Диполь“ появились в 1992 году и сразу же показали высокую эффективность применения в терапии широкого круга заболеваний. Конструкция и принцип действия данного прибора базируются на достижениях современных нанотехнологий в области нано- и оптоэлектроники и не имеют мировых аналогов. В последние годы получены уникальные результаты и созданы методики эффективной терапии демиелинизирующих заболеваний центральной нервной системы [16], лечения

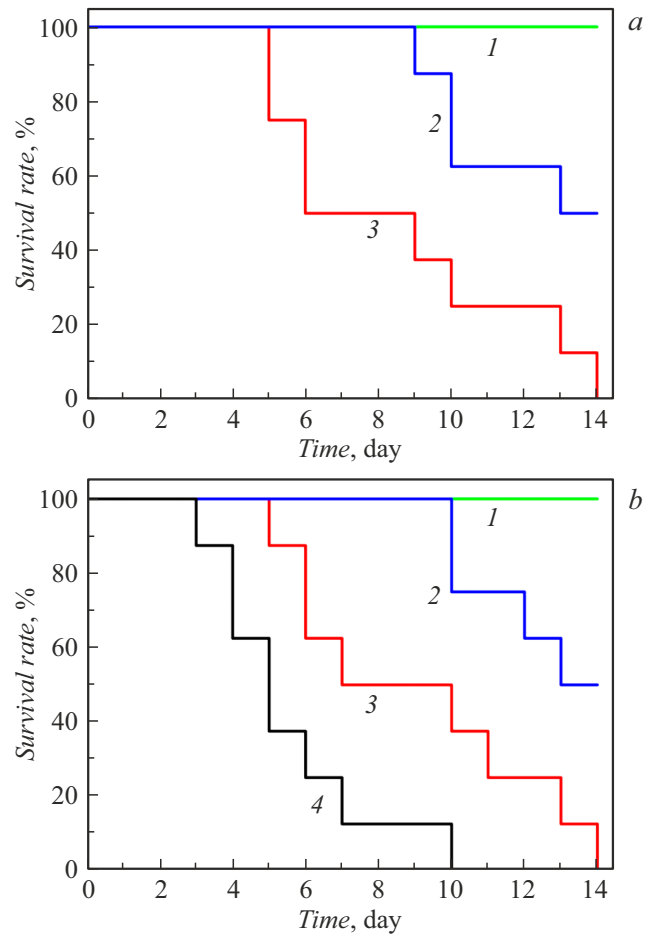


Рис. 1. Графики выживаемости Каплана-Мейера: *a* — в первой серии, *b* — в третьей серии эксперимента. Сравнение групп по Log-rank тесту Мантла-Кокса (точный уровень значимости p для двух групп). *a* — 1 — интактные, 2 — THz + УАД, 3 — УАД, $p = 0.0124$. *b* — 1 — интактные, 2 — THz + УАД, 3 — УАД, 4 — термостат + УАД, $p = 0.0001$.

постоперационных пневмоний при кардиохирургических операциях [17], и, кроме того, разработана уникальная методика лечения (совместно со стандартной медикаментозной методикой) пневмонии, вызываемой коронавирусом COVID-19 [18].

В результате проведенных исследований было показано [9], что стимулирование THz-излучением реакций метаболизма при недостатке ферментов может носить двоякий характер. Во-первых, энергия световых квантов возможно используется клеткой вместо энергии гидролиза аденозинтрифосфата (АТФ). Альтернативное предположение может состоять в том, что поглощение света не заменяет такой гидролиз, но ускоряет его протекание, и, таким образом, протекание сопряженных с ним метаболических реакций.

Первая возможность связана с предположением роли альфа-спиральных белковых молекул в процессе переноса энергии гидролиза АТФ. Такое предположение было высказано в конце 70-х годов в связи с тем,

Таблица 1. Влияние THz-излучения на некоторые биохимические показатели в сыворотке крови мышей (данные на десятые сутки эксперимента, $n = 5$ в каждой группе)

Дескриптивные статистики	Экспериментальные группы			
	Интактные	Контроль THz	УАД	УАД + THz
Мочевина, mmol/l				
Минимум	4.685	5.12	12.13	1.128
25% Перцентиль	4.826	5.14	12.25	3.618
Медиана	5.764	5.397	12.77	6.226
75% Перцентиль	5.972	6.438	14.21	7.522
Максимум	6.079	6.576	14.54	7.876
Среднее значение	5.472	5.71	13.14	5.701
Стандартное отклонение	0.6088	0.6794	1.032	2.657
Ошибка среднего	0.2723	0.3039	0.4615	1.188
Нижний 95% ДИ	4.716	4.867	11.85	2.402
Верхний 95% ДИ	6.228	6.554	14.42	9
Альбумин, g/l				
Минимум	32	32.14	9.385	18.01
25% Перцентиль	32.86	32.69	13.58	19.88
Медиана	37.57	37.59	18.41	29.03
75% Перцентиль	41.16	38.45	21.96	36.51
Максимум	41.81	38.69	24.89	36.8
Среднее значение	37.12	35.97	17.9	28.36
Стандартное отклонение	4.225	3.047	5.543	8.43
Стандартное отклонение	4.225	3.047	5.543	8.43
Ошибка среднего	1.89	1.363	2.479	3.77
Нижний 95% ДИ	31.88	32.19	11.02	17.9
Верхний 95% ДИ	42.37	39.76	24.78	38.83
Индекс мочевины/альбумин, mmol/g				
Минимум	0.1226	0.1323	0.5841	0.06263
25% Перцентиль	0.1302	0.1368	0.6274	0.1172
Медиана	0.1464	0.1605	0.6714	0.1948
75% Перцентиль	0.1678	0.1822	1.037	0.2862
Максимум	0.1739	0.1895	1.293	0.362
Среднее значение	0.1485	0.1597	0.8	0.2003
Стандартное отклонение	0.02005	0.0235	0.2843	0.1073
Ошибка среднего	0.008966	0.01051	0.1271	0.04799
Нижний 95% ДИ	0.1236	0.1305	0.4471	0.06711
Верхний 95% ДИ	0.1734	0.1889	1.153	0.3336
Глюкоза, mmol/l				
Минимум	4.291	4.295	5.812	4.394
25% Перцентиль	4.414	4.472	5.863	5.054
Медиана	4.995	4.974	7.267	6.565
75% Перцентиль	5.578	5.938	7.68	7.965
Максимум	5.897	6.093	7.966	8.218
Среднее значение	4.996	5.159	6.87	6.52
Стандартное отклонение	0.6302	0.7587	0.9577	1.539
Ошибка среднего	0.2818	0.3393	0.4283	0.6884
Нижний 95% ДИ	4.213	4.217	5.681	4.609
Верхний 95% ДИ	5.778	6.101	8.06	8.432

Таблица 1. (продолжение).

	ЛДГ, Unit/l			
Минимум	377.2	397.1	647.7	624.4
25% Перцентиль	388.1	441.4	653	652.2
Медиана	445.3	496.8	807.6	794.9
75% Перцентиль	565.8	799.1	934.6	878.2
Максимум	578.5	979.5	944.1	919.9
Среднее значение	470.6	595.6	796.5	771.1
Стандартное отклонение	90.75	228.7	141.1	119.2
Ошибка среднего	40.59	102.3	63.11	53.29
Нижний 95% ДИ	357.9	311.7	621.3	623.2
Верхний 95% ДИ	583.3	879.5	971.8	919.1
	ТБК-РП, $\mu\text{mol/l}$			
Минимум	1.82	1.59	3.78	1.78
25% Перцентиль	1.895	1.7	3.848	1.975
Медиана	1.98	2.16	4.05	2.3
75% Перцентиль	2.285	2.447	4.93	2.774
Максимум	2.39	2.49	5.18	2.967
Среднее значение	2.068	2.091	4.321	2.359
Стандартное отклонение	0.2208	0.3845	0.591	0.4452
Ошибка среднего	0.09876	0.1719	0.2643	0.1991
Нижний 95% ДИ	1.794	1.613	3.587	1.807
Верхний 95% ДИ	2.342	2.568	5.055	2.912
	Битиروزин, FUnit/l			
Минимум	34679	23618	67687	33807
25% Перцентиль	35376	28423	68831	36406
Медиана	40744	46559	82115	54578
75% Перцентиль	53023	68157	84078	73338
Максимум	53616	70725	84939	82353
Среднее значение	43508	47944	77586	54813
Стандартное отклонение	8981	20252	8096	19622
Ошибка среднего	4017	9057	3621	8775
Нижний 95% ДИ	32356	22798	67533	30449
Верхний 95% ДИ	54660	73089	87639	79177

Примечание. ДИ — доверительный интервал, FUnit — флуоресцентные единицы, ТБК-РП — тиобарбитурат-реактивные продукты перекисного окисления липидов (в т.ч. малоновый диальдегид).

тическое возбуждение и транспорт солитонов может стимулировать удаление кислородсодержащих радикалов, захваченных поврежденными участками белковых молекул, что имеет большое значение для практической медицины.

Следует отметить, что оптически индуцированные солитоны могут оказывать прямое воздействие на протекание гидролиза АТФ. В этом случае оптическое ТНз-излучение возбуждает экситон в системе АТФ, транспорт которого в кольце аденозина приводит к формированию солитона с последующим возрастанием вероятности „отстрела“ фосфатной группы: АТФ + „ТНз-излучение“ \Rightarrow АДФ + Ф. Соответственно, данный процесс резко усиливается при использовании ГНз-модуляции ТНз-излучения, что проявляется, например, в оптически стимулируемом транспорте ионов через биологические мембраны в режиме „калий-натриевого насоса“ [20].

Эксперимент и полученные результаты

Анализ данных литературных источников показал, что вероятный механизм биологического действия излучения ТНз-диапазона, модулированного в ГНз-диапазоне, связан с модуляцией биохимических пластических процессов и экстренной адаптации к стрессорному воздействию, например, за счет индукции синтеза белков теплового шока. В литературе встречаются данные об усиленной экспрессии генов белков теплового шока HSP73 при однократном воздействии соединений урана [14]. Крысы были устойчивы к повторному введению 5 mg/kg уранил ацетата через 1–2 недели после первой инъекции той же дозы токсиканта. В течение этого периода уровень почечного HSP73 был увеличен до $148 \pm 12\%$ от исходного уровня, а повреждение канальцев и повышение сывороточного креатинина после

второй дозы яда были значительно ниже, чем после первой дозы [14].

В связи с этим авторами настоящей работы с помощью аппарата „ИК-Диполь“ были проведены предварительные эксперименты *in vivo* на мышах, показавшие высокую эффективность тотального облучения отравленных солями урана животных в раннем периоде интоксикации (токсикогенная фаза и фаза начала развития соматической патологии). Опыт проводился на самцах беспородных мышей и мышей линии СВА в трех сериях. После однократного внутривенного введения уранил ацетата дигидрата (УАД, CAS Number: 6159-44-0) в смертельной дозе 5 mg/kg мышей в количестве по 3–4 особи на групповой сеанс помещали в контейнер, в котором проводили облучение, 2 сеанса в сутки. Высота кристалла над поверхностью тела мышей составляла 18 см, время экспозиции — 22 min на сеанс, 2 сеанса в сутки. Продолжительность сеансов терапии — 7 суток после введения яда.

Сравнение биологического эффекта излучения проводили в трех сериях опытов. В первых двух сериях сравнивали группы мышей, получавших УАД, а также мышей, получавших УАД и THz-физиотерапевтическое воздействие, с интактными. В третьей серии дополнительно была включена группа мышей, которым, помимо отравления, проводили эквивалентное по времени экспозиции аппарату „ИК-Диполь“ прогревание в термостате.

Излучатель аппарата „ИК-Диполь“ имеет мощный пик излучения в диапазоне длин волн 9–12 μm , который можно отнести к тепловому излучению. Поэтому, чтобы исключить в данном эксперименте влияние теплового излучения на конечный результат, в качестве эквивалента теплового воздействия в третьей серии использовали прогревание животных в термостате при температуре +40°C 22 min на сеанс, 2 сеанса в сутки. Эвтаназию проводили путем одномоментной декапитации. В сыворотке крови на десятые сутки показатели определяли с помощью наборов фирмы Randox (UK) на автоматическом биохимическом анализаторе Keylab (BPC BioSed srl). Обработку данных выполняли с использованием пакета статистических программ GraphPad Prism 6.0 (США).

Анализ графиков выживаемости (рис. 1) показал максимальную сходимость между первой и третьей сериями, и снижение статистической мощности при уменьшении выборки животных. Так, по лог-ранговому тесту Мантела-Кокса, при сравнении двух групп выявлено статистически и клинически значимое увеличение выживаемости мышей при облучении их THz с помощью аппарата „ИК-Диполь“ на 50% в первой ($p = 0.0124$) и третьей ($p < 0.0001$) серии эксперимента, а во второй серии — на 33% ($p = 0.1026$). Прогревание животных в термостате в противоположность ожиданиям усиливало развитие интоксикации животных, вероятно, из-за развития эксикоза, и способствовало более раннему наступлению гибели мышей. Таким образом, было получено достоверное по сравнению с контрольными группами

Таблица 2. Результаты сравнения групп критерием Данна

Сравниваемые группы	Скорректированное значение p
Мочевина, mmol/l	
Контроль THz и интактные	> 0.9999
УАД и интактные	0.0067
УАД + THz и интактные	> 0.9999
УАД и контроль THz	0.0453
УАД + THz и контроль THz	> 0.9999
УАД + THz и УАД	0.2229
Альбумин, g/l	
Контроль THz и интактные	> 0.9999
УАД и интактные	0.0166
УАД + THz и интактные	0.5855
УАД и контроль THz	0.0278
УАД + THz и контроль THz	0.8073
УАД + THz и УАД	> 0.9999
Индекс мочевины/альбумин, mmol/g	
Контроль THz и интактные	> 0.9999
УАД и интактные	0.0081
УАД + THz и интактные	> 0.9999
УАД и контроль THz	0.0328
УАД + THz и контроль THz	> 0.9999
УАД + THz и УАД	0.2537
Глюкоза, mmol/l	
Контроль THz и интактные	> 0.9999
УАД и интактные	0.0936
УАД + THz и интактные	0.389
УАД + THz и контроль THz	0.6727
УАД + THz и УАД	> 0.9999
Контроль THz и интактные	> 0.9999
ЛДГ, Unit/l	
Контроль THz и интактные	> 0.9999
УАД и интактные	0.0328
УАД + THz и интактные	0.0722
УАД и контроль THz	0.4668
УАД + THz и контроль THz	0.8073
УАД + THz и УАД	> 0.9999
ТБК-РП, $\mu\text{mol/l}$	
Контроль THz и интактные	> 0.9999
УАД и интактные	0.0198
УАД + THz и интактные	> 0.9999
УАД и контроль THz	0.0235
УАД + THz и контроль THz	> 0.9999
УАД + THz и УАД	0.1708
Битирозин, FUnit/l	
Контроль THz и интактные	> 0.9999
УАД и интактные	0.0453
УАД + THz и интактные	> 0.9999
УАД и контроль THz	0.0972
УАД + THz и контроль THz	> 0.9999
УАД + THz и УАД	0.3686

Примечание: ФЕ — флуоресцентные единицы; УАД — уранил ацетат дигидрат; ТГц — терагерц; ТБК-РП — тиобарбитурат-реактивные продукты перекисного окисления липидов (в т.ч. малоновый диальдегид).

мышей увеличение выживаемости облученных с помощью аппарата „ИК-Диполь“ животных, существенное уменьшение степени повреждения почек, частичная нормализации показателей гомеостаза в крови. Результаты отражены на рис. 2 и в табл. 1 и 2.

Заключение

Полученные впервые результаты свидетельствуют о существенном переживании животными, получившими острое отравление соединениями обедненного урана, контрольных сроков развития терминальной почечной недостаточности и смерти, увеличении выживаемости мышей на 50%. Эти данные нуждаются в уточнении и детализации с целью выяснения возможных механизмов позитивного влияния излучения терагерцевого диапазона, модулированного в гигагерцевом диапазоне, в дальнейших экспериментах.

Есть основания полагать, что отдаленные последствия, формирующиеся в период после терапии антидотами/хелаторами токсичных металлов, могут быть предотвращены предлагаемым методом физиотерапевтического воздействия. Сравнение воздействия излучения аппарата „ИК-Диполь“ с эквивалентным по воздействию части его спектрального диапазона (9–12 μm) прогреванием в термостате показало большую эффективность именно терагерцевой части спектра широкополосного излучения.

Дальнейшее исследование и положительное решение поставленной задачи позволит решить многие проблемы, стоящие перед обществом как в обеспечении профессионального здоровья, так и здоровья населения стран в целом при авариях на объектах атомной энергетики.

Соблюдение этических норм

Все работы с животными проводились в соответствии с правилами гуманного обращения с животными, принятыми Европейской конвенцией о защите позвоночных животных, используемых для экспериментов и в иных научных целях (Страсбург, 1986), условия содержания животных соответствовали ГОСТ 33215-2014 „Руководство по содержанию и уходу за лабораторными животными. Правила оборудования помещений и организации процедур“ и „Директиве 2010/63/EU Европейского парламента и совета Европейского союза по охране животных, используемых в научных целях“ (Rus-LASA, Санкт-Петербург, 2012. 48 с.). Настоящая работа не дублировала ранее проведенные исследования. Количество и состав животных, используемых в экспериментах, являлись необходимыми и обеспечили статистическую достоверность исследования.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] *Medical management of radiation injuries*. Safety reports series No. 101; (International Atomic Energy Agency, Vienna, 2020)
- [2] И.Н. Гудков. Проблемы безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля, 3 (1), 133 (2005). DOI: 10.31717/1813-3584
- [3] Л.Ю. Савинская, В.С. Сухорученко, Т.С. Куст. Сб. *труд. Всеросс. научно-практ. конф. молодых ученых, аспирантов и студентов* (Юрга, Россия, 2015), т. 2, с. 124.
- [4] И.Я. Василенко. *Токсикология продуктов ядерного деления* (Медицина, М., 1999)
- [5] В.П. Баштан, В.Ф. Почерняева, Т.А. Жукова, Л.Н. Васько, Л.А. Лымарь. *Средства защиты организма от действия ионизирующего излучения* (Полтава, 2016)
- [6] P. Amini, H. Mirtavoos-Mahyari, E. Motevaseli, D. Shabeeb, A.E. Musa, M. Cheki, B. Farhood, R. Yahyaour, A. Shirazi, N.A. Goushbolagh, M. Najafi. *Curr. Mol. Pharmacol.*, **12** (1), 2 (2019). DOI: 10.2174/1874467211666180802164449
- [7] R.J. Reiter, D X. Tan, A. Korkmaz, L.C. Manchester. *J. Pineal Res.*, **50**, 357 (2011). DOI: 10.1111/j.1600-079X.2011.00881.x
- [8] Г. Могош. *Острые отравления: диагноз, лечение* (Мед. изд-во, Бухарест, 1984)
- [9] Н.Т. Баграев, Л.Е. Клячкин, А.М. Маляренко, Б.А. Новиков. *Биотехносфера*, **5** (41), 55 (2015).
- [10] V.M. Fischer, M. Walther, P. Uhd Jepsen. *Phys. Med. Biol.*, **47**, 3807 (2002). DOI: 10.1088/0031-9155/47/21/319
- [11] А.Н. Иванов. Автореф. докт. дис. (Саратов, Саратовский гос. мед. ун-т им. В.И. Разумовского, 2012)
- [12] А.А. Цымбал. Автореф. докт. дис. (Саратов, Саратовский гос. мед. ун-т им. В.И. Разумовского, 2012)
- [13] A.N. Ivanov. *Bull. Exp. Biol. Med.*, **154** (3) 309 (2013). DOI: 10.1007/s10517-013-1938-2. PMID: 23484188
- [14] S. Mizuno, K. Fujita, R. Furuu, A. Hishid, H. Ito, Y. Tashim, H. Kumagai. *Toxicology*, **117** (2–3), 183 (1997). DOI: 10.1016/s0300-483x(96)03573-1
- [15] Ю.Ю. Бонитенко, А.М. Никифоров. *Чрезвычайные ситуации химической природы: (химические аварии, массовые отравления; медицинские аспекты)* (Гиппократ, СПб, 2004)
- [16] Н.Т. Баграев, П.А. Головин, Л.Е. Клячкин, А.М. Маляренко, А.П. Преснухина, Н.И. Руль, А.С. Реуков, В.С. Хромов. *ЖТФ*, **90** (10), 1663 (2020). DOI: 10.21883/JTF.2020.10.49797.19-20 [N.T. Bagraev, P.A. Golovin, L.E. Klyachkin, A.M. Malyarenko, A.P. Presnukhina, N.I. Rul', A.S. Reukov, V.S. Khromov. *Tech. Phys.*, **65**, 1591 (2020). DOI: 10.1134/S1063784220100023]
- [17] N.T. Bagraev, P.A. Golovin, V.S. Khromov, L.E. Klyachkin, A.M. Malyarenko, V.A. Mashkov, B.A. Novikov, A.P. Presnukhina, A.S. Reukov, K.B. Taranets. *Mater. Phys. Mech.*, **44** (2), 264 (2020). DOI: 10.18720/MPM.4422020_11
- [18] N.T. Bagraev, P.A. Golovin, V.S. Khromov, L.E. Klyachkin, A.M. Malyarenko, V.A. Mashkov, B.A. Novikov, A.P. Presnukhina, A.S. Reukov, K.B. Taranets. *HSOA J. Altern. Complement. Integr. Med.*, **6** (3), 10112 (2020). DOI: 10.24966/ACIM-7562/100112
- [19] А.С. Давыдов. *Биология и квантовая механика* (Наукова Думка, Киев, 1979)
- [20] В.Б. Плахова, С.А. Подзорова, И.В. Мищенко, Н.Т. Баграев, Л.Е. Клячкин, А.М. Маляренко, В.В. Романов, Б.В. Крылов. *Сенсорные системы*, **17** (1), 24 (2003).