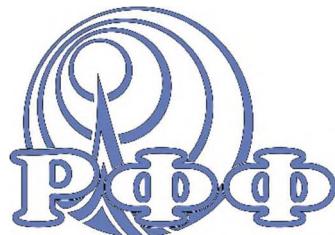




Национальный
исследовательский
**Томский
государственный
университет**



Радиофизический факультет



10-я Международная научно-практическая конференция
Актуальные проблемы радиофизики
АПР-2023

Сборник трудов конференции

при поддержке:



26-29 сентября 2023 года
г. Томск

УДК 537.86; 621.38.01:53; 621.396.67; 621.372.8;
621.3.029.6; 621.396.91/.96; 535.14;
535.33:621.373.8 А 43
А 43

Под редакцией доктора технических наук А.В. Юрченко

А 43 Актуальные проблемы радиофизики:

Х Международная научно-практическая конференция, г. Томск, 26-29 сентября 2023 г. Сборник трудов. – Томск: Издательский дом ТГУ, 2023. – 374 с.

В сборнике представлены доклады участников Х Международной научно-практической конференции "Актуальные проблемы радиофизики 2023", проходившей в Томском государственном университете 26-29 сентября 2023 г. на базе радиофизического факультета. Доклады отобраны Программным комитетом конференции.

Сборник представляет интерес для специалистов в области радиофизики, радиоэлектроники, оптики, твердотельной электроники и электромагнитной совместимости.

**УДК 537.86; 621.38.01:53; 621.396.67; 621.372.8;
621.3.029.6; 621.396.91/.96; 535.14;
535.33:621.373.8**

Оценка среднего значения SAR у крыс при длительном облучении 5G NR

Махманазаров Рамдас Миришакарзода

Цепляев Илья Сергеевич

Томский Государственный Университет

E-mail: efemberg11@mail.ru

Развитие современных технологий привело к тому, что частотный диапазон от 100 МГц до 300 ГГц активно используется различными устройствами. Источниками излучения выступают бытовые приборы, медицинское и промышленное оборудование, средства радиосвязи. Повышенный электромагнитный фон стал неотъемлемой частью нашей жизни. Вопрос о последствиях его воздействия на организмы стоит давно, и на этот счет производится множество исследований [1,2]. Развитие современных систем сотовой связи приводит к постоянному росту числа абонентов. Уже в стандарте 5G NR заложена возможность внедрения интернета вещей, что приведет к лавинному росту абонентов, а, следовательно, и росту уровня электромагнитного поля в жизни человека. Исследования влияний электромагнитного излучения на живые организмы являются актуальными в настоящее время.

На сегодняшний день существует несколько международных документов, посвященных рекомендациям по ограничению воздействия как краткосрочных, так и долгосрочных, непрерывных и прерывистых радиочастотных электромагнитных полей. Эти рекомендации основаны на детальной оценке научных исследований. Основными источниками таких документов выступают Международная комиссия по защите от неионизирующего излучения (ICNIRP) и Институт инженеров электротехники и электроники (IEEE) [1-2].

В данной работе рассматривается проблема оценки удельной поглощенной мощности (SAR) в эксперименте [3], и была выполнена при поддержке проекта (№ НУ 2.4.9.22 ОНГ) «Исследование динамики физиологических реакций мозга и кожи высших млекопитающих при хроническом влиянии радиочастотного излучения 5G».

На (рис.1) представлена схема экспериментальной установки, разработанная для проведения исследования воздействия излучения от устройств сотовой связи 5G NR. Излучающий блок, состоящий из источника сигналов, усиленного каскада и антенны, запитывается от внешнего источника питания, и осуществляет облучение клеток (Techniplast) с экранировкой.

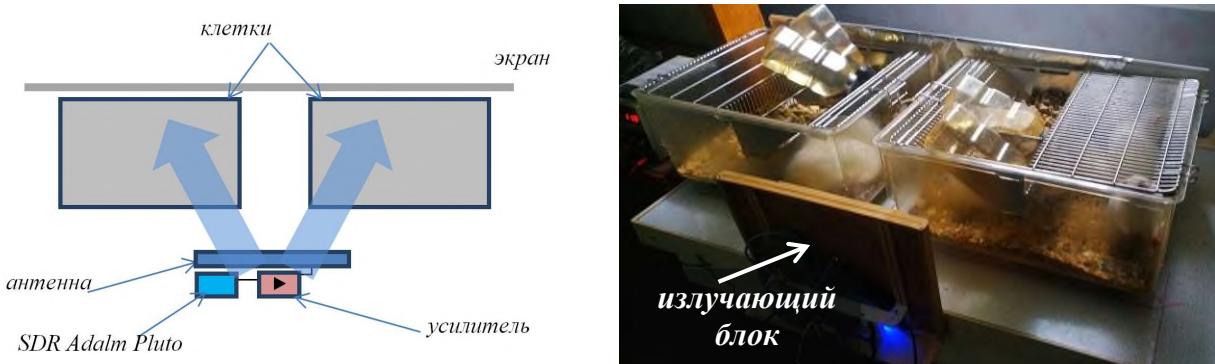


Рис.1 Схема и фотография эксперимента.

В качестве источника сигналов 5G NR используется модуль программно-определенного радио SDR Adalm Pluto. Использовался сигнал частотного диапазона FR1 нисходящего направления (downlink) – от базовой станции к абоненту. Сигнал генерировался программным комплексом для формирования тестовых сигналов стандарта 5G NR, разработанным в рамках соглашения с Минобрнауки России от 26 ноября 2019 г. № 075-11-2019-031. Полоса генерируемого сигнала 15 МГц, несущая частота 2,4 ГГц.

В эксперименте с дозиметрией участвовали три группы крыс-самцов Wistar (рис.1). Первая и вторая группа подопытных состояла из 10 особей (по 5 в каждой клетке) со средней массой 488 грамм и длиной ~25 см. Первая группа подвергалась облучению круглые сутки в течение недели со средней экспозицией 3,393 Вт/м². Расстояние от антенны до края клеток составляло 12 см. Вторая группа подвергалась облучению с экспозицией 0,605 Вт/м² в течении 4 недель круглосуточно. Третья группа состояла из 20 молодых особей (по 10 в каждой клетке) со средней массой 295 грамм и длиной ~20 см. Расстояние от антенны до края клетки в случае третьей группы составляло 20 см. Для уравнивания среднего SAR, третья группа облучалась с меньшей средней экспозицией (0,31 Вт/м²).

Предельно допустимые значения SAR усредненные по всему телу (объему) составляют 0,08 Вт/кг для населения и 0,4 Вт/кг для рабочих с РЧ ЭМП [4-5].

Величина SAR определяется следующим образом:

$$SAR = \frac{d}{dt} \left(\frac{dW}{dm} \right) = \frac{\sigma |E|^2}{\rho} \left[\frac{Bm}{\kappa \varepsilon} \right], \quad (1)$$

где m , t и W - масса [кг], время [с] и энергия [Дж] ЭМП соответственно. σ - удельная электропроводность биологического объекта в [См/м], E - напряженность электрического поля в веществе [В/м], ρ - плотность вещества [кг/м³]. Существует несколько экспериментальных способов определения SAR, среди которых можно отметить волноводные методы, калориметрические и термометрические методы, а также методы, основанные на измерении компонент ЭМП в биоматериале [4-5]. Перечисленные методы не всегда доступны, поскольку требуют наличие специальных приборов, а кроме того имеют некоторые ограничения, при дозиметрии с живыми организмами. Поэтому в реальной ситуации, точное определение SAR не всегда осуществимо.

В работе [6] приведены выражения для оценки усредненного по объему тела SAR при плотности потока энергии ЭМП в свободном пространстве S_{nado} , для разных отношений L/λ , где L , λ - длины объекта и волны соответственно. В частности, для $L/\lambda > 0.4$:

$$SAR_{cp} = \frac{5.954}{f_{ITu}} \frac{S_{nado} L}{m} \left[\frac{Bm}{\kappa \varepsilon} \right], \quad (2)$$

где m масса объекта в килограммах, L в метрах.

Авторами [6] также проведено исследование по влиянию отражающих поверхностей вблизи объектов на поглощение. Было установлено, что при наличии отражающих плоскостей возможно увеличение поглощения в несколько раз, в зависимости от частоты и геометрических размеров объектов. В работе [7] представлены результаты численного расчета среднего SAR для модели одной крысы в диапазоне частот 0,5-5 ГГц при плотности потока энергии ЭМП $S_{nado} = 1$ Вт/м. Для крысы Sprague-Dawley с размерами 24,4 см и массой 220 грамм SAR составляет ~0.027 Вт/кг, что согласуется с оценкой по выражению (2).

Оценка SAR группы крыс в естественных условиях содержания (в обычной клетке) усложняется множеством факторов. При длительном облучении в клетке крысы находятся на различных расстояниях от антенн и перемещаются в ней случайным образом. Помимо этого, масса крыс изменяется в ходе эксперимента. Все отмеченные факторы влияют на точную оценку SAR.

Учитывая вышесказанное, приблизительную оценку SAR можно выразить как:

$$SAR_{cp} \approx \frac{5.954}{f_{ITu}} \frac{\langle S_{nado}(r) \rangle \langle L \rangle}{\langle m \rangle}, \quad (3)$$

где $S_{nado}(r) = P_A G / 4\pi r^2$, P_A - мощность, подводимая к антенне [Вт], G - коэффициент усиления антенны [дБ], r - расстояние от антенны [м].

Для оценки SAR в приближенных к эксперименту условиях, представленных на рисунке 1, было проведено численное моделирование эксперимента для двух и для 10 крыс (рис.2). Моделирование осуществлялось в программной среде CST Microwave Studio. В качестве фантома крысы использовалась 3d модель крысы в библиотеке программной среды, с диэлектрическими параметрами крови ($\epsilon' = 58.34$ и $\epsilon'' = 18.76$). Длина фантома крысы составляла 16 см и масса ~180 грамм. Корпус клетки задавался размерами 480x375x210 мм, с толщиной стенок 10 мм ($\epsilon = 3$ и $tg(\epsilon''/\epsilon') = 0.001$ поликарбонат). Сверху корпус был закрыт металлической крышкой, а с обратной стороны металлическим экраном.

Для расчета SAR использовался алгоритм IEEE/IEC 62704-1. Это общепринятый метод усреднения в соответствии со стандартом IEC/IEEE 62704-1:2017 «Определение пикового пространственно-среднего удельного коэффициента поглощения (SAR) в теле человека от устройств беспроводной связи, от 30 МГц до 6 ГГц — Часть 1: Общие требования к использованию метода конечных разностей во временной области (FDTD) для расчетов SAR» [4-5].

По результатам численного эксперимента среднее значение SAR для двух крыс составило 0,202 Вт/кг, для 10 крыс 0,0818 Вт/кг. При этом расстояние от антенны до ближайшего фантома составляло ~20 см.

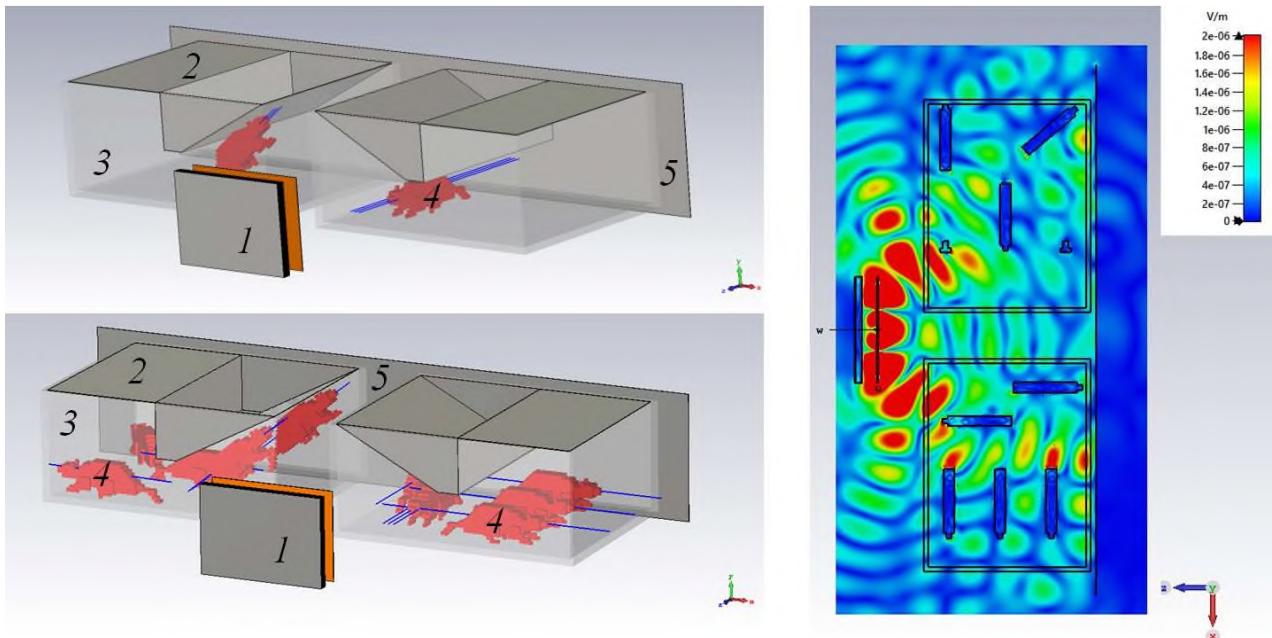


Рис.2 Моделирование эксперимента для расчета SAR (слева). 1 – антенна, 2 – металлическая крышка клетки, 3 – корпус клетки, 4 – фантом крыс, 5 – металлический экран. Распределение поля в OXZ плоскости (справа)

Из результатов моделирования можно увидеть уменьшение среднего SAR в несколько раз, с увеличением количества крыс в клетке. Это обусловлено тем, что крысы в клетке распределены на различных расстояниях от антennы. Аналогичный расчет был осуществлен для $P_A = 0.2 Вт. Результаты представлены в таблице 1:$

	P_A [Вт]	$\langle S_{\text{над}} \rangle$ [Вт/м ²]	SAR_{cp} [Вт/кг]
Нераспределенное поглощение	1	10,25	0,202 (модель)
			0,226 (теория)
Нераспределенное поглощение	0,2	2,05	0,0404 (модель)
			0,0452 (теория)
Распределенное поглощение	1	3,474	0,0818 (модель)
			0,0766 (теория)
Распределенное поглощение	0,2	0,695	0,0163 (модель)
			0,0153 (теория)

Для случая нераспределенного поглощения в масштабах клетки, т.е. для случая с двумя крысами, теоретическую оценку можно осуществить по выражению (2) для $S_{\text{над}} = 10,25$ Вт/м среднее SAR составляет 0,226 Вт/кг. Для случая с распределенным поглощением (10 крыс), теоретическая оценка среднего SAR по выражению (3) составляет 0,0766 Вт/кг.

Результаты теоретической оценки SAR в *in vivo* эксперименте представлены на (рис.3) и в таблице 2:

	P_A [Вт]	$\langle S_{\text{над}} \rangle$ [Вт/м ²]	SAR_{cp} [Вт/кг]
Первая группа wbSAR1	0,5	3,393	0,180 (макс)
			0,0431 (сред)
			0,009 (мин)
Вторая группа wbSAR2	0,0891	0,605	0,0322 (макс)
			0,0076 (сред)
			0,0017 (мин)
Третья Группа wbSAR3	0,0891	0,31	0,0153 (макс)
			0,0059 (сред)
			0,0022 (мин)

Из таблицы 1 видно смещение теоретической оценки от модельного расчета в случае нераспределенного поглощения. Данное расхождение может быть связано по нескольким причинам. Во-первых, так как выражение (2) было эмпирически выведено для случая облучения в свободном пространстве, оно не учитывает переотражения [6]. Во вторых ориентация объектов в пространстве относительно

падающего излучения влияет на итоговое поглощение [5-6]. Из-за сложной геометрии отражателей в области облучения, могут складываться «нули» и экстремумы интерференции, также влияющих на поглощение. В зависимости от попадания фантома в подобные «горячие» или «нулевые» точки, поглощение будет увеличиваться или уменьшаться соответственно [6]. В случае распределенного поглощения наблюдается увеличение поглощения в модели, что ожидалось с учетом переотражений и большей вероятности попадания в «горячие» точки интерференции.

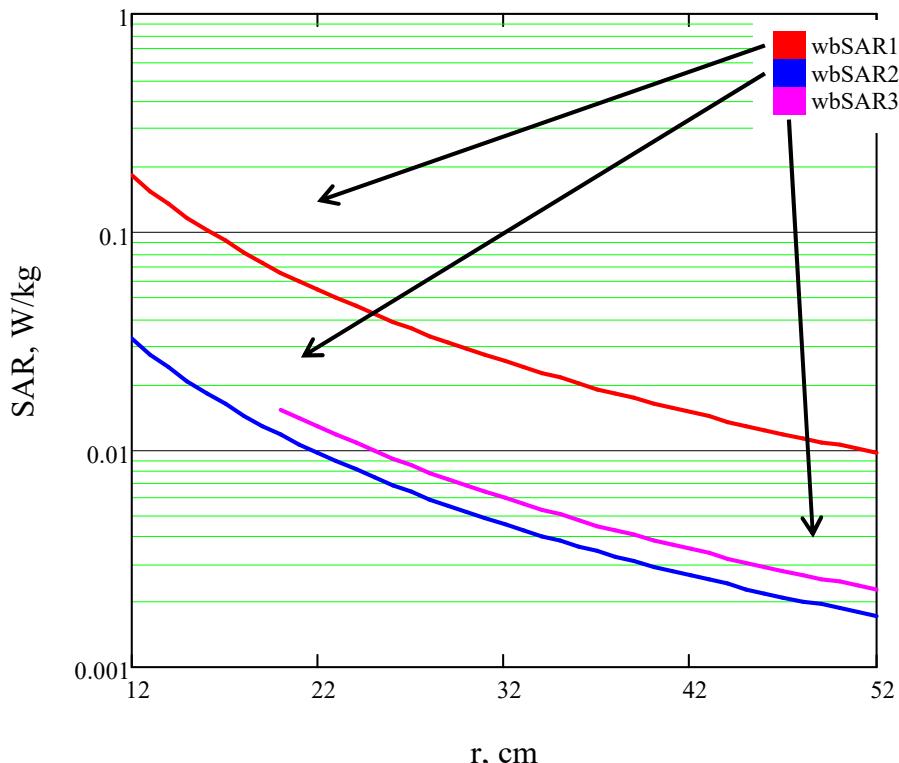


Рис.6 Теоретическая оценка распределения SAR для экспериментальных групп.

Несмотря на грубые приближения фантомов крыс, использованных в моделировании, численный расчет SAR качественно сопоставим с теоретической оценкой. Для более точной оценки требуется использование фантомов с высоким разрешением модели. Из полученных результатов, можно сделать вывод о том, что предложенное выражение (3) может быть использовано для приблизительной оценки SAR в случае распределенного поглощения.

Список публикаций:

- [1] Всемирная Организация Здравоохранения. Электромагнитные поля и общественное здравоохранение: мобильные телефоны [Электронный ресурс]. – Электрон., текстовые дан. – Режим доступа <https://www.who.int/ru/news-room/fact-sheets/detail/electromagnetic-fields-and-public-health-mobile-phones>, свободный.
- [2] Международная комиссия по защите от неонизирующего излучения. Publications [Электронный ресурс]. – Электрон., текстовые дан. – Режим доступа <https://www.icnirp.org/en/publications/> свободный
- [3] Krivova N.A., et al. The Effect of Chronic Exposure to 5G Radio Frequency Radiation on the Body in Male Wistar Rats of Different Ages // Scientific Reports // in proce.
- [4] ICNIRP. Guidelines for limiting exposure to electromagnetic fields (100 kHz to 300 GHz) // Health Phys. – 2020. – Vol. 118, № 5. – P. 483–524.
- [5] IEEE Standards. IEEE Std C95.3™-2002(R2008) IEEE Recommended Practice for Measurements and Computations of Radio Frequency Electromagnetic Fields With Respect to Human Exposure to Such Fields, 100 kHz–300 GHz.
- [6] Gandhi O.P. Deposition of electromagnetic energy in animals and in models of man with and without grounding and reflector effects / O. P. Gandhi, E. L. Hunt, J. A. D'Andrea // Radio science. – 1977. – Vol. 12, is. 65. – P. 39 – 47.
- [7] The specific absorption rate of tissues in rats exposed to electromagnetic plane waves in the frequency range of 0.05–5 GHz and SARwb in free-moving rats / B. Chen, J. Wang, H. Qi [et al.] // Australas Phys Eng Sci Med. – 2017. Vol. 40. – P. 21 – 28.