

## Интегральная оценка опасности воздействия последовательности сверхширокополосных электромагнитных импульсов на организм человека

© В.Г. Усыченко, Л.Н. Сорокин

Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр РАН,  
199178 Санкт-Петербург, Россия  
e-mail: usychenko@rphf.spbstu.ru, sorokinln@mail.ru

Поступило в Редакцию 17 мая 2022 г.  
В окончательной редакции 12 октября 2022 г.  
Принято к публикации 21 октября 2022 г.

Расчетными методами радиофизики и классической механики оценена опасность воздействия на теплокровные организмы последовательности сверхширокополосных электромагнитных импульсов субнаносекундной длительности, используемых в разных областях науки и техники. Определены пороговые значения параметров последовательностей, превышение которых в течение длительного времени может стать опасным для человека.

**Ключевые слова:** сверхкороткий электромагнитный импульс, электромагнитное воздействие, теплокровный организм, падающая энергия, свободные и связанные заряды.

DOI: 10.21883/JTF.2023.01.54077.137-22

### Введение

После появления радиосвязи и последующего распространения все более мощных и более высокочастотных радиопередающих систем различного вида во многих странах заинтересовались проблемой опасности электромагнитных излучений для человека. Опубликовано огромное число статей, монографий, учебников, пособий, в которых на самых разных уровнях сложности решаются задачи проникновения, поглощения и влияния (не только отрицательного) электромагнитных волн на работу различных органов человеческого тела и на его здоровье в целом. По результатам этих исследований в России [1], Канаде [2] и ряде других стран регламентированы предельно допустимые уровни воздействия на человека узкополосных электромагнитных излучений, находящихся в диапазоне частот от 30 kHz до 300 GHz.

В преамбуле [2] сказано, что обновленный в 2015 г. код безопасности (SAFETY CODE 6) не распространяется на все возможные ситуации, и в области, где технологии развиваются быстрыми темпами, могут применяться иные толкования. Например, нынешнее стремительное распространение сотовой связи заставило исследователей [3–6] заняться более глубоким изучением влияния используемых в этой области узкополосных электромагнитных колебаний на мозг человека. Другим примером является появление в последние десятилетия источников мощных сверхширокополосных электромагнитных излучений [7–9] в виде последовательности сверхкоротких электромагнитных импульсов (СКЭМИ), спектр которых может простирается от десятков–сотен MHz до нескольких GHz.

Мощные СКЭМИ широко используются для радиолокации малоразмерных или скрытых (стенкой, лесом, льдом, поверхностью земли) объектов, а также для исследования устойчивости автоматизированных и роботизированных систем к электромагнитным воздействиям. Российский стандарт [10] регламентирует использование СКЭМИ длительностью от 0.2 до 1 ns, с частотой следования  $F \geq 1$  kHz и пиковой напряженностью электрического поля  $E_p$  в области нахождения объекта до 30 kV/m и более. Импульсы примерно с такими же параметрами заявлены и в международных стандартах [11].

Последовательности СКЭМИ отличаются от узкополосных электромагнитных воздействий большой амплитудой электрического поля  $E_p$ , превышающей десятки kV/m, кратковременностью воздействия каждого импульса (не более единиц наносекунд) и большой шириной своего энергетического спектра. Предельно допустимые уровни таких воздействий на человека пока отсутствуют. В настоящей работе мы двумя различными методами, взяв за основу энергетический подход [12], попытаемся дать предварительные оценки.

### 1. Радиофизический метод

В дальней зоне мгновенное значение мощности СКЭМИ, падающей на тело человека, абрис которого (миделево сечение) равен  $\sigma$ , можно описать стандартной формулой

$$P_{\text{fal}}(t) = \frac{\sigma}{Z_0} E^2(t),$$

в которой  $E^2(t)/Z_0$  — вектор Пойнтинга;  $E(t)$  — временная зависимость напряженности электрического поля

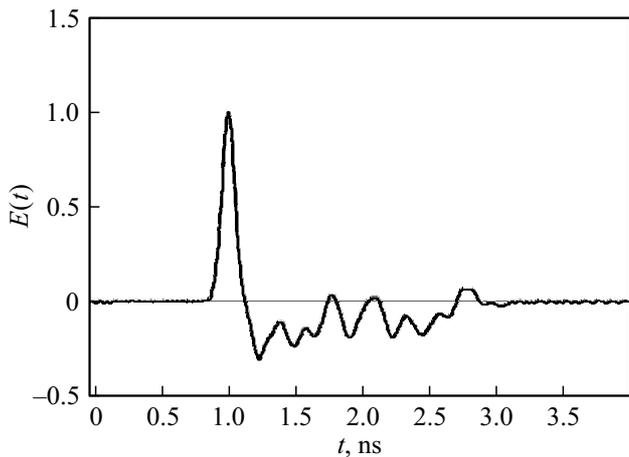


Рис. 1. Одна из возможных форм СКЭМИ.

СКЭМИ в области нахождения человека;  $Z_0 = 120\pi$  — волновое сопротивление пространства [13]. Для наглядности одна из возможных зависимостей электрического поля  $E(t)$  СКЭМИ представлена на рис. 1 в относительном виде.

Падающее на объект быстроменяющееся электромагнитное поле удобно описывать в единицах энергии. При этом полная энергия СКЭМИ, падающая на объект, равна

$$\Theta_{\text{fal}} = \frac{\sigma}{Z_0} \left[ \int_{-\infty}^{\infty} E^2(t) dt = E_p^2 \tau_e \right], \quad (1)$$

где  $E_p$  — пиковое значение СКЭМИ, а

$$\tau_e = \frac{1}{E_p^2} \int_{-\infty}^{\infty} E^2(t) dt \quad (2)$$

— эквивалентная длительность СКЭМИ. Действительно, подставив (2) в (1), получим в квадратных скобках тождество. Формула (1) ставит в соответствие знакопеременному СКЭМИ прямоугольный видеопульс длительностью  $\tau_e$ , амплитуда которого равна  $E_p$ . В частности, у импульса, изображенного на рис. 1, эквивалентная длительность не превышает 0.15 ns.

Используя равенство Парсеваля [14], из (1) найдем также падающую на теплокровный объект (ТО) энергию СКЭМИ, выраженную через его энергетический спектр:

$$\Theta_{\text{fal}} = \int_{-\infty}^{\infty} P_{\text{fal}}(t) dt = \frac{\sigma}{Z_0} \int_{-\infty}^{\infty} E^2(t) dt = \frac{\sigma}{Z_0} \int_0^{\infty} 2S_E^2(f) df. \quad (3)$$

Здесь  $2S_E^2(f)$  — квадрат модуля спектра

$$|\dot{S}_E(\omega)| = \left| \int_{-\infty}^{\infty} E(t) \exp(-j\omega t) dt \right|$$

напряженности электрического поля СКЭМИ в области нахождения объекта, выраженный через физическую частоту  $f \geq 0$ . На рис. 2 приведен нормированный на свое максимальное значение энергетический спектр импульса, изображенного на рис. 1. Видно, что подавляющая часть спектра сосредоточена в диапазоне частот от 100 MHz до 3 GHz. Усредненная по этому диапазону плотность энергетического спектра примерно равна 0.3.

С учетом (1) уравнение (3) для энергии одиночного СКЭМИ, падающего на ТО, принимает вид

$$\Theta_{\text{fal}} = \frac{\sigma}{Z_0} \left[ \int_{-\infty}^{\infty} E^2(t) dt = 2 \int_0^{\infty} S_E^2(f) df = E_p^2 \tau_e \right]. \quad (4)$$

Проведем оценки. Во введении приводились параметры СКЭМИ, используемых на практике. Выберем из них такие, которые в совокупности близки к предельным значениям: длительность 0.2 ns, частота следования  $F = 1$  kHz, пиковая напряженность электрического поля в области нахождения объекта  $E_p = 10^5$  V/m. Пусть теплокровный объект, абрис которого имеет площадь  $\sigma = 0.7$  m<sup>2</sup>, находится под облучением такой последовательности СКЭМИ. Используя формулу

$$\Theta_{\text{fal}} = \frac{\sigma}{Z_0} E_p^2 \tau_e$$

из (4), подставив значения выбранных параметров, получим энергию  $\Theta_{\text{fal}} \approx 3.7 \cdot 10^{-3}$  J одного СКЭМИ. Умножив на частоту следования импульсов, получим мощность  $P_{\text{fal}} = \Theta_{\text{fal}} F \approx 3.7$  W последовательности СКЭМИ, падающей на ТО.

Механизмы воздействия на ТО СКЭМИ и непрерывных электромагнитных волн (т.е. СВЧ-колебаний) могут быть разными по своей природе, поэтому сравнивать между собой результативность того или другого вида не вполне корректно. Но вместе с тем у обоих из них имеется общий механизм — тепловой, причем для непрерывных воздействий существуют даже предельные нормы. Поэтому сравним оба вида по уровню теплового воздействия.

При долговременном воздействии СКЭМИ, следующих с частотой  $F = 1$  kHz, плотность падающей на ТО

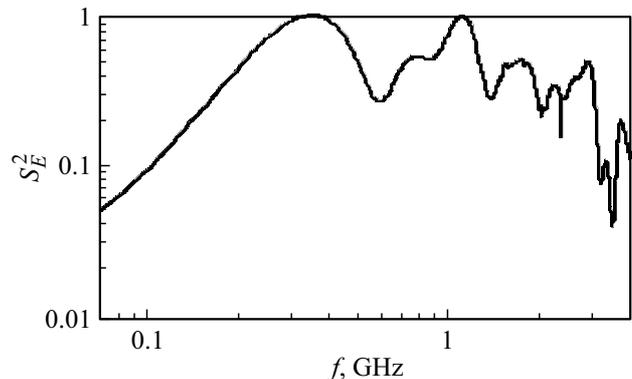


Рис. 2. Нормированный энергетический спектр СКЭМИ.

мощности равна  $P_{\text{fal}}/\sigma \approx 0.53 \text{ mW/cm}^2$ . Это значение оказывается примерно в четыре раза меньше предельно допустимого уровня  $P_{\text{fal}}/\sigma \approx 2 \text{ mW/cm}^2$  непрерывных электромагнитных излучений частотного диапазона ( $0.1 \leq f \leq 5$ ) GHz, действующих на человека [15,16] в течение 6 min. Из рис. 2 видно, что в этот же диапазон попадает и спектр рассматриваемых нами СКЭМИ. Следовательно, частотные составляющие спектра СКЭМИ в энергетическом смысле воздействуют на организм в среднем так же, как и СВЧ-колебания, и сопоставление результатов этих двух воздействий вполне допустимо.

Итак, тепловое воздействие на человека СКЭМИ с параметрами  $E_p = 10^5 \text{ V/m}$ ,  $\tau_e \approx 0.2 \text{ ns}$ ,  $F = 1 \text{ kHz}$  и длительностью облучения  $\Delta t < 6 \text{ min}$  оказывается в четыре раза меньше предельно допустимого уровня  $P_{\text{fal}}/\sigma \approx 2 \text{ mW/cm}^2$ , регламентированного для непрерывных СВЧ-колебаний. Увеличив один или несколько параметров СКЭМИ таким образом, чтобы произведение  $E_p^2 \tau_e F = 10^{10} \cdot 2 \cdot 10^{-10} \cdot 10^3 = 2 \cdot 10^3$  возросло в  $N = 4$  раз, выйдем на этот предельно допустимый уровень  $P_{\text{fal}}/\sigma \approx 2 \text{ mW/cm}^2$ . Таким образом, значение произведения

$$\Pi = NE_p^2 \tau_e F = 4 \cdot 10^{10} \cdot 2 \cdot 10^{-10} \cdot 10^3 = 8 \cdot 10^3 \text{ V}^2/\text{m}^2 \quad (5)$$

основных параметров последовательности СКЭМИ, воздействующих на человека непрерывно в течение  $\Delta t = 6 \text{ min}$ , можно считать порогом, превышение которого может стать опасным для его здоровья.

## 2. Механический метод

Реагировать на воздействие электромагнитного поля могут только заряженные частицы. При непрерывном воздействии электромагнитной волны в тканях человека происходит поворот дипольных молекул или колебание свободных зарядов с частотой  $f_0$  изменения поля. Оба эти процесса сопровождаются тепловыми потерями, которые зависят от диэлектрической проводимости тканей [16], их удельной электрической проводимости и частоты  $f_0$ . Соотношение между этими двумя видами потерь выражается комплексной диэлектрической проницаемостью

$$\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon''.$$

где  $\varepsilon'$  — относительная диэлектрическая проницаемость, измеренная на частоте  $f_0$ ;  $\varepsilon'' = \gamma/2\pi f_0 \varepsilon_0$  — коэффициент потерь, учитывающий преобразование энергии волн в тепло из-за наличия электропроводности;  $\gamma$  — активная удельная электропроводность, измеренная на частоте  $f_0$ ;  $\varepsilon_0$  — электрическая постоянная вакуума. Структура коэффициента потерь  $\varepsilon''$  указывает на то, что под воздействием энергии непрерывной электромагнитной волны заряженные частицы будут колебаться относительно своих центров тяжести с частотой  $f_0$  колебаний волн.

Помимо превращения в тепло энергия электромагнитного или электрического поля влияет на скорость биохимических реакций и на диффузионные процессы, протекающие в биологических тканях, что может привести к непредсказуемым последствиям. Например, при воздействии однополярных электрических импульсов наносекундной длительности с амплитудой электрического поля от  $E = 10^5$  до  $E = 10^{-7} \text{ V/m}$  и более может происходить [17] изменение проницаемости биологических мембран, ведущее к повышенному трансмембранному переносу ионов — электропортации, а также заряженных и нейтральных молекул. Но СКЭМИ — это не однополярный электрический видеопульс, а знакопеременный электромагнитный импульс (рис. 1), меняющаяся амплитуда которого, усредненная за время его существования, равна нулю: воздействие таких знакопеременных импульсов с пиковыми значениями  $E_p \leq 10^7 \text{ V/m}$  не приводит к электропортации и связанным с ней явлениям [17].

В тканях человека концентрация свободных электронов пренебрежимо мала. Свободными заряженными частицами являются ионы различных химических элементов, причем в клетках — преимущественно ионы калия, в межклеточных растворах — ионы натрия [18]. С целью упрощения расчетов оценим результативность воздействия СКЭМИ на ион калия, находящийся не в клетке, а в вакууме, где его движению ничто не мешает.

Уравнение движения свободной частицы массой  $m$ , несущей заряд  $e$  и находящейся в электрическом поле  $E(t)$ , имеет вид

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \frac{e}{m} E(t). \quad (6)$$

Заменим СКЭМИ энергетически эквивалентным ему видеопульсом с типичной эквивалентной длительностью  $\tau_e \approx 0.2 \text{ ns}$ . Решая уравнение, найдем, что к моменту окончания видеопульса с пиковой напряженностью поля  $E_p = 10^5 \text{ V/m}$  ион калия будет иметь скорость

$$\dot{x} \approx \frac{e}{m_K} E_p \tau_e = 50 \text{ m/s}$$

(начальную скорость иона полагаем равной нулю) и сместится на расстояние  $x \approx 10^{-8} \text{ m}$ , которое примерно равно трем межатомным расстояниям в водном растворе и на полтора порядка меньше среднего размера человеческой клетки. При этом приобретенная ионом кинетическая энергия  $W_K = 0.5 m_K \dot{x}^2 \approx 8.1 \cdot 10^{-23} \text{ J}$  оказывается на два порядка меньше его тепловой энергии  $3/2 kT \approx 6.4 \cdot 10^{-21} \text{ J}$  (здесь  $k = 1.383 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$  — постоянная Больцмана,  $T \approx 310 \text{ K}$  — температура человеческого тела).

Для сравнения, при тех же условиях у иона натрия приобретенная от поля кинетическая энергия  $W_{\text{Na}} \approx 1.4 \cdot 10^{-22} \text{ J}$  примерно в 50 раз меньше тепловой. Даже у протона приобретенная энергия  $W_p \approx 3.1 \cdot 10^{-21} \text{ J}$  примерно вдвое меньше его тепловой энергии. Если же интегрировать уравнение (6) не в

пределах эквивалентной длительности видеоимпульса, а используя форму реального СКЭМИ (рис. 1), то максимальные отклонения ионов от исходного положения уменьшаются, и приобретенная ими энергия снизится в несколько раз. Таким образом, оценки кинетической энергии частиц, полученные нами при замене СКЭМИ эквивалентным по энергии видеоимпульсом, могут быть завышенными. Но это превышение может быть небольшим: например на рис. 1 длительность первого выброса  $E(t)$  соизмерима с эквивалентной длительностью  $\tau_e \approx 0.2$  ns всего импульса.

Следует также учитывать, что при проникновении электромагнитной волны вглубь тела напряженность  $E(t)$  поля уменьшается и эффективность воздействия снижается.

### 3. Обсуждение

Полученные оценки показывают, что у теплокровных организмов наиболее чувствительными к воздействиям сверхкоротких электрических импульсов являются свободные ионы легких химических элементов. В вакууме приобретаемая ими от поля энергия растет пропорционально квадрату поля  $E_p^2$ , квадрату длительности  $\tau_e^2$  импульса и обратно пропорционально массе. У протона эта энергия максимальна и при воздействии одиночного импульса с параметрами  $E_p = 10^5$  V/m,  $\tau_e \approx 0.2$  ns она оказывается сопоставима с его тепловой энергией.

В теле живого организма динамика движения ионов не такая, как в вакууме: при заданных значениях параметров  $E_p$  и  $\tau_e$  видеоимпульса приобретаемая от внешнего поля энергия остается прежней, но часть этой энергии передается другим частицам при столкновениях с ними, в результате чего направление движения иона становится неопределенным [19]. Доля отдаваемой энергии тем меньше, чем меньше масса иона по отношению к массе частиц, с которыми он сталкивается, и чем меньше частота столкновений. Иными словами, для иона в теле организма сохраняются законы пропорциональности его кинетической энергии величинам  $E_p^2$ ,  $\tau_e^2$ ,  $m_i^{-1}$ , которые действуют и в вакууме, но при этом часть приобретаемой энергии передается частицам, с которыми он сталкивается. Это приводит к увеличению температуры. У протона приобретаемая энергия уменьшается при столкновениях слабее, чем у более тяжелых ионов.

При увеличении электрического поля  $E_p$  видеоимпульса или произведения  $E_p^2 \tau_e F$  хотя бы в четыре раза, энергия протонов и легких ионов станет превалировать над их тепловой энергией, что может повлиять на диффузионные процессы и скорость биохимических реакций с их участием. В этом случае мы приближаемся к тепловому порогу (5), полученному в предыдущем разделе иными методами.

Обобщая полученные результаты, приходим к выводу, что в общем случае пороговым значением, характеризующим степень опасности СКЭМИ,

является произведение основных его параметров  $\Pi \approx NE_p^2 \tau_e F \approx 8 \cdot 10^3$  V<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>, превышение которого может оказаться небезвредным для человека при временах облучения, превышающих несколько минут.

### Заключение

С физической точки зрения не следует ожидать сколько-нибудь ощутимой реакции человека и других теплокровных биологических видов на кратковременное (порядка минуты) воздействие электромагнитных импульсов субнаносекундной длительности с пиковой напряженностью падающего электрического поля  $E_p \leq 10^5$  V/m и частотой следования  $F \leq 1$  kHz. Объясняется это тем, что в теле человека концентрация свободных электронов и дырок ничтожна, а при полях  $E_p \approx 10^5$  V/m механизм передачи энергии сверхкороткого импульса свободным и связанным заряженным ионам неэффективен по причине их большой массы и малой длительности знакопеременного импульса.

Но при увеличении амплитуды, длительности, частоты следования и времени облучения динамика физических процессов в организме быстро меняется, и воздействие СКЭМИ может стать опасным для человека. Физика не отвечает на вопрос о том, что представляет собой эта опасность; ответить на него могут биофизики и медики, строя свои выводы по результатам экспериментальных исследований.

### Благодарности

Авторы благодарны кандидату биологических наук А.И. Ерофееву за дискуссию.

### Финансирование работы

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-29-06010.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] СанПиН 1.2.3685-21. *Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания* (М.: Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 28 января 2021 г., № 2), 677 с.
- [2] Canada SAFETY CODE 6 (2015).
- [3] M. Esmekaya, C. Ozer, N. Seyhan. *General Physiology and Biophysics*, **30** (1), 84 (2011). DOI: 10.4149/gpb-2011-01-84
- [4] S. Dasdag, M.Z. Akdag, M.E. Erdal, N. Erdal, O.I. Ay, M.E. Ay, K. Yegin. *Intern. J. Radiation Biology*, **91** (7), 555 (2015). DOI: 10.3109/09553002.2015.1028599
- [5] А.Я. Савицкая, В.В. Паслен. *Экология и ноосферология*, **20** (1–2), 38 (2009).

- [6] И.А. Лагуцкий, М.В. Давыдов, В.В. Кизименко, В.А. Богущ. Доклады БГУИР, **19** (1), 52 (2021). <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2021-91-1-52-60>
- [7] В.П. Беличенко, Ю.И. Буянов, В.И. Кошелев. *Сверхширокополосные импульсные радиосистемы*, под общ. ред. В.И. Кошелева (Наука, Новосибирск, 2015)
- [8] Г.А. Месяц, М.И. Яландин. УФН, **175** (3), 225 (2005).
- [9] К.Ю. Сахаров. *Излучатели сверхкоротких электромагнитных импульсов и методы измерений их параметров* (Московский государственный институт электроники и математики, М., 2006)
- [10] ГОСТ Р 52863-2007. *Защита информации. Автоматизированные системы в защищённом исполнении. Испытания на устойчивость к преднамеренным силовым электромагнитным воздействиям. Общие требования* (Стандартинформ, М., 2008), 38 с.
- [11] W.A. Radasky. Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility (AP EMC), 758 (2010).
- [12] В.А. Овсянников. Дис. д-ра техн. наук. С.-Пб.: ФГУП „НИИЭФА им. Д.В. Ефремова“, 2003.
- [13] Х. Мейнке, Ф. Гундлах. *Радиотехнический справочник* (Госэнергоиздат, 1960), т. 1.
- [14] И.С. Гоноровский. *Радиотехнические цепи и сигналы* (Радио и связь, М., 1986)
- [15] И.М. Ахметзянов и др. *Колебания и волны (гигиеническая оценка, нормирование, защита)* (Диалект, СПб., 2006)
- [16] С.М. Аполлонский, К.Р. Малаян. *Электромагнитная экология человека* (Изд-во Политехнического ун-та, СПб., 2008)
- [17] Bioelectrics. Springer Jpn., 2017. DOI: 10.1007/978-4-431-56095-1
- [18] В.Дж. Маршалл. *Клиническая биохимия* (Невский диалект, СПб., 1999)
- [19] Ю.П. Райзер. *Физика газового разряда* (Физматлит, М., 1992)