

Актуальные проблемы медицины труда: Сб. трудов института / под ред. акад. РАМН Н.Ф. Измерова. — М.: ГУ НИИ медицины труда РАМН, 2012. — С. 89–113.

5. Пальцев Ю.П., Походзей Л.В., Рубцова Н.Б., Перов С.Ю., Богачева Е.В. Проблема изучения влияния электромагнитных полей на здоровье человека. Итоги и перспективы // Мед. труда и пром. экология». — 2013. — №6. — С. 35–40.

6. Походзей Л.В., Пальцев Ю.П., Богачева Е.В. Научно-методическое обоснование новой концепции гигиенической регламентации электромагнитной обстановки на компьютеризированных рабочих местах // Актуальные пробл. мед. труда: Сб. трудов института / под ред. акад. РАН, проф. Н.Ф. Измерова, проф. И.В. Бухтиярова. — М.: ООО «Мелга», 2015. — С. 167–193.

REFERENCES

1. Nikitina V.G., Lyashko G.G., Necheporenko E.Yu et al. Electromagnetic situation on workplaces with PC. Problems of personnel safety. Annual of Russian National Committee on protection against nonionizing radiation of 2011. — Moscow: Tsentr elektromagnitnoy bezopasnosti, 2012. — P. 131–137 (in Russian).

2. Pal'tsev Yu.P., Pokhodzey L.V., Rubtsova N.B., Bogacheva E.V. Problems of harmonizing hygienic regulations of electromagnetic fields in mobile radio devices // Gig. i san. — 2013. — 3. — P. 39–42 (in Russian).

3. Pal'tsev Yu.P., Pokhodzey L.V., Rubtsova N.B., Bogacheva E.V. Improving and harmonizing hygienic regulations for electric and magnetic fields // Industr. med. — 2013. — 2. — P. 5–8 (in Russian).

4. Pal'tsev Yu.P., Pokhodzey L.V., Rubtsova N.B., Perov S.Yu., Lazarenko N.V., Kleshchenok O.I. Improving and harmonizing hygienic regulations for electromagnetic fields. In: Izmerov N.F., ed. Topical problems of industrial medicine. Proc. of scientific papers. — Moscow: GU NII meditsiny truda RAMN, 2012. — P. 89–113 (in Russian).

5. Pal'tsev Yu.P., Pokhodzey L.V., Rubtsova N.B., Perov S.Yu., Bogacheva E.V. Problem of electromagnetic fields influence on human health. Results and prospects. Industrial medicine, 2013. — 6. — P. 35–40 (in Russian).

6. Pokhodzey L.V., Pal'tsev Yu.P., Bogacheva E.V. Scientific and methodic basis for new concept of hygienic regulation of electromagnetic situation on computerized workplaces. In: Izmerov N.F., Buhtiyarov I.V., ed. Topical problems of industrial medicine. Proc. of scientific papers. — Moscow: ООО «Мелга», 2015. — P. 167–193 (in Russian).

7. International Commission on Non-ionizing Radiation Protection: Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz) / Health Phys 1998, 74. — 494–522.

8. IEEE Std 802.11n-2009 — Information technology. Telecommunications and information exchange between systems. Local and metropolitan area networks. Specific requirements — Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications — Amendment 5: Enhancements for Higher Throughput.

Поступила 14.07.2014

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Походзей Лариса Васильевна (Pokhodzey L.V.);

вед. науч. сотр. ФГБНУ «НИИ МТ», проф. каф. мед. труда ГБОУ ВПО Первый МГМУ им. И.М. Сеченова Минздрава России, д-р мед. наук. E-mail: Lapokhodzey@yandex.ru

Пальцев Юрий Петрович (Pal'tsev Yu.P.);

гл. науч. сотр. ФГБНУ «НИИ МТ», д-р мед. наук, проф., засл. деятель науки РФ. E-mail: Paltsev31@mail.ru

Курьеров Николай Николаевич (Kur'evov N.N.);

гл. инж. ФГБНУ «НИИ МТ», канд. биол. наук. E-mail: courierov@mail.ru

Богачева Елена Васильевна (Bogachova E.V.);

мл. науч. сотр. ФГБНУ «НИИ МТ». E-mail: theorangenight@rambler.ru

УДК 613.648.2, 537.872.32

С.Ю. Перов^{1,2}, Е.В. Богачева¹, О.В. Белая¹

НОВЫЙ МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ГИГИЕНИЧЕСКОЙ ОЦЕНКЕ ПОГЛОЩЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ЭНЕРГИИ В УСЛОВИЯХ БЛИЖНЕЙ ЗОНЫ ИСТОЧНИКА ИЗЛУЧЕНИЯ

¹ФГБНУ «Научно-исследовательский институт медицины труда», д. 31, пр-т Буденного, Москва, Россия. 105275

²ФГБОУ ВО «МГУ им. М.В. Ломоносова», д. 1, Ленинские горы, Москва, Россия, 119991

В настоящее время актуальной задачей гигиенической оценки ЭМП РЧ носимых средств связи является разработка нового подхода с учетом российских и международных принципов нормирования. Такой подход позволит проводить корректную оценку реальных условий экспозиции пользователя, а также учитывать поглощение энергии человеком, находящимся в ближней зоне источника. Целью работы является исследование применимости гипотезы о возможной связи магнитной составляющей электромагнитного поля с удельной поглощенной мощностью. Данная

гипотеза рассматривается как основа для разработки нового методического подхода к гигиенической оценке персональных носимых устройств связи в ближней зоне источника. Анализ полученных данных показал, что наблюдаемое расхождение между предложенной и классической методиками уменьшается с увеличением частоты. Для каждого рассматриваемого источника в его ближней зоне возможно определить оптимальные условия применения предложенного подхода с ошибкой менее 2 дБ. На основе результатов исследований о связи падающей электромагнитной энергии и величины удельной поглощенной мощности возможно дальнейшее совершенствование методов контроля уровней электромагнитных полей при оценке персональных носимых устройств систем радиосвязи.

Ключевые слова: радиочастотные электромагнитные поля, удельная поглощенная мощность, ближняя зона источника излучения.

S.Yu. Perov^{1,2}, E.V. Bogachova¹, O.V. Belaya¹. **New methodic approach to hygienic evaluation of electromagnetic energy absorption in near-field zone of irradiation source**

¹Federal State Budgetary Scientific Institution «Research Institute of Occupational Health», 31, Prospect Budenogo, Moscow, Russia, 105275

²Federal State Budget Educational Institution of Higher Education M.V. Lomonosov Moscow State University, GSP-1, Leninskie Gory, Moscow, Russia, 119991

Nowadays, essential objective of hygienic evaluation of electromagnetic energy absorption of mobile radio-frequency devices is specification of new approach with consideration of russian and international regulation principles. This approach enables to evaluate correctly users' actual exposure conditions and consider energy absorption by human in near-field zone of the irradiation source. The work is aimed to study applicability of hypothesis on possible relations between magnetic part of electromagnetic field and specific absorbed capacity. This hypothesis is considered a basis for designing a new methodic approach to hygienic evaluation of individual mobile communication devices in near-field zone of the source. Analysis of the data obtained demonstrates that visible difference between suggested and classic methods decreases with higher frequency. Every studied source in its near-field zone can be characterized by optimal conditions for the suggested method usage with error less than 2 dB. The study results on relations between decreasing electromagnetic energy and specific absorbed capacity value make possible further improvement of methods controlling electromagnetic field levels in assessment of personal mobile radio communication devices.

Key words: radio-frequency electromagnetic fields, specific absorbed capacity, near-field zone of irradiation source.

В современных условиях научно-технического прогресса неотъемлемой частью повседневной жизни человека стали интенсивно развивающиеся технологии беспроводной передачи данных, работающие посредством электромагнитных полей (ЭМП) радиочастотного диапазона (РЧ). В настоящее время в производственных условиях почти повсеместно используются разнообразные носимые (компактные) устройства радиосвязи, которые являются передатчиками информации и, в зависимости от назначения, различаются как конструктивно, так по техническим характеристикам (рабочий частотный диапазон ЭМП, мощность, структура сигнала и пр.). Например, наиболее удобным видом связи различных служб общественной безопасности и транспорта (полиция, скорая помощь, ремонтно-оперативные службы депо, сортировочные горки железнодорожного транспорта и т. д.) является симплексная радиосвязь, которая обеспечивается профессиональными радиостанциями (диапазоны частот 146–174 МГц, 300–344 МГц, 440–470 МГц) и терминалами транкинговых систем стандарта TETRA (100–900 МГц). Локальные радиотелефонные сети на территории отдельного предприятия зачастую организованы на основе стандарта DECT (1880–1900 МГц), а мобильная телефония общего назначения обеспечивается стандартами сотовой связи GSM 900 (890–960 МГц), GSM 1800 (1710–1880 МГц), CDMA-2000

(1900–2100 МГц) и UMTS (1920–2110 МГц). Беспроводная передача данных между различными техническими системами возможна благодаря модулям, работающим по технологиям Bluetooth (2400–2483,5 МГц), Wi-Fi (2400–2483,5 МГц и 5150–5350 МГц) или LTE (2,5–2,7 ГГц) и встроенным в различное персональное оборудование (беспроводные гарнитуры мобильных устройств типа «свободные руки», ноутбуки, коммуникаторы или смартфоны, компьютерное оборудование типа принтеров, клавиатуры, мышей) [1].

При работе носимых радиопередающих устройств, располагаемых в непосредственной близости от человека, часть излучаемой энергии может поглощаться в разных областях тела в зависимости от места нахождения источника. Характер поглощения энергии обуславливает биологическое действие и возможность потенциального неблагоприятного влияния на здоровье, преимущественно со стороны нервной, сердечно-сосудистой, нейроэндокринной и иммунной систем [2,4]. В связи с этим существует проблема обеспечения безопасности здоровья человека при использовании современными персональными устройствами связи, значительная часть которых работает в диапазоне частот 300–3000 МГц.

В соответствии с действующими в России принципами, гигиеническая оценка воздействия ЭМП в рассматриваемом частотном диапазоне осуществляется по уровню плотности потока энергии (ППЭ, в

мкВт/см²) [3]. При этом оценку ППЭ необходимо проводить на значительно больших расстояниях от устройства, чем предполагает его эксплуатация. Важно отметить, что при работе пользователь находится в ближней зоне ЭМП, которая характеризуется крайней неоднородностью поля и отсутствием точных соотношений (импеданс свободного пространства) между компонентами электромагнитной волны — вектором напряженности электрического поля E (В/м) и вектором напряженности магнитного поля H (А/м). В связи с этим практически невозможно определить ППЭ и провести корректную оценку реальных условий экспозиции, несмотря на установленные нормативными документами значение ПДУ у головы пользователя [3].

В соответствии с международными стандартами безопасности и руководствами для гигиенической оценки ЭМП РЧ помимо контролируемых параметров E , H , и ППЭ в качестве критерия безопасности вводится дополнительная величина удельной поглощенной мощности (УПМ) или в английской терминологии «specific absorption rate» (SAR) [4]. Согласно сложившейся практике параметр УПМ определяется через электрическую составляющую E в тканеэквивалентном фантоме как количество поглощенной электромагнитной энергии в расчете на единицу объема тела, выражаемое в Вт/кг. Применение такого подхода позволяет оценить поглощенную энергию ЭМП в объекте на различных расстояниях от источника, в том числе и в ближней зоне. Ограничение использования УПМ заключается в невозможности оценки поглощения в гетерогенных структурах и реальных биологических объектах, учитывая, в том числе, длительность экспозиции, т. к. этот параметр направлен на оценку острых однократных воздействий фактора [7].

По данным исследований Kuster N. и Balzano Q. была предложена гипотеза о возможной связи поглощения энергии с падающей энергией ЭМП через магнитную составляющую в свободном пространстве [6]. Напряженность магнитного поля является контролируемой физической характеристикой ЭМП, не зависит от диэлектрических параметров объектов и имеет более линейный закон распространения вблизи источника излучения.

Таким образом, актуальной задачей является разработка нового подхода к гигиенической оценке ЭМП РЧ носимых средств связи с учетом российских и международных принципов нормирования, который позволит проводить корректную оценку реальных условий экспозиции пользователя, в том числе с учетом поглощенной человеком, находящимся в ближней зоне источника энергии.

Целью настоящей работы является исследование применимости гипотезы о возможной связи магнитной составляющей ЭМП с УПМ как основы для разработки нового методического подхода к гигиенической оценке персональных носимых устройств связи в ближней зоне источника. Для этого в работе сопоставлены два метода оценки поглощения энергии

в ближней зоне источника: УПМ_Е по классической схеме оценки и УПМ_Н в соответствии с предложенной гипотезой, а также проанализирована погрешность предложенного подхода.

Материалы и методы исследования. Величина УПМ_Е оценивается по классической схеме путем измерения электрической составляющей ЭМП РЧ в тканеэквивалентном фантоме и дальнейшего расчета по формуле [5]:

$$\text{УПМ}_E = \frac{\sigma}{\rho} |E|^2, \quad (1)$$

где σ — удельная электрическая проводимость объекта, См/м; ρ — плотность объекта, кг/м³; $|E|^2$ — среднеквадратичное значение напряженности электрической составляющей, В/м.

В предложенной гипотезе для оценки УПМ_Н необходимо измерить магнитную составляющую ЭМП РЧ и затем использовать следующую формулу [6]:

$$\text{УПМ}_H = \frac{\sigma \mu \omega}{\rho \sqrt{\sigma^2 + \varepsilon^2 \omega^2}} (1 + c_{\text{corr}} \gamma_{pw})^2 H^2, \quad (2)$$

где σ — удельная электрическая проводимость объекта, См/м; ε — относительная диэлектрическая проницаемость объекта; ρ — плотность объекта, кг/м³; $|H|^2$ — среднеквадратичное значение напряженности магнитной составляющей в свободном пространстве, А/м; ω — круговая частота ЭМП; γ_{pw} — коэффициент, учитывающий эффекты отражения вблизи объекта; c_{corr} — поправочный коэффициент, учитывающий соотношение размеров объекта и длины волны.

Источниками ЭМП РЧ в работе служили полуволновые диполи для частот 900, 1800 и 2450 МГц, соответствующие наиболее распространенным стандартам связи. Входная мощность источников ЭМП, поступающая с аналогового генератора сигналов N5181A MXG (Agilent Technologies, США), составляла 250 мВт. Контроль мощности осуществлялся с помощью двуправленных ответвителей и двухканального измерителя мощности E4419B (Agilent Technologies, США).

Для экспериментальных исследований поглощения энергии в работе использовалась система автоматизированной дозиметрии DASY 52 NEO (SPEAG AG, Швейцария), которая позволила провести измерения электрической составляющей ЭМП РЧ в фантоме тела человека, наполненном тканеэквивалентной жидкостью с суммарными диэлектрическими параметрами тканей для выбранного диапазона частот и магнитной составляющей в свободном пространстве. Измерения уровней ЭМП проводились с использованием миниатюрных изотропных зондов: H3DV6 (SPEAG AG, Швейцария) — для измерения среднеквадратичного значения магнитной составляющей в свободном пространстве и ES3DV6 (SPEAG AG, Швейцария) — для дозиметрической оценки УПМ (E) по среднеквадратичному значению электрической составляющей в фантоме.

В табл. 1 представлены используемое в исследованиях оборудование и типы тканеэквивалентных жидкостей фантома.

Таблица 1

Используемое оборудование

Исследуемая частота, МГц	Тип тканезквивалентной жидкости (производитель)	Тип полуволнового диполя (производитель)	Тип двунаправленного ответвителя (производитель)
900	HSL900V2 $\rho=1280 \text{ кг/м}^3$, $\sigma=0,96 \text{ См/м}$, $\epsilon=41,0$ (SPEAG AG, Швейцария)	D900V2 (SPEAG AG, Швейцария)	111692D (Hewlett-Packard, США)
1800	HSL1800 $\rho=988 \text{ кг/м}^3$, $\sigma=1,36 \text{ См/м}$, $\epsilon=40,7$ (SPEAG AG, Швейцария)	D1800V2 (SPEAG AG, Швейцария)	111692D (Hewlett-Packard, США)
2450	HSL 2450V2 $\rho=988 \text{ кг/м}^3$, $\sigma=1,88 \text{ См/м}$, $\epsilon=38,2$ (SPEAG AG, Швейцария)	D2450V2 (SPEAG AG, Швейцария)	778D-011 (Agilent Technologies, США)

Таблица 2

Диапазоны максимальных значений УПМ

Частота, МГц	Диапазон значений УПМ		Диапазон значений УПМ на 10 г	
	УПМ _Е , Вт/кг	УПМ _Н , Вт/кг	УПМ _Е , Вт/кг	УПМ _Н , Вт/кг
900	от 2,12 до 0,19	от 0,51 до 0,09	от 1,3 до 0,15	от 0,31 до 0,06
1800	от 6,02 до 0,20	от 2,23 до 0,24	от 3,19 до 0,14	от 1,06 до 0,12
2450	от 8,51 до 0,24	от 3,66 до 0,34	от 4,03 до 0,15	от 1,37 до 0,13

При оценке поглощения энергии ЭМП источник располагался параллельно плоскому фантому на расстояниях до 40 мм с шагом 5 мм. Для каждого положения источника проводилось плоскостное сканирование в горизонтальной плоскости с шагом 10 мм. Область сканирования соответствовала размерам источника и занимала площадь $100 \times 200 \text{ мм}^2$, перекрывая всю область диаграммы направленности антенны.

По полученным плоскостным распределениям напряженности магнитной составляющей ЭМП в свободном пространстве проводилась оценка поглощения энергии УПМ_Н согласно ф-ле (2) для фантомных материалов, представленных в табл. 1. Также проводилась оценка значений УПМ, усредненных на 10 г, как в фантоме тела человека, так и путем пересчета по плоскостному сканированию магнитной составляющей в свободном пространстве. Алгоритм обработки данных и сопоставления результатов реализован с помощью пакета MATLAB R2010a (The MathWorks, США).

Результаты и их обсуждение. В результате проведенных исследований получены плоскостные распределения магнитной составляющей ЭМП в свободном пространстве и значения УПМ_Е и УПМ_Н для различных расстояний между источником ЭМП и фантомом.

Максимальные величины исследуемых параметров отмечались вблизи центра полуволнового диполя, причем вид пространственного распределения среднеквадратичных значений напряженности магнитной составляющей ЭМП в свободном пространстве сопоставим с характером распределения УПМ_Е в фантоме, что говорит об их возможной связи и применимости предложенной гипотезы.

Полученные по двум методикам величины УПМ отличаются как по своим значениям, так и по характеру изменения. В табл. 2 представлены изменения уровней максимальных и усредненных на 10 г УПМ, полученных различными методиками, в зависимости от расстояния источника ЭМП до фантома (от 0 до 40 мм).

Поглощение энергии ЭМП РЧ в фантоме растет с увеличением частоты и падает с удалением источника ЭМП от фантома, причем для одной и той же частоты значения УПМ_Е выше значений УПМ_Н.

При удалении от фантома оценка УПМ_Н по сравнению с УПМ_Е уменьшается медленнее, и для каждой частоты на определенном расстоянии от фантома наблюдается сходимость двух методик оценки поглощения. Результаты сравнения двух методик показали, что предложенный подход позволяет оценить уровни ЭМП в ближней зоне источника излучения с минимальными расхождениями. Например, для частоты 1800 МГц при удалении источника от фантома на расстояние 30 мм погрешность оценки составила менее 0,02 дБ и для 2450 МГц на 15 мм погрешность менее 0,08 дБ. Для частоты 900 МГц при удалении источника от фантома на расстояние 45 мм можно предположить, что погрешность оценки составит менее 3 дБ.

Расхождения между исследуемыми оценками УПМ при усреднении на 10 г составили менее 5 дБ при удалении на 30 мм источника 900 МГц, менее 2,5 дБ — при удалении на 25 мм источника 1800 МГц и менее 2 дБ — при удалении источника на 15 мм источника 2450 МГц.

По данным табл. 3 для каждой из рассмотренных частот на определенном расстоянии от фантома можно выделить оптимальную область применения методики, где наблюдается наименьшее расхождение между предложенной и классической методикой.

Таблица 3

Расхождения методик оценки поглощения

Частота, МГц	Оценка величины УПМ		Оценка величины УПМ на 10 г	
	Расстояние, мм	Расхождение, дБ	Расстояние, мм	Расхождение, дБ
900	более 45	менее 3	более 45	менее 4
1800	25–40	0,02–0,8	30–40	0,7–1,5
2450	10–35	0,08–1,5	15–40	0,6–2

Наибольшее значение погрешности определения УПМ_н наблюдалось при наихудших условиях экспозиции, когда источник находился вблизи фантома. Однако согласно полученным данным применение предложенной гипотезы может иметь ограничения из-за нелинейности ошибки в этой области. Эту особенность необходимо учитывать при разработке нового подхода к гигиенической оценке носимых устройств связи в ближней зоне источника излучения.

Выводы. 1. Результаты проведенных измерений подтвердили корректность предложенной гипотезы о возможной связи УПМ_е и УПМ_н для оценки поглощения энергии ЭМП РЧ в ближней зоне источника. Анализ данных показал, что наблюдаемое расхождение между двумя методиками уменьшается с увеличением частоты. Для каждого из рассматриваемых источников в ближней зоне имеется область сходимости, которая позволяет определить оптимальные условия применения предложенного подхода с ошибкой менее 2 дБ. 2. Ограничением применимости предложенной гипотезы является выраженная нелинейность ошибки в наихудших условиях экспозиции, т. е. при минимальных расстояниях между фантомом и источником, где наблюдается наибольшее расхождение оценок УПМ_е и УПМ_н. 3. На основе результатов исследований о связи падающей электромагнитной энергии и величины УПМ возможно дальнейшее совершенствование методов контроля уровней ЭМП при оценке персональных носимых устройств систем связи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ (см. REFERENCES pp. 4–7)

1. Рубцова Н.Б., Перов С.Ю., Богачева Е.В. // Безопасность в техносфере. — 2012. — №2. — С. 25–29.

2. Рубцова Н.Б., Походзей Л.В. // Энциклопедия «Экометрия» из серии справочных изданий по экологическим и медицинским измерениям — М.: ИПК Издательство стандартов, 2004. — С. 104–128.

3. СанПиН 2.1.82/2.4.1190–03 «Гигиенические требования к размещению и эксплуатации средств сухопутной подвижной радиосвязи».

REFERENCES

1. Rubtsova N.B., Perov S.Yu., Bogacheva E.V. // Bezopasnost' v tekhnosfere. — 2012. — 2. — P. 25–29 (in Russian).

2. Rubtsova N.B., Pokhodzey L.V. Encyclopedia «Ecometry» in series of reference books on ecologic and medical measurements. — Moscow: IPK Izdatel'stvo standartov, 2004. — P. 104–128 (in Russian).

3. SanPiN 2.1.82/2.4.1190–03 «Hygienic requirements to placement and exploitation of land mobile radio communication means» (in Russian).

4. ICNIRP Guidelines // Health physics — 1998. — V. 74, N. 4. — P. 494–522.

5. IEEE std. 1528–2003 — Recommended Practice for Determining the Peak Spatial-Average Specific Absorption Rate (SAR) in the Human Head from Wireless Communications Devices: Measurement Techniques. — Dec. 19, 2003, P. 120.

6. Kuster N., Balzano Q. // IEEE Transactions on Vehicular Technology. — 1992. — V. 41. — №1. — P. 17–23.

7. Perov S., Balzano Q., Kuster N. // Joint Meeting of The Bioelectromagnetics Society and the European BioElectromagnetics Association. — Davos, Switzerland. — June 14–19. — 2009, P. 18–5.

Поступила 26.06.2014

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Перов Сергей Юрьевич (Perov S.Yu.);

вед. науч. сотр. ФГБНУ «НИИ медицины труда» доктор-ант лаб. радиационной биофизики каф. биофизики Биологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, канд. биол. наук. E-mail: perov1980@mail.ru.

Богачева Елена Васильевна (Bogachova E.V.);

мл. науч. сотр. ФГБНУ «НИИ медицины труда», E-mail: elenav567@gmail.com.

Белая Ольга Викторовна (Belaya O.V.);

мл. науч. сотр. ФГБНУ «НИИ медицины труда». E-mail: ogabelaya@gmail.com.