

**ЭЛЕКТРОДИНАМИКА
И РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН**

УДК 537.874.6

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ
НА ЧЕЛОВЕКА ВНУТРИ АВТОМОБИЛЯ
МЕТОДОМ ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ ИСТОЧНИКОВ**

© 2020 г. В. Б. Джеладзе^a, *, Т. Р. Нозадзе^a, В. А. Табатадзе^a,
И. А. Петоев-Дарсавелидзе^a, М. М. Пришвин^a, Р. С. Заридзе^a

^aТбилисский государственный университет, лаборатория прикладной электродинамики и радиотехники,
просп. Чавчавадзе, 3, Тбилиси, 0128 Грузия

*E-mail: veriko.jeladze001@ens.tsu.edu.ge

Поступила в редакцию 27.11.2017 г.

После доработки 16.01.2018 г.

Принята к публикации 24.01.2018 г.

Исследовано влияние электромагнитного поля беспроводных средств связи на человека, находящегося внутри автомобиля, в диапазонах частот 450, 900 и 1800 МГц, соответствующих рабочему диапазону полицейских раций и современных мобильных телефонов. Приведен сравнительный анализ влияния поверхности земли под автомобилем. Результаты численных расчетов, проведенных с использованием метода вспомогательных источников, показывают наличие резонансных явлений и высокого реактивного поля внутри автомобиля, что ведет к нежелательному повышению уровня поглощаемой энергии в тканях человека.

DOI: 10.31857/S0033849420050034

ВВЕДЕНИЕ

Изучение воздействия электромагнитных полей от мобильных телефонов или от других средств беспроводной связи на человека является на сегодняшний день весьма актуальной задачей. Характер такого воздействия зависит от свойств источников поля, от способности тела поглощать и накапливать энергию, от расположения окружающих предметов, а также от ряда других факторов [1–6]. В работах [7–10] рассматривался характер воздействия поля в зависимости от положения руки и пальцев при удерживании мобильного телефона. Также важно учитывать, где находится пользователь — в закрытом или полужакрытом пространстве.

В работах [11, 12] были изучены ситуации, когда человек находился внутри комнаты с окном, а источником поля служил мобильный телефон или внешняя антенна от базовой станции. Применение метода вспомогательных источников (МВИ) при моделировании позволило имитировать различную прозрачность стен комнаты. Результаты показали наличие резонансных реактивных полей высокой амплитуды для комнаты с меньшей прозрачностью.

В данной работе рассмотрены ситуации, когда человек находится внутри автомобиля, а источник электромагнитного поля — мобильный теле-

фон, находящийся в непосредственной близости от головы. Как известно, автомобили изготавливаются из металлических и других проводящих материалов, которые менее прозрачны для электромагнитных волн. На некоторых частотах такая закрытая металлическая структура ведет себя как резонатор, что приводит к формированию резонансного поля высокой амплитуды. Такое поле может негативно влиять на человека, поэтому изучение рассматриваемой задачи для разных ситуаций и различных значений параметров системы весьма актуально. В работе исследованы свойства таких резонансных полей, а также влияние отражающей поверхности земли под автомобилем на их формирование.

Так же как и в предыдущих работах [11–14], задача решается с применением МВИ, а модель человека представляет собой однородный диэлектрик с усредненными значениями электродинамических параметров. В рассматриваемой модели автомобиля пренебрегается наличием колес, так как их влияние на формирование внутреннего поля несущественно.

Вопрос о формировании резонансного поля внутри автомобиля и о характере возбуждаемых поверхностных токов частично затрагивался в работе [14]. В ней не учитывались модель человека и влияние поверхности земли, однако был подробно описан алгоритм применения МВИ к неза-

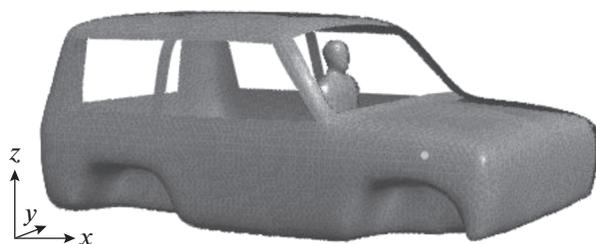


Рис. 1. Исследуемая модель.

мкнутым поверхностям, который находит свое применение и в данной работе. Следует отметить, что существует ряд других работ по рассматриваемой тематике, с использованием различных численных методов (см., например, [15, 16]). Однако вопрос о влиянии резонансного реактивного поля на человека полностью пока не изучен.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Рассмотрим модель системы, состоящей из автомобиля и находящегося внутри него человека (рис. 1). Падающее электромагнитное поле проникает во всю систему, и задача заключается в определении полей, формирующихся внутри и вне автомобиля, а также внутри человека. В данной модели (рис. 2) автомобиль представляет собой идеально проводящую поверхность S . На ней имеются открытые части σ_w , $w = 1, 2, \dots$ в виде окон. Модель человека представляет собой однородный диэлектрик с потерями, ограниченный замкнутой поверхностью S_0 . Поле $\vec{E}_{\text{пад}}, \vec{H}_{\text{пад}}$ от внутреннего источника считается заданным. Нам следует определить поля в трех областях: вне автомобиля (I), внутри автомобиля (II) и внутри модели человека (III). Более детальное описание применения МВИ к аналогичной задаче, приведено в работе [14].

Построим две пары вспомогательных поверхностей: S'_0, S''_0 – вне и внутри человека, и S', S'' – вне и внутри автомобиля, с распределенными на них вспомогательными источниками. В качестве вспомогательных источников используются два взаимно перпендикулярно ориентированных комбинированных диполя с неизвестными амплитудами, ориентированных вдоль касательных к соответствующей поверхности и создающих поля $\vec{E}_{\text{комб}}, \vec{H}_{\text{комб}}$ и $\vec{E}'_{\text{комб}}, \vec{H}'_{\text{комб}}$ [12, 17, 18]. Такие источники, как известно, обеспечивают направленное излучение. Количество вспомогательных источников на поверхностях S'_0 и S''_0 равно N_0 числу точек коллокаций на поверхности S_0 . Аналогично, количество вспомогательных источников на поверхностях S' и S'' равно N числу точек коллока-

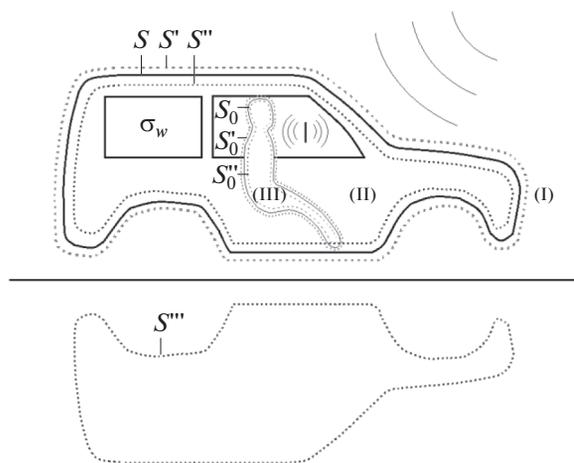


Рис. 2. Применение МВИ с учетом поверхности земли.

ций на поверхности S . Числа N_0 и N , являющиеся вспомогательными параметрами, должны быть подобраны заранее, с учетом желаемой точности решения задачи. Другими вспомогательными параметрами являются удаления δ'_0, δ''_0 и δ', δ'' вспомогательных поверхностей от основных (см. рис. 2). Поскольку рассматриваемая структура имеет сложную, выпукло-вогнутую форму, то значения δ'_0, δ''_0 и δ', δ'' должны быть подобраны весьма тщательно, с учетом сингулярностей аналитических продолжений рассеянных и собственных полей.

Подробные исследования природы сингулярностей аналитических продолжений внутренних (включая и собственных) полей показали, что они формируются исключительно поверхностью тела и расположены во внешней области или вдоль края открытой части этой поверхности. Сингулярности аналитического продолжения внешнего рассеянного поля расположены внутри тела на каустической поверхности. Исследования также показали, что вспомогательные поверхности должны охватывать эти сингулярности, что минимизирует время и погрешность численных расчетов. При этом минимальный радиус кривизны поверхности тела определяет максимальное допустимое удаление вспомогательных поверхностей, оно находится в пределах $0.2\lambda \dots 0.3\lambda$ [14, 18, 19].

Поле $\vec{E}_{(1)}, \vec{H}_{(1)}$ в первой области определяется вспомогательными источниками на поверхности S'' :

$$\vec{E}_{(1)} = \sum_{n=1}^N \left(a_n \vec{E}_{\text{комб}}^{(1)} + b_n \vec{E}'_{\text{комб}}^{(1)} \right) \Big|_{S''},$$

$$\vec{H}_{(1)} = \sum_{n=1}^N \left(a_n \vec{H}_{\text{комб}}^{(1)} + b_n \vec{H}'_{\text{комб}}^{(1)} \right) \Big|_{S''}.$$

Так как источник падающего поля $\vec{E}_{\text{пад}}, \vec{H}_{\text{пад}}$ находится во второй области, то поле $\vec{E}_{(II)}, \vec{H}_{(II)}$ в ней складывается из $\vec{E}_{\text{пад}}, \vec{H}_{\text{пад}}$ и поля, определяемого источниками на поверхностях S' и S_0'' :

$$\begin{aligned}\vec{E}_{(II)} &= \vec{E}_{\text{пад}} + \sum_{n=1}^N \left(c_n \vec{E}_{\text{комб}}^{(II)} + d_n \vec{E}'_{\text{комб}}^{(II)} \right) \Big|_{S'} + \\ &+ \sum_{m=1}^{N_0} \left(e_m \vec{E}_{\text{комб}}^{(II)} + f_m \vec{E}'_{\text{комб}}^{(II)} \right) \Big|_{S_0''}, \\ \vec{H}_{(II)} &= \vec{H}_{\text{пад}} + \sum_{n=1}^N \left(c_n \vec{H}_{\text{комб}}^{(II)} + d_n \vec{H}'_{\text{комб}}^{(II)} \right) \Big|_{S'} + \\ &+ \sum_{m=1}^{N_0} \left(e_m \vec{H}_{\text{комб}}^{(II)} + f_m \vec{H}'_{\text{комб}}^{(II)} \right) \Big|_{S_0''}.\end{aligned}$$

В третьей области поле $\vec{E}_{(III)}, \vec{H}_{(III)}$ определяется источниками на поверхности S_0' (рис. 2).

$$\begin{aligned}\vec{E}_{(III)} &= \sum_{m=1}^{N_0} \left(g_m \vec{E}_{\text{комб}}^{(III)} + h_m \vec{E}'_{\text{комб}}^{(III)} \right) \Big|_{S_0'}, \\ \vec{H}_{(III)} &= \sum_{m=1}^{N_0} \left(g_m \vec{H}_{\text{комб}}^{(III)} + h_m \vec{H}'_{\text{комб}}^{(III)} \right) \Big|_{S_0'}.\end{aligned}$$

Неизвестные комплексные амплитуды $a_n, b_n, c_n, d_n, e_m, f_m, g_m, h_m$ вспомогательных источников, общее количество которых составляет $4 \times (N + N_0)$, определяются из граничных условий для искомым полей. На поверхности S , как на проводнике, должны выполняться равенства нулю касательных составляющих полей $\vec{E}_{(I)}$ и $\vec{E}_{(II)}$:

$$\left(\vec{E}_{(I)} \cdot \vec{\tau} \right) \Big|_S = 0, \quad \left(\vec{E}_{(II)} \cdot \vec{\tau} \right) \Big|_S = 0.$$

На поверхностях окон σ_w , как на границе раздела двух диэлектрических сред (с одинаковыми параметрами), должны выполняться условия сшивания касательных составляющих полей $\vec{E}_{(I)}, \vec{E}_{(II)}$ и $\vec{H}_{(I)}, \vec{H}_{(II)}$:

$$\begin{aligned}\left(\vec{E}_{(I)} \cdot \vec{\tau} \right) \Big|_{\sigma_w} &= \left(\vec{E}_{(II)} \cdot \vec{\tau} \right) \Big|_{\sigma_w}, \\ \left(\vec{H}_{(I)} \cdot \vec{\tau} \right) \Big|_{\sigma_w} &= \left(\vec{H}_{(II)} \cdot \vec{\tau} \right) \Big|_{\sigma_w}.\end{aligned}$$

На поверхности S_0 должны выполняться условия сшивания касательных составляющих полей $\vec{E}_{(II)}, \vec{E}_{(III)}$ и $\vec{H}_{(II)}, \vec{H}_{(III)}$:

$$\begin{aligned}\left(\vec{E}_{(II)} \cdot \vec{\tau} \right) \Big|_{S_0} &= \left(\vec{E}_{(III)} \cdot \vec{\tau} \right) \Big|_{S_0}, \\ \left(\vec{H}_{(II)} \cdot \vec{\tau} \right) \Big|_{S_0} &= \left(\vec{H}_{(III)} \cdot \vec{\tau} \right) \Big|_{S_0}.\end{aligned}$$

Выполнение приведенных выше граничных условий требуется вдоль двух независимых касательных векторов $\vec{\tau}_1$ и $\vec{\tau}_2$ к соответствующим поверхностям. В результате относительно неизвестных

амплитуд получаем систему линейных алгебраических уравнений. После численного решения этой системы на компьютере (с использованием стандартной подпрограммы Math Kernel Library) определяются неизвестные поля во всех указанных областях.

Как отмечалось выше, особый интерес представляет изучение степени влияния поверхности земли на формирование резонансных полей. Будем считать, что поверхность земли является идеальным плоским проводником. Это дает право применить метод зеркальных отображений для описания отраженного поля. Согласно МВИ относительно земли строится зеркальное изображение S''' вспомогательной поверхности S'' (см. рис. 2). Амплитуды вспомогательных источников на поверхности S''' отличаются от соответствующих амплитуд источников на S'' лишь знаком. Другими словами, учет поверхности земли не приводит к изменению общего числа неизвестных амплитуд вспомогательных источников, определяемых из граничных условий.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

На основе описанного алгоритма применения МВИ создан пакет программ, позволяющий менять параметры изучаемой системы и моделировать различные ситуации облучения. В численных экспериментах антенна от мобильного телефона, мощностью 1 Вт, находилась внутри автомобиля, на расстоянии 2.5 см слева от головы человека. Расчеты проводились в окрестностях частот 450, 900 и 1800 МГц. Были выбраны следующие размеры однородной модели человека: высота 1.67 м, ширина плеч 46 см, диаметр головы 17.5 см. Средние значения вещественной и мнимой части комплексной диэлектрической проницаемости модели составляли соответственно 44 и 0.9. Размеры кузова автомобиля составляли $4.10 \times 1.76 \times 1.57$ м; дорожный просвет – 21 см. Исследования проводили как с учетом, так и без учета отражения от поверхности земли. Результаты показали, что без учета отражения амплитуда внутреннего поля оказывается меньше, что можно объяснить способностью излучаемой энергии распределяться по всем направлениям, включая и область под автомобилем. В приведенных ниже результатах отражение от поверхности земли учтено, что ближе к реальной ситуации.

Были исследованы поля внутри и снаружи автомобиля, характер возбужденных поверхностных токов на автомобиле, а также распределение точечного коэффициента уровня поглощаемой мощности SAR (specific absorption rate) внутри модели человека. Большая величина диэлектрической проницаемости человеческого тела спо-

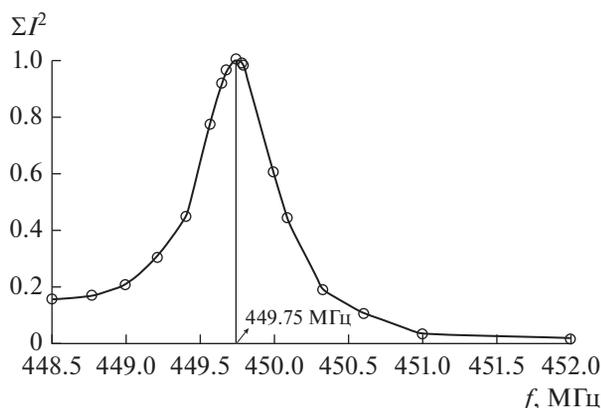


Рис. 3. Нормированная частотная характеристика суммы квадратов поверхностных токов в окрестности частоты 450 МГц.

способствует интенсивному замыканию силовых линий и формированию внутреннего поля высокой амплитуды, что приводит к нагреву тканей вследствие высокой проводимости тела.

Были построены зависимости от частоты суммы квадратов токов, определяющих поле внутри автомобиля. Эти частотные характеристики демонстрируют в окрестности изучаемых частот наличие ярко выраженных максимумов, что соответствует явлению резонанса. Очевидно, что малые изменения параметров системы (например, формы кузова автомобиля) приведут к некоторому смещению найденных резонансных частот. Однако значения SAR и амплитуд поля при резонансе, будут того же порядка.

Отдельно изучали ситуации, когда источником падающего поля служит внешняя антенна от базовой станции, мощностью 80 Вт, которая расположена на расстоянии 20 м от автомобиля и на

высоте 15 м от земли. В этом случае амплитуда внутреннего поля оказалась на два порядка меньше, что можно объяснить низкими значениями поля антенны даже на таком расстоянии.

Точность проводимых расчетов определяется среднеквадратическим отклонением от выполнения граничных условий между точками коллокаций. Хотя в самих точках коллокаций эти условия выполняются с достаточно высокой точностью (порядка 10^{-16}), в промежутках между ними наблюдается отклонение, достигающее максимума, как правило, в срединных точках. Изменением значений вспомогательных параметров (числа точек коллокаций и удаления вспомогательных поверхностей) эту погрешность удается регулировать [14, 18]. Погрешность приведенных ниже численных результатов не превосходит 10%.

1.1. Результаты расчетов в окрестности частоты 450 МГц

На рис. 3 приведена частотная характеристика нормированной на максимум суммы квадратов токов, возбужденных на внутренней поверхности автомобиля вблизи частоты 450 МГц, соответствующей рабочему диапазону полицейских раций. При указанных выше параметрах системы резонанс наблюдается на частоте 449.8 МГц. Очевидно, в более широком диапазоне существуют и другие резонансы. На рис. 4а и 4б приведены распределения поля в продольном сечении и соответствующее распределение точечного SAR на указанной резонансной частоте. По сравнению с аналогичными распределениями, представленными на рис. 5а и 5б для нерезонансной частоты (451 МГц, см. рис. 3), значения амплитуды поля возрастают на порядок, а значения SAR увеличиваются в пять раз.

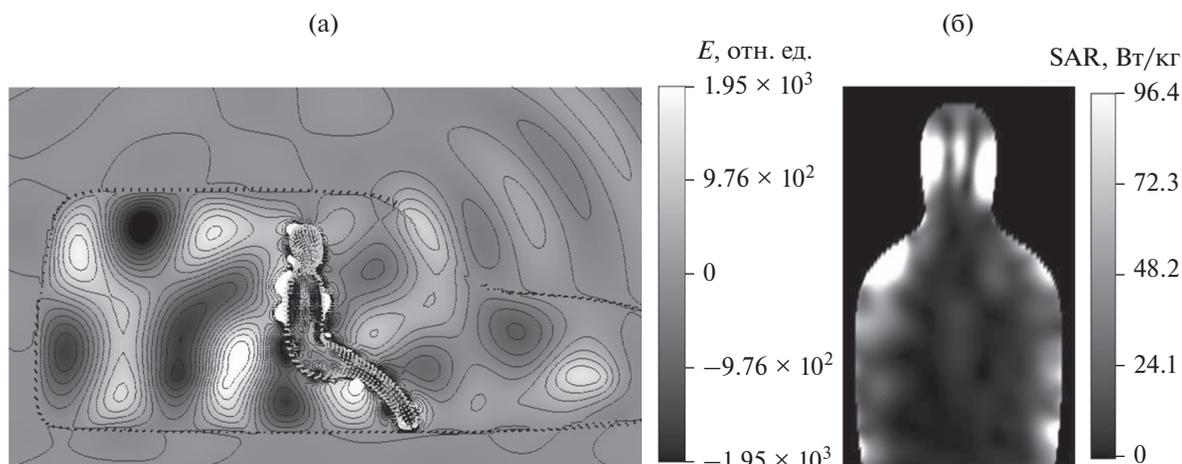


Рис. 4. Распределение ближнего поля (а) и распределение точечного SAR внутри человека (б) на резонансной частоте.

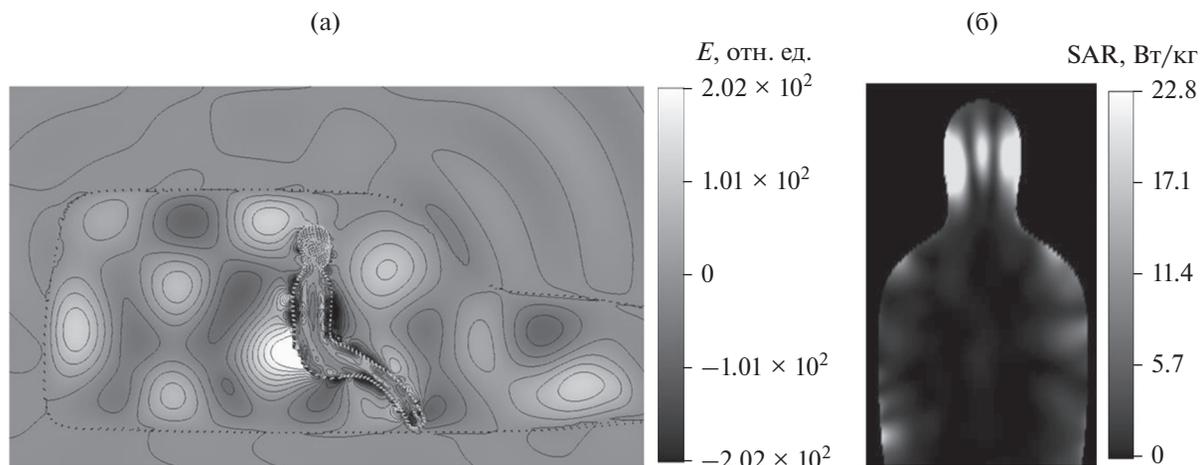


Рис. 5. Распределение ближнего поля (а) и распределение точечного SAR внутри человека (б) вне резонанса.

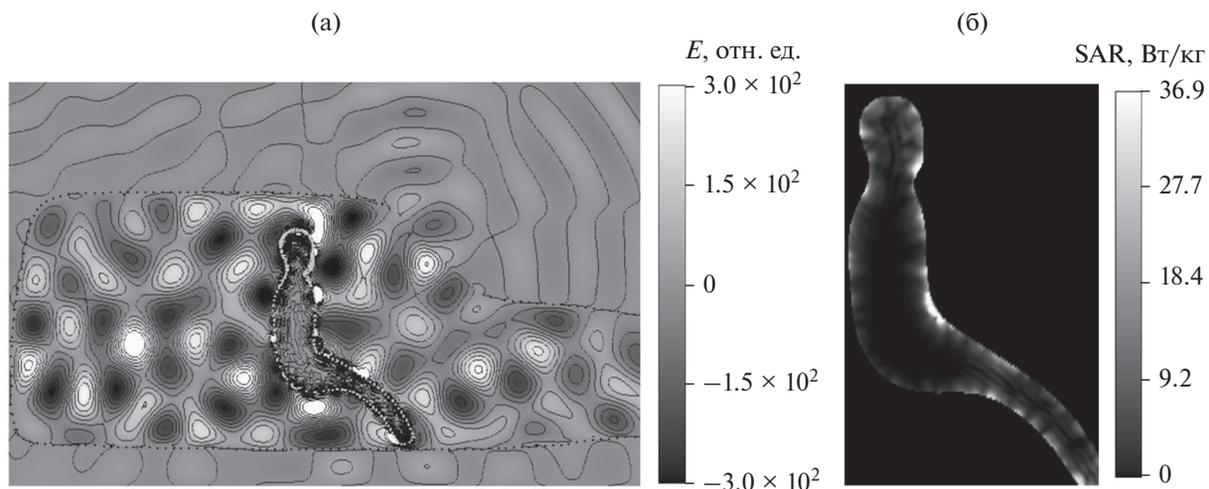


Рис. 6. Распределение ближнего поля (а) и распределение точечного SAR внутри человека (б) на частоте 900 МГц.

1.2. Результаты расчетов
в окрестности частоты 900 МГц

На рис. 6а и 6б приведены распределения внутреннего поля и SAR для частоты 900 МГц. Как видно, поле проникает в тело человека на меньшую глубину и увеличению SAR подвергается лишь поверхностный слой. В окрестности частоты 900 МГц также построена частотная характеристика нормированной на максимум суммы квадратов токов (рис. 7), демонстрирующая наличие резонанса на частоте 899.9 МГц. Исследования показали, что на резонансной частоте значения амплитуд поля и SAR возрастают на порядок по сравнению с частотой, равной 900 МГц (рис. 8а и 8б).

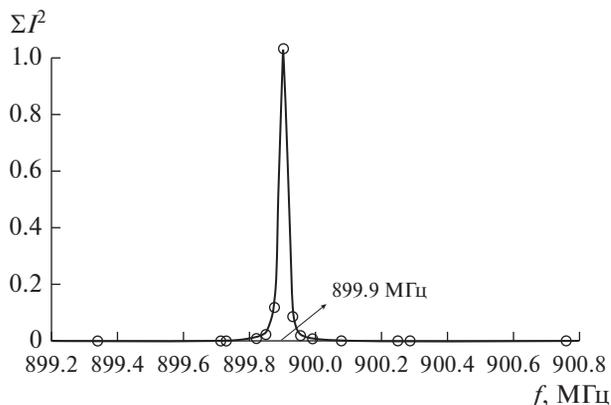


Рис. 7. Нормированная частотная характеристика суммы квадратов поверхностных токов в окрестности частоты 900 МГц.

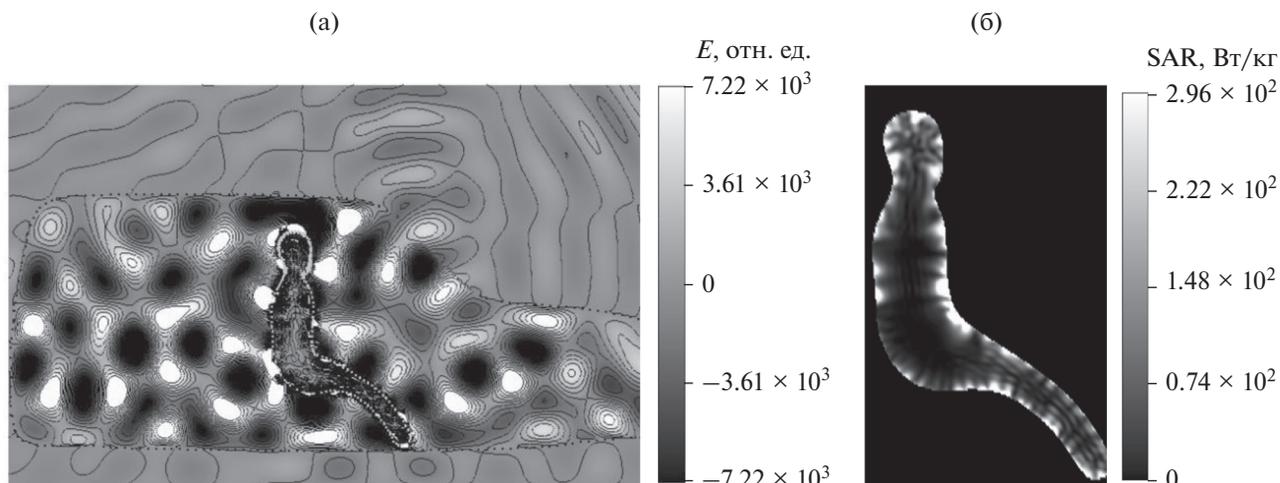


Рис. 8. Распределение ближнего поля (а) и распределение точечного SAR внутри человека (б) на резонансной частоте.

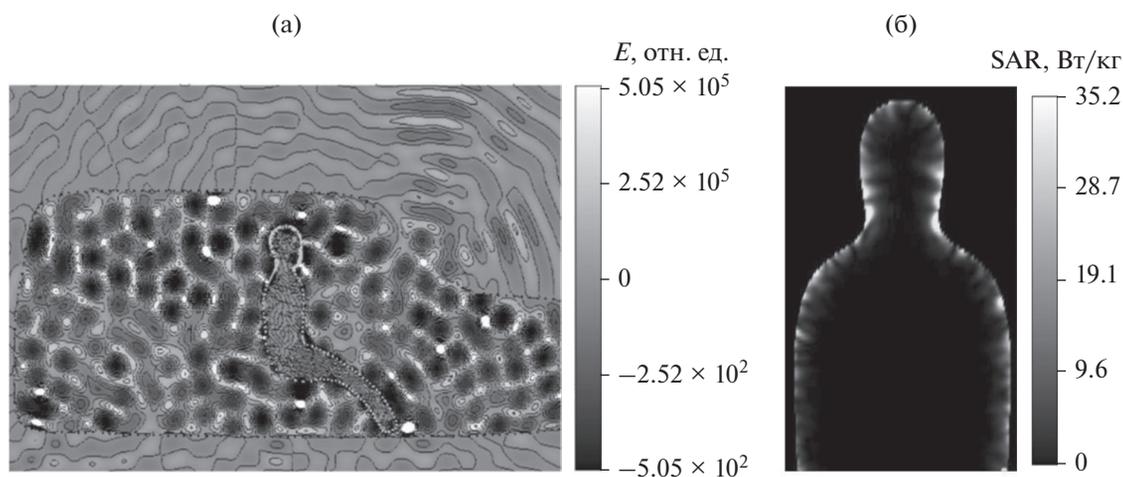


Рис. 9. Распределение ближнего поля (а) и распределение точечного SAR внутри человека (б) на частоте 1800 МГц.

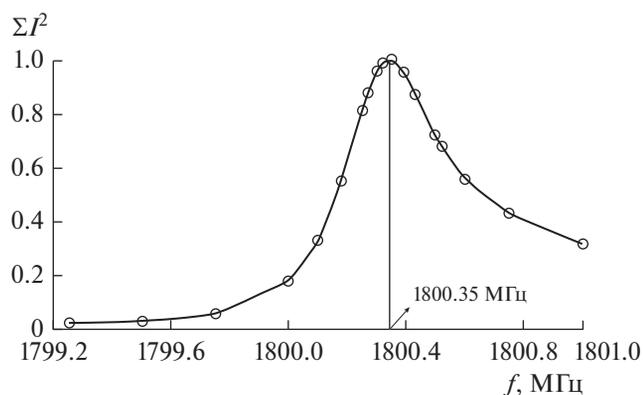


Рис. 10. Нормированная частотная характеристика суммы квадратов поверхностных токов в окрестности частоты 1800 МГц.

1.3. Результаты расчетов в окрестности частоты 1800 МГц

На рис. 9а и 9б приведены распределения ближнего поля и SAR на частоте 1800 МГц. В связи с высокими потерями глубина проникновения поля в тело человека оказывается меньше, чем в предыдущих случаях. На такой частоте поглощение электромагнитной энергии в основном будет происходить в коже. Частотная характеристика нормированной суммы квадратов токов, построенная в узком диапазоне вблизи рассматриваемой частоты, также демонстрирует наличие резонанса (рис. 10). Построенные распределения внутреннего поля и SAR (рис. 11а и 11б) показывают, что на резонансной частоте их значения возрастают соответственно в восемь и в четыре раза.

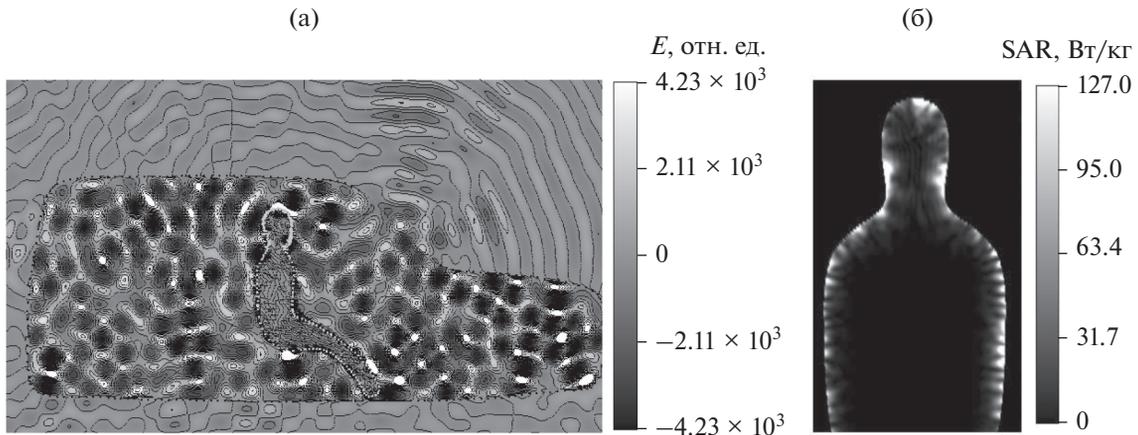


Рис. 11. Распределение ближнего поля (а) и распределение точечного SAR внутри человека (б) на резонансной частоте.

Для более наглядного представления влияния поверхности автомобиля как резонатора, было проведено сравнение значений точечного SAR для двух случаев: человек находится внутри автомобиля или в свободном пространстве. На рис. 12 приведена диаграмма сравнений значений SAR в окрестности трех изучаемых частот. Наивысшие значения соответствуют случаю, когда человек внутри автомобиля подвергается облучению при найденных резонансных частотах, средние значения соответствуют аналогичному случаю вне резонансных частот, наименьшие значения соответствуют случаю свободного пространства. Отсюда можно заключить, какое негативное влияние способна оказать резонансная поверхность автомобиля на находящегося внутри человека. Было проведено сравнение полученных результатов с аналогичными результатами работы [12], в которой изучалось влияние резонансных полей на человека, находящегося внутри помещения. Результаты такого сравнения представлены на рис. 13 в виде диаграммы значений SAR. Как видим, для частот 450 и 900 МГц значения SAR в случае автомобиля выше. Это можно объяснить тем, что поверхность автомобиля менее прозрачна, чем стены помещения (прозрачность которых в данном случае составляла 0.22), а длина волны соответствует размерам окон. В результате оказывается, что значения амплитуд резонансного поля и, соответственно, SAR внутри автомобиля выше. На частоте 1800 МГц значения SAR внутри автомобиля оказываются меньше, чем внутри комнаты. Это можно объяснить тем, что окна автомобиля на этой частоте оказываются более прозрачными (длина волны меньше их размеров), что препятствует формированию внутреннего поля высокой амплитуды.

Некоторые из приведенных в данной работе результатов (например, найденные точные значения резонансных частот) могут меняться в зави-

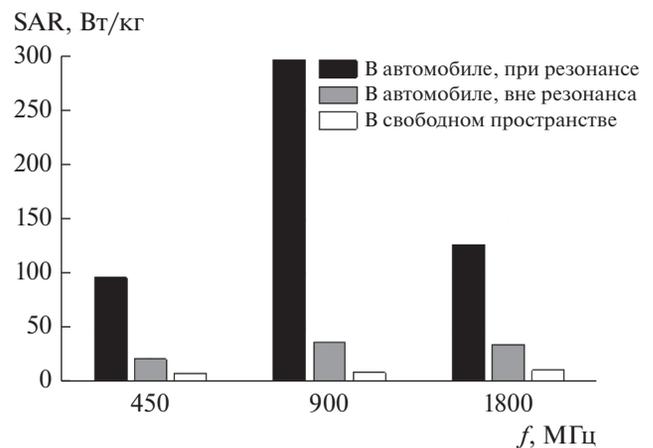


Рис. 12. Диаграмма сравнения значений SAR для человека внутри автомобиля и в свободном пространстве.

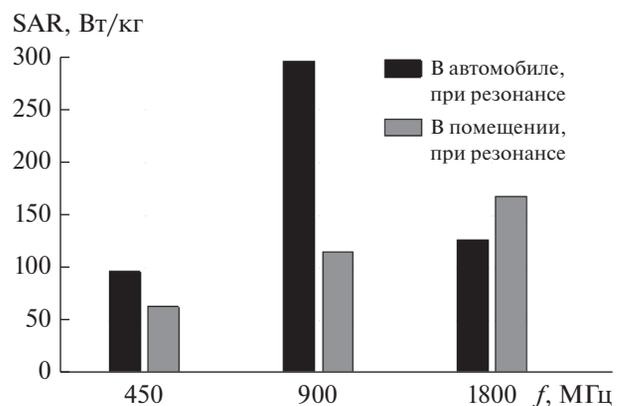


Рис. 13. Диаграмма сравнения значений SAR для человека внутри автомобиля и внутри помещения.

симости от формы, размеров автомобиля и других его характеристик. Очевидно, что при более высокой добротности автомобиля как резонатора значения амплитуд поля и SAR также увеличатся [12]. Поэтому необходимо сокращать до минимума продолжительность разговоров по мобильному телефону внутри автомобиля, поскольку это уменьшит риск возможного негативного влияния внутреннего резонансного поля на человека.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Метод вспомогательных источников был применен для исследования влияния электромагнитного поля антенны мобильного телефона на человека внутри автомобиля. В расчетах было учтено влияние отражающих поверхности земли под автомобилем. Результаты показали, что наличие внутри автомобиля реактивных полей высокой амплитуды способно привести к многократному увеличению значений коэффициента SAR в тканях человека по сравнению со значениями, полученными в свободном пространстве. Рекомендуется сокращать продолжительность разговоров по мобильному телефону внутри автомобиля.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Грузинского национального фонда имени Ш. Руставели (грант № YS15-2.12-56).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Lin J.C.* Electromagnetic Fields in Biological Systems. L.: CRC Press, 2011.
2. *Furse C., Christensen D.A., Durney C.H.* Basic Introduction to Bioelectromagnetics. L.: CRC Press, 2009.
3. *Faruque M.R.I.* // Frequenz. J. RF-Eng. and Telecommun. 2012. V. 66. № 3–4. P. 79.
4. *Keshvari J., Kivento M.* // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2013. V. 44. P. 012017.
5. *Faruque M.R.I., Islam M.T., Misran N.* // Appl. Computational Electromagnetic Soc. J. 2010. V. 25. № 12. P. 1097.
6. *Wiat J., Dale C., Bosisio A.V., Le Cornec A.* // IEEE Trans. 2000. V. EMC-42. № 4. P. 376.
7. *Krogerus J., Toivanen J., Icheln C., Vainikainen P.* // IEEE Trans. 2007. V. IM-56. № 6. P. 2375.
8. *Faruque M.R.I., Islam M.T., Misran N.* // Inform. MIDEEM. J. Microelectronics, Electronic Components and Materials. 2010. V. 40. № 3. P. 232.
9. *Iqbal-Faruque M.R., Aisyah-Husni N., Iqbal-Hossain Md. et al.* // J. Appl. Research and Technol. 2014. V. 12. № 5. P. 871.
10. *Iqbal Hossain Md., Iqbal Faruque M.R., Tariqul Islam M.* // J. Appl. Research and Technol. 2015. V. 13. № 4. P. 447.
11. *Jeladze V., Tsverava M., Nozadze T. et al.* // Proc. XXI Int. Seminar/Workshop on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory (DIPED-2016). Tbilisi. 26–29 Sep. 2016. N.Y.: IEEE, 2016. P. 9.
12. *Джеладзе В.Б., Пришвин М.М., Табатадзе В.А. и др.* // РЭ. 2017. Т. 62. № 3. С. 199.
13. *Jeladze V., Tabatadze V., Prishvin M. et al.* // J. Appl. Electromagnetism (JAE). 2016. V. 18. № 1. P. 1.
14. *Петоев И.М., Табатадзе В.А., Какулия Д.Г., Заридзе П.С.* // РЭ. 2015. Т. 60. № 4. С. 333.
15. *Anzaldi G., Silv F., Fernández M. et al.* // IEEE Trans. 2007. V. BioEng-54. № 5. P. 921.
16. *Dhami A.* // Int. J. Environment Research. 2015. V. 9. № 3. P. 977.
17. *Никольский В.В.* Электродинамика и распространение радиоволн. М.: Наука, 1978. С. 221.
18. *Петоев И.М., Табатадзе В.А., Заридзе П.С.* // РЭ. 2013. № 5. С. 451.
19. *Zaridze R., Kakulia D., Petoev I., Tabatadze V.* // Book of Abstracts III Annual Meeting of the Georgian Mechanical Union. Tbilisi. 19–21 Dec. 2012. Tbilisi: Univ. Press, 2012. P. 35.