

УДК 621.317.4

## ПРОСТРАНСТВЕННО-СПЕКТРАЛЬНОЕ ОПИСАНИЕ ТОКОВОГО ДИПОЛЯ КАК ИСТОЧНИКА МАГНИТНОГО ПОЛЯ СЕРДЦА

© Н. В. Голышев<sup>1</sup>, С. В. Моторин<sup>1,2</sup>, Д. Н. Голышев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Сибирский государственный университет водного транспорта,  
630099, г. Новосибирск, ул. Щетинкина, 33

<sup>2</sup>Новосибирский государственный технический университет,  
630073, г. Новосибирск, просп. К. Маркса, 20  
E-mail: s.motorin@nsawt.ru

В реальных условиях экспериментатор работает с входными сверхпроводниковыми преобразователями, конструкция которых в биомагнитных системах зависит от условий исследований, наличия магнитной экранировки, имеющегося криогенного обеспечения, требуемой чувствительности к индукции магнитного поля, технологических возможностей разработчиков. Сравнить результаты исследований, полученных для разных биомагнитных систем, невозможно. Рассмотрены вопросы описания источника магнитного поля сердца на основе пространственно-частотных преобразований 2D-модели токового диполя. Исследовались: глубина залегания, местоположение и ориентация токового диполя на значение индукции магнитного поля и её спектр по пространству сетки измерения магнитного поля сердца.

*Ключевые слова:* пространственно-спектральное описание, токовый диполь, сердце, биомагнитные исследования.

DOI: 10.15372/AUT20230304

**Введение.** История биомагнитных исследований [1–7] на основе сверхпроводниковых магнитометрических систем (СМС) насчитывает более 50 лет, однако их широкого внедрения в клиническую практику нет. В то же время сомневаться в актуальности и возможностях СМС не приходится [1–6].

Одна из проблем — создание универсальной базы результатов таких исследований, например аналога кардиографических атласов. Однако и сегодня собранный экспериментаторами достаточно обширный материал невозможно применять. Необходимо сопоставлять результаты, полученные с использованием разнообразных по своей конструкции входных сверхпроводниковых преобразователей (ВСП). Для решения данной проблемы нужен подход, учитывающий совокупность пространственной структуры ВСП, источника магнитного поля, их взаимного положения и ориентации.

В медицине в результате решения обратной задачи проводится диагностика состояния изучаемого биологического объекта. Здесь нахождение координат источника — только одна из задач. Классика кардиологии — морфологический анализ [4] в сочетании с изомагнитными картами — и сегодня имеет большое значение [1–3]. Это связано с большой чувствительностью магнитокардиографии (МКГ) и отсутствием маскирования поверхностными, вторичными токами.

В [1] приводятся данные о системах, созданных разными производителями, и программном обеспечении для них. Однако и диагностические критерии здесь наработаны для конкретных систем (связка пространственной структуры ВСП—сердце). Возникает вопрос, как учитывать опыт других исследователей? Более того, по сути отсутствует единая точка отсчёта. В нашем случае — это некая условная плоскость построения изомагнитной карты с использованием ВСП-магнитометрического типа, т. е. создание единого метрологического подхода для обеспечения медицинской диагностики.

Кроме того, поскольку ВСП для клинических исследований (а не для исследовательских задач) имеет сложную структуру, то неясны требования к его конструкции с точки зрения фильтрующих свойств по отношению к источнику магнитного поля.

Возможный путь решения — это переход в спектральную область: осуществление необходимых преобразований структур с ВСП—сердце и возврат в образцовую пространственную с построением изомагнитных карт МКГ-сигнала на некую образцовую плоскость (задание удалённости плоскости от источника, типа, структуры ВСП).

В работах [8–10] был предложен способ на основе пространственно-спектральных преобразований моделей ВСП и источника магнитного поля. Выбор той или иной модели ВСП, определяемый характером решаемой задачи, становится с точки зрения сопоставления результатов не критичным [9, 10]. Однако и сегодня предложенный подход не нашёл широкого применения. Видимо, пространственно-временной метод не нашёл своего исследователя.

Цель предлагаемой работы — дать подробный вывод пространственно-спектрального описания токового диполя (ECD-equivalent current dipole) как источника магнитного поля сердца.

В результате в рамках предложенной пространственно-спектральной модели источника магнитного поля и пространственного спектра выходного сигнала измерительного канала биомангнитной системы можно осуществить преобразование любой структуры ВСП и создать основу для образцовых диагностических критериев, устранить зависимость результатов исследований от анатомических особенностей строения тела человека.

**Метод решения.** В биомангнитных, МКГ-исследованиях обычно измеряется компонента магнитного поля  $b_z$ , нормальная к поверхности раздела сред, которая не зависит от объёмных токов и определяется лишь первичными «клеточными» токами. В этом смысле для неё среда (тело) является прозрачной, т. е. измеренное магнитное поле не будет зависеть от неоднородностей среды.

Рассмотрим компоненту  $b_z$  2D-модели ECD, перпендикулярную некоторой плоскости  $(x, y)$  на рис. 1. При этом будем считать, что источник в виде ECD расположен в точке с

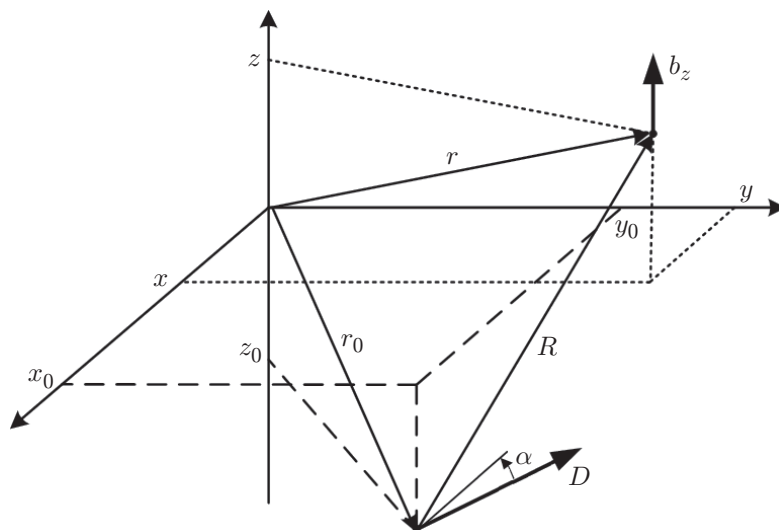


Рис. 1. Взаимное расположение точки ECD  $(x_0, y_0, z_0)$  и точки измерения компоненты магнитной индукции  $b_z(x, y, z)$ . Здесь  $D$  — дипольный момент,  $\alpha$  — угол ориентации в плоскости  $xOy$

координатами  $(x_0, y_0, z_0)$ , тогда имеем [6, 8–10]

$$b_z(x, y, z) = \frac{\mu\mu_0}{4\pi}(D_x R_y - D_y R_x) = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{D_x(y - y_0) - D_y(x - x_0)}{[(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2]^{3/2}}. \quad (1)$$

Вначале рассмотрим все преобразования на основе 1D-модели ECD. Есть компонента, например  $D_x \neq 0$ , а  $D_y = D \sin(\alpha) = 0$ . Тогда для  $b_z$  (далее —  $b_1$ ) будем иметь

$$b_1(x, y, z) = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{D_x(y - y_0)}{[(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2]^{3/2}}. \quad (2)$$

Для получения пространственного спектра 1D-модели ECD используем двумерное преобразование Фурье. Выражение (2) по координатам  $x$  и  $y$  имеет вид

$$\begin{aligned} B_1(\omega_x, \omega_y, z) &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} b_1(x, y, z) e^{-j\omega_x x} e^{-j\omega_y y} dx dy = \\ &= \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{D_x(y - y_0) e^{-j\omega_x x} e^{-j\omega_y y}}{[(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2]^{3/2}} dx dy, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $\omega_x, \omega_y$  представляют собой круговые пространственные частоты по координатам  $x$  и  $y$ .

Для упрощения выражения (3) введём следующие обозначения:  $u = x - x_0, \nu = y - y_0, q = z - z_0$ . Тогда выражение (3) запишем в виде

$$B_1(\omega_x, \omega_y, z) = \frac{\mu\mu_0 D_x}{4\pi} e^{-j\omega_x x_0} e^{-j\omega_y y_0} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\nu e^{-j\omega_x u} e^{-j\omega_y \nu}}{[u^2 + \nu^2 + q^2]^{3/2}} du d\nu. \quad (4)$$

Упрощённый подробный вывод выражения (4) приведён в приложении. Выражение для двумерного преобразования Фурье 1D-модели ECD по координатам  $x$  и  $y$  окончательно примет вид

$$B_1(\omega_x, \omega_y, z) = -j \frac{\mu\mu_0}{2} \frac{D_x \omega_y}{\sqrt{\omega_x^2 + \omega_y^2}} e^{-(z-z_0)\sqrt{\omega_x^2 + \omega_y^2}} e^{-j\omega_x x_0} e^{-j\omega_y y_0}, \quad (5)$$

где учтено, что в используемой системе координат  $z - z_0 > 0$ .

Сравнив выражения (1), (2), (5), видим, что для 2D-модели ECD можно получить уравнение

$$B(\omega_x, \omega_y, z) = -j \frac{\mu\mu_0}{2} \frac{D_x \omega_y - D_y \omega_x}{\sqrt{\omega_x^2 + \omega_y^2}} e^{-(z-z_0)\sqrt{\omega_x^2 + \omega_y^2}} e^{-j\omega_x x_0} e^{-j\omega_y y_0}. \quad (6)$$

Исследуем выражение (4) для случаев  $\omega_x = 0$  и  $\omega_y = 0$ , т. е. найдём значение  $B(0, 0, z)$ . Осуществив соответствующую подстановку, будем иметь

$$B_1(0, 0, z) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} b_1(x, y, z) dx dy = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{D_x \nu}{[u^2 + \nu^2 + q^2]^{3/2}} du d\nu =$$

$$= \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \int_{-\infty}^{\infty} D_x du \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\nu}{[u^2 + \nu^2 + q^2]^{3/2}} d\nu. \quad (7)$$

Во внутреннем интеграле выражения (7) подынтегральная функция нечётная, следовательно, в симметричных пределах интеграл от неё равен нулю, т. е.  $B_1(0, 0, z) = 0$ . Сравнивая выражения (1), (2), очевидно, что для 2D-модели ECD аналогично  $B(0, 0, z) = 0$ .

В заключение запишем выражение для двумерной пространственно-спектральной плотности (ПСП) проекции на ось  $z$  вектора магнитной индукции ECD:

$$B(\omega_x, \omega_y, z) = \begin{cases} 0, & \omega_x = 0, \omega_y = 0; \\ -j \frac{\mu\mu_0}{2} \frac{D_x \omega_y - D_y \omega_x}{\sqrt{\omega_x^2 + \omega_y^2}} e^{-(z-z_0)\sqrt{\omega_x^2 + \omega_y^2}} e^{-j\omega_x x_0} e^{-j\omega_y y_0}, & \omega_x \neq 0, \omega_y \neq 0, \end{cases} \quad (8)$$

или иначе

$$B(\omega_x, \omega_y, z) = \begin{cases} 0, & \omega_x = 0, \omega_y = 0; \\ D[\cos(\alpha)\omega_y - \sin(\alpha)\omega_x] \Psi(\omega_x, \omega_y, z), & \omega_x \neq 0, \omega_y \neq 0, \end{cases} \quad (9)$$

$$\Psi(\omega_x, \omega_y, z) = -j \frac{\mu\mu_0}{2} \frac{e^{-(z-z_0)\sqrt{\omega_x^2 + \omega_y^2}}}{\sqrt{\omega_x^2 + \omega_y^2}} e^{-j\omega_x x_0} e^{-j\omega_y y_0},$$

где  $\Psi(\omega_x, \omega_y, z)$  — некоторая функция.

Проведём анализ полученных выражений с точки зрения влияния параметров ECD (глубины залегания, местоположения и ориентации) на его пространственные и пространственно-спектральные характеристики. При проведении МКГ-исследований для анализа приняты следующие допущения:

— местоположение ECD определяется размерами сердца, которые равны  $6 \times 6 \times 12$  см [6–9];

— предполагаемый диапазон глубин залегания ECD, исходя из расположения сердца относительно поверхности грудной клетки, составляет порядка  $z_0 = -3 \dots -8$  см [6–9, 11];

— дипольный момент токового диполя  $D = 5 \cdot 10^{-5}$  А · м. Такое значение  $D$  при средней глубине ECD (около 4–5 см) создаёт магнитную индукцию порядка  $70\text{--}100 \cdot 10^{-12}$  Тл.

### Результаты исследований.

*Глубина залегания ECD.* Результаты расчёта по формуле (2) проекции на ось  $z$  вектора магнитной индукции, создаваемого ECD (здесь и далее предполагается, что он находится в воздухе, т. е.  $\mu = 1$ ) с дипольным моментом  $D = D_x$ , по координате  $y$  от глубины его залегания приведены на рис. 2. Как правило, ECD находится в центре измерительной сетки МКГ-сигнала размером  $16 \times 16$  см.

В качестве точки наблюдения по оси  $x$  выбрана точка, расположенная над ECD, т. е.  $x = x_0$ , где  $x_0 = 0$  — центр системы по  $x$ . Диапазон изменения по координате  $y$  выбран исходя из размеров измерительной сетки МКГ-сигнала. Принятые глубины залегания ECD соответствуют минимальной, средней и максимальной величинам, определяющимся типовыми размерами сердца.

Для вышеперечисленных глубин залегания ECD на рис. 3. приведены сечения зависимости модуля ПСП проекции на ось  $z$  вектора магнитной индукции, создаваемого ECD

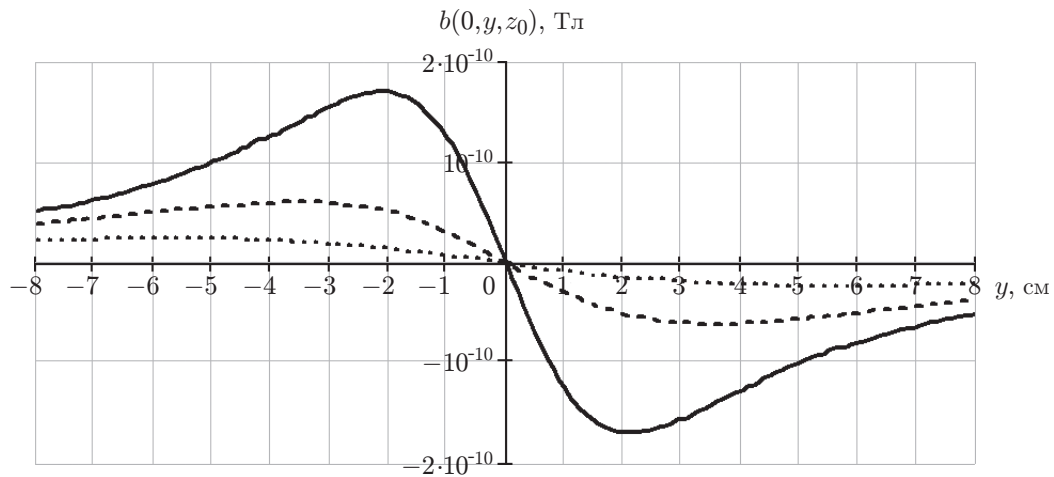


Рис. 2. Изменение проекции на ось  $z$  вектора магнитной индукции ECD по координате  $y$  для трёх глубин залегания (сплошная линия соответствует глубине залегания ECD  $z_0 = -3$  см, штриховая —  $z_0 = -5$  см, а точечная —  $z_0 = -8$  см)

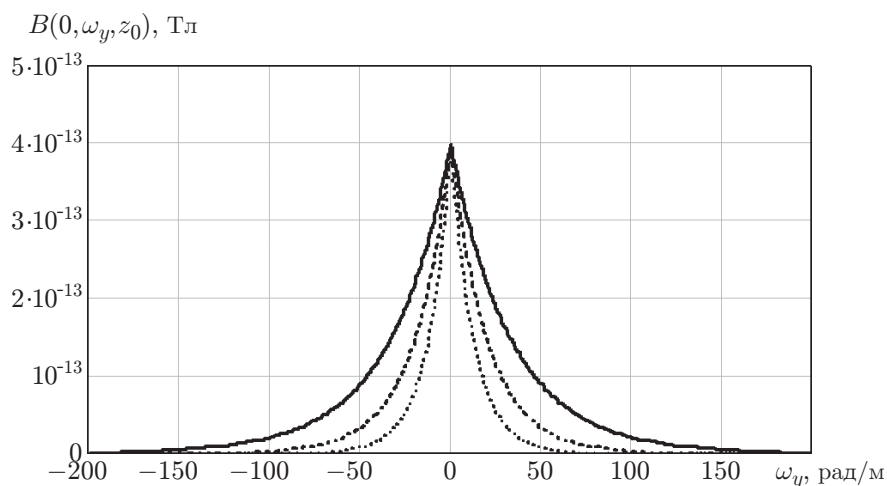


Рис. 3. Изменение проекции на ось  $z$  модуля вектора магнитной индукции ПСП ECD по пространственной частоте  $\omega_y$  для трёх глубин залегания

(с теми же координатами и дипольным моментом), по пространственной частоте  $\omega_y$  (для случая  $\omega_x = 0$  рад/см), рассчитанные по формуле (9).

Из сравнения рис. 1 и 2 видно, что при уменьшении глубины залегания ECD относительно плоскости измерения зависимость магнитной индукции в пространственной области спадает быстрее, а пространственный спектр соответственно становится шире.

**Местоположение ECD.** На рис. 4 в соответствии с принятыми допущениями о размерах сердца изображены три возможных местоположения ECD в его пределах: сплошная линия — ECD в центре; штриховая линия — ECD справа от центра на 3 см; точечная линия — ECD слева от центра на 3 см. Глубина залегания ECD на рис. 3 равна  $z_0 = -5$  см. Дипольный момент ECD тот же:  $D = D_x$ .

Согласно свойствам преобразования Фурье данные сдвиги не влияют на  $2D$ -модуль ПСП проекции на ось  $z$  вектора магнитной индукции, создаваемого ECD.

**Ориентация ECD.** На рис. 5, *a*, *b* приведены изомагнитные карты проекции на ось  $z$  вектора магнитной индукции, создаваемого ECD, с дипольным моментом  $D = 5 \cdot 10^{-5}$  А · м

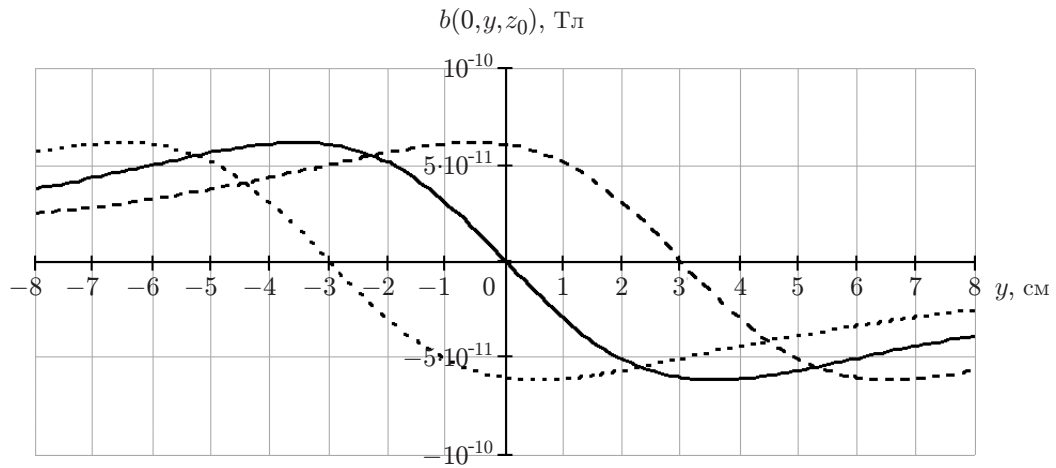


Рис. 4. Изменение проекции на ось  $z$  модуля вектора магнитной индукции ECD по координате  $y$  при его различном местоположении в пределах сердца

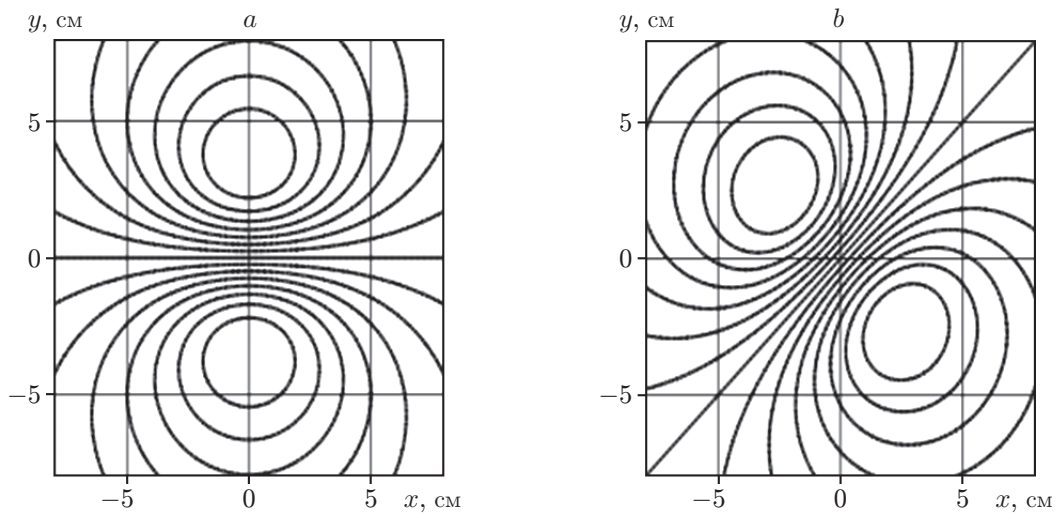


Рис. 5. Изомагнитные карты проекции на ось  $z$  вектора магнитной индукции ECD при различной его ориентации: для угла  $d = 0$  (a) и угла  $d = \pi/4$  (b)

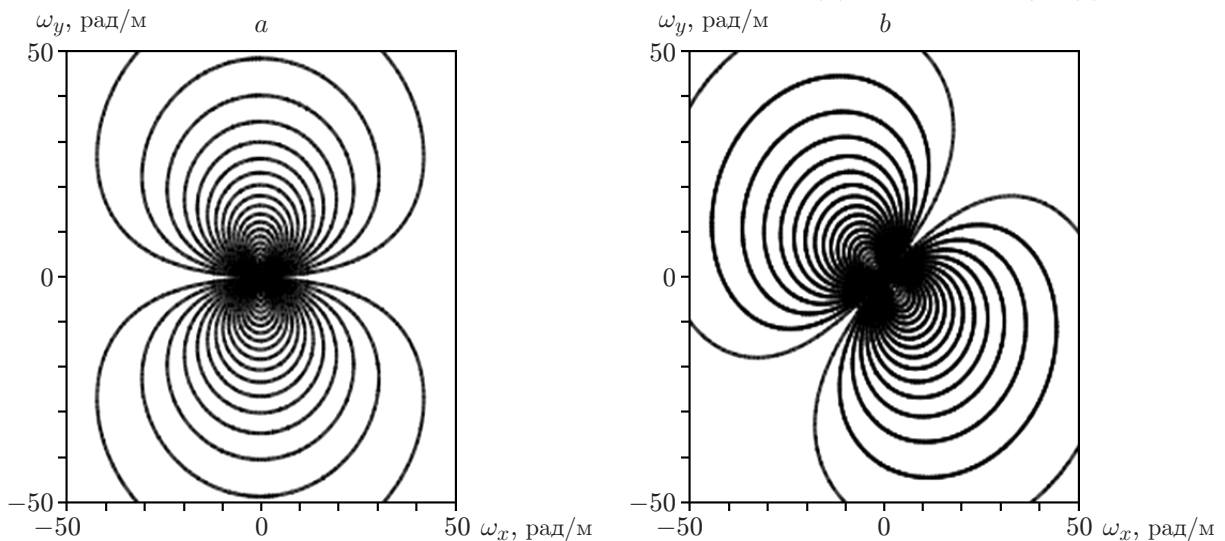


Рис. 6. Изомагнитные карты проекции на ось  $z$  вектора модуля магнитной индукции ПСП ECD при различной его ориентации:  $\alpha = 0$  (a) и угла  $\alpha = \pi/4$  (b)

при двух значениях угла:  $\alpha = 0$  и  $\alpha = \pi/4$ .

Видно, что закон распределения магнитной индукции по пространственным координатам  $x$  и  $y$  имеет разный характер: в первом случае есть только компонента  $D_x$ , во втором случае обе компоненты равны  $D_x = D_y$ . При  $\alpha = \pi/2$  произойдёт поворот изомагнитной карты, изображённой на рис. 5, а, на  $90^\circ$  (характер распределения магнитной индукции по пространственным координатам  $x$  и  $y$  поменяется местами).

Влияние ориентации ЕСД на его пространственно-спектральные характеристики иллюстрирует рис. 6. Здесь приведены изомагнитные карты модуля магнитной индукции, создаваемого ЕСД, с интенсивностью  $D = 5 \cdot 10^{-5}$  А·м.

**Заключение.** Результаты моделирования показывают существенную роль анализа ПСП для ЕСД как источника магнитного поля, так как позволяют при аналогичном анализе ВСП предъявлять требования к его конструкции с точки зрения глубины залегания ЕСД, а следовательно, к ширине его спектральной плотности.

Предложенный подход позволяет не только оптимизировать и согласовать параметры пространственной структуры ВСП—сердце, но и проводить пространственную фильтрацию при локализации источников аномального типа, планировать исследования по регистрации магнитных полей для решения задачи локализации источников, создаётся основа для проведения сопоставления результатов исследований, полученных для разных пространственных структур ВСП—сердце. В частности, уйти от учёта анатомических особенностей и качественной аргументации типа астеник—нормостеник—гиперстеник и привязки к анатомическим точкам.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

Для получения выражения двумерного преобразования Фурье 1D-модели ЕСД по координатам  $x$  и  $y$  проведём ряд преобразований выражения (4), в котором рассмотрим интеграл в целях его максимального упрощения. Преобразуем его в повторный. В результате получим

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\nu e^{-j\omega_x u} e^{-j\omega_y \nu}}{[u^2 + \nu^2 + q^2]^{3/2}} du d\nu = \int_{-\infty}^{\infty} e^{-j\omega_x u} du \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\nu e^{-j\omega_y \nu}}{[u^2 + \nu^2 + q^2]^{3/2}} d\nu. \quad (4,1)$$

Внутренний интеграл в выражении (4,1) можно преобразовать к следующему виду:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{\nu e^{-j\omega_y \nu}}{[u^2 + \nu^2 + q^2]^{3/2}} d\nu = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\nu \cos(\omega_y \nu)}{[u^2 + \nu^2 + q^2]^{3/2}} d\nu - j \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\nu \sin(\omega_y \nu)}{[u^2 + \nu^2 + q^2]^{3/2}} d\nu.$$

В разложении первый интеграл равен нулю ( $\nu \cos(\omega_y \nu)$  — нечётная функция). Тогда, так как  $\nu \sin(\omega_y \nu)$  — чётная функция, имеем

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{\nu e^{-j\omega_y \nu}}{[u^2 + \nu^2 + q^2]^{3/2}} d\nu = -2j \int_0^{\infty} \frac{\nu \sin(\omega_y \nu)}{[u^2 + \nu^2 + q^2]^{3/2}} d\nu. \quad (4,2)$$

Для интеграла в выражении (4,2) воспользуемся табличными решениями [12]:

$$\int_0^{\infty} \frac{x \sin(bx)}{[x^2 + \lambda^2]^{3/2}} dx = \frac{\sqrt{\pi}}{\Gamma(\rho)} \left(\frac{2}{b}\right)^{1/2-\rho} \lambda^{3/2-\rho} K_{3/2-\rho}(b\lambda), \quad (4,3)$$

при условии  $b > 0$ ,  $\operatorname{Re} \lambda > 0$ ,  $\operatorname{Re} \rho > 0$ . Здесь имеем следующие обозначения:  $x = \nu$ ,  $b = \omega_y$ ,  $\lambda^2 = u^2 + q^2$ ,  $\rho = 3/2$ ,  $\Gamma(x) = \Gamma(\rho)$  — гамма-функция,  $K_n(x) = K_{3/2-\rho}(b\lambda)$  — модифицированная функция Бесселя второго рода (функция Макдональда)  $n$ -порядка [13].

С учётом ограничений, накладываемых на выражение (4,3), интеграл (4,2) равен

$$-2j \int_0^{\infty} \frac{\nu \sin(\omega_y \nu)}{[u^2 + \nu^2 + q^2]^{3/2}} d\nu = -2j \frac{\sqrt{\pi}}{\Gamma(3/2)} \left(\frac{2}{\omega_y}\right)^{-1} (u^2 + q^2)^0 K_0(|\omega_y| \sqrt{u^2 + q^2}). \quad (4,4)$$

В выражении (4,4)  $|\omega_y|$  используется только под знаком функции  $K_0(x)$ , так как аргумент должен быть положительным. Значение гамма-функции  $\Gamma(3/2)$  можно вычислить согласно [12] по следующей формуле:  $\Gamma(n + 1/2) = (\sqrt{\pi}/2^n)(2n - 1)!$ . В результате имеем  $\Gamma(3/2) = \sqrt{\pi}/2$ . Тогда внутренний интеграл в выражении (4,1) примет вид

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{\nu e^{-j\omega_y \nu}}{[u^2 + \nu^2 + q^2]^{3/2}} d\nu = -2j\omega_y K_0(|\omega_y| \sqrt{u^2 + q^2}). \quad (4,5)$$

Возвращаясь к двойному интегралу выражения (4,1) с учётом (4,5) и рассуждений аналогичных (4,4), получим

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\nu e^{-j\omega_x u} e^{-j\omega_y \nu}}{[u^2 + \nu^2 + q^2]^{3/2}} dud\nu &= -2j\omega_y \int_{-\infty}^{\infty} K_0(|\omega_y| \sqrt{u^2 + q^2}) e^{-j\omega_x u} du = \\ &= -2j\omega_y \left[ \int_{-\infty}^{\infty} K_0(|\omega_y| \sqrt{u^2 + q^2}) \cos(\omega_x u) du - j \int_{-\infty}^{\infty} K_0(|\omega_y| \sqrt{u^2 + q^2}) \sin(\omega_x u) du \right] = \\ &= -4j\omega_y \int_0^{\infty} K_0(|\omega_y| \sqrt{u^2 + q^2}) \cos(\omega_x u) du. \end{aligned} \quad (4,6)$$

Для нахождения интеграла в выражении (4,6) согласно [14] получим

$$\int_0^{\infty} K_0(a\sqrt{\lambda^2 + b^2}) \cos(c\lambda) d\lambda = \sqrt{\frac{\pi}{2}} b^{1/2} (a^2 + c^2)^{-1/4} K_{-1/2}(b\sqrt{a^2 + c^2}) \quad (4,7)$$

при условии  $c > 0$ ,  $\operatorname{Re} a > 0$ ,  $\operatorname{Re} b > 0$ . Здесь  $c = \omega_x$ ,  $a = \omega_y$ ,  $\lambda = u$ ,  $b = q$ .

Для упрощения выражения для модифицированной функции Бесселя второго рода  $K_n(x)$  выражения (4,7) согласно [14] воспользуемся тем, что  $K_{-1/2}(x) = \sqrt{\pi/(2x)} e^{-x}$ . Правая часть выражения (4,7) при этом преобразуется к виду

$$\sqrt{\frac{\pi}{2}} b^{1/2} (a^2 + c^2)^{-1/4} \sqrt{\frac{\pi}{2b\sqrt{a^2 + c^2}}} e^{-b\sqrt{a^2 + c^2}} = \frac{\pi}{2} \frac{1}{\sqrt{a^2 + c^2}} e^{-b\sqrt{a^2 + c^2}}. \quad (4,8)$$

Окончательно выражение (4,7) может быть записано в виде

$$\int_0^{\infty} K_0(a\sqrt{\lambda^2 + b^2}) \cos(c\lambda) d\lambda = \frac{\pi}{2} \frac{1}{\sqrt{a^2 + c^2}} e^{-b\sqrt{a^2 + c^2}}, \quad (4,9)$$



а двойной интеграл в выражении (4) с учётом обозначений  $c = \omega_x$ ,  $a = \omega_y$ ,  $\lambda = u$ ,  $b = q = z - z_0$  в виде

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\nu e^{-j\omega_x u} e^{-j\omega_y \nu}}{[u^2 + \nu^2 + q^2]^{3/2}} du d\nu = -4j\omega_y \frac{\pi}{2} \frac{1}{\sqrt{\omega_x^2 + \omega_y^2}} e^{-(z-z_0)\sqrt{\omega_x^2 + \omega_y^2}}. \quad (4,10)$$

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Масленников Ю. В.** Практика и перспективы применения сверхчувствительных магнитометров в биомедицинских исследованиях // Журнал радиоэлектроники. 2021. № 5. 42 с. DOI: 10.30898/1684-1719.2021.5.4.
2. **Бокерия О. Л., Кислицина О. Н., Темирбулатова А. Ш.** Возможности магнитоэлектрокардиографии в диагностике ишемической болезни сердца и нарушений ритма // Анналы аритмологии. 2009. 6, № 2. С. 45–63.
3. **Полякова И. П.** Магнитокардиография: историческая справка, современное состояние и перспективы клинического применения // Креативная кардиология. 2011. 5, № 2. С. 103–133. URL: <https://rucont.ru/efd/271737> (дата обращения: 17.05.2023).
4. **Шабалин А. В., Никитин Ю. П.** Клинические аспекты магнитокардиографии. Новосибирск: Изд-во РАМН СО, 1999. 124 с.
5. **Журавлев Ю. Е., Матлашов А. Н., Голышев Н. В., Моторин С. В. и др.** Динамическое картирование вызванных магнитных полей мозга человека // Доклады АН СССР. 1987. 296, № 1. С. 231–235.
6. **Кнеппо П., Титомир Л. П.** Биоманнитные измерения. М.: Энергоатомиздат, 1989. 287 с.
7. **Моторин С. В.** Технология проведения магнитокардиографических исследований // Автометрия. 2000. 36, № 6. Р. 94–112.
8. **Голышев Д. Н., Рогачевский Б. М.** Пространственно-спектральные преобразования в магнитокардиографических исследованиях // Автометрия. 2001. № 6. С. 69–79.
9. **Pudov V. S., Golyshev N. V., Motorin S. V., Golyshev D. N.** The increase of reliability of diagnostic algorithms for clinical magnetocardiograph // Proc. of the Int. Workshop and Tutorials on Electron Devices and Materials EDM. 2003. P. 112–118.
10. **Golyshev N. V., Greenberg Ya. S., Golyshev D. N. et al.** Spatial-spectral approach to localize late potentials // Proc. of the 6th Int. Symposium On Science and Technology (KO-RUS-2002). Novosibirsk, Russia, 24–30 June, 2002. Vol. 1. P. 475–479.
11. **Голышев Н. В., Моторин С. В., Голышев Д. Н.** Анализ методов локализации источников магнитного поля в биоманнитных исследованиях // Автометрия. 2022. 58, № 2. С. 37–45. DOI: 10.15372/AUT20220205.
12. **Прудников А. П., Бычков Ю. А., Маричев О. И.** Интегралы и ряды. М.: Наука, 1981. 800 с.
13. **Бронштейн И. С., Семендяев К. А.** Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. М.: Наука, 1981. 720 с.
14. **Грандштейн И. С., Рыжик И. М.** Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. М.: Государственное издательство физико-математической литературы. 1962. 1100 с.

Поступила в редакцию 30.01.2023

После доработки 28.02.2023

Принята к публикации 14.03.2023