

М. Н. Крамм

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ВЫБОРА КОЛИЧЕСТВА ЭЛЕКТРОДОВ НА КАРТЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА НА ПОВЕРХНОСТЯХ ТОРСА И КВАЗИЭПИКАРДА

M. N. Kramm

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF THE CHOICE OF THE NUMBER OF ELECTRODES ON THE ELECTRIC POTENTIAL DISTRIBUTION MAPS ON THE TORSO SURFACES AND QUASI-EPICARDIUM

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Рассматривается вопрос повышения пространственного разрешения при анализе карт распределения электрического потенциала, обусловленного электрической активностью сердца. Проводится сравнение пространственного разрешения на карте потенциала на поверхности торса и карте потенциала на квазиэпикарде, окружающей сердце. Анализируется влияние количества и размещения электродов на возможность регистрации верхних пространственных частот. Исследование актуально в задачах повышения информативности электрокардиографических обследований путем реконструкции параметров эквивалентного электрического генератора сердца (ЭЭГС). **Материалы и методы.** В рамках модели электрической активности сердца с мелкомасштабными неоднородностями анализируются двумерные пространственные спектры распределения электрического потенциала. **Результаты.** Проведено сравнение карт потенциала на поверхности торса (КППТ) и на поверхности квазиэпикарда (КППКЭ), окружающей сердце. Предложена методика оценки возможности регистрации верхних пространственных частот на КППТ и КППКЭ при различных количествах и способах размещения электродов на поверхности торса. **Выводы.** Карты потенциала на квазиэпикарде являются более информативными, чем карты потенциала на торсе и отображают более высокие пространственные частоты, а значит, более мелкие неоднородности. Предложенный подход с использованием пространственных спектров для карт потенциала на поверхности квазиэпикарда позволяет оценивать влияние количества и способа расположения электродов в многоэлектродной системе на поверхности торса на пространственное разрешение в карте потенциала.

A b s t r a c t. Background. The issue of increasing spatial resolution in the analysis of maps of the distribution of electric potential due to the electrical activity of the heart is considered. The spatial resolution is compared on the potential map on the torso surface and on the potential map on the quasi-epicardium surrounding the heart. The influence of the number and placement of electrodes on the possibility of recording the upper spatial frequencies is analyzed. The study is relevant in the tasks of increasing the information content of electrocardiographic examinations by reconstructing the parameters of an equivalent electric heart generator (EEGS). **Materials and methods.** In the framework of the model of electrical activity of the heart with small-scale inhomogeneities, two-dimensional spatial spectra of the distribution of electric potential are analyzed. **Results.** Comparison of potential maps on the surface of the torso (KPPT) and on the surface of the quasi-epicardium (KPPE) surrounding the heart. A tech-

nique is proposed for assessing the possibility of registering upper spatial frequencies at KPPT and KPPPE with various amounts and methods of placing electrodes on the surface of the torso. **Findings.** Potential maps on a quasi-epicardium are more informative than potential maps on a torso and display higher spatial frequencies, which means smaller inhomogeneities. The proposed approach using spatial spectra for potential maps on the surface of a quasi-epicardium allows one to evaluate the influence of the number and arrangement of electrodes in a multi-electrode system on the surface of a torso on the spatial resolution in the potential map.

К л ю ч е в ы е с л о в а: карта распределения электрического потенциала, электроды, торс, квазиэпикард, пространственный спектр, пространственные частоты.

К e y w o r d s: electric potential distribution map, electrodes, torso, quasi-epicardium, spatial spectrum, spatial frequencies.

Введение

Одной из важных задач электрокардиологии является повышение информативности электрокардиографических (ЭКГ) обследований с помощью многоэлектродных отведений. Электрический потенциал, регистрируемый с некоторого электрода, является интегральной характеристикой электрических источников в сердце, и потому лишь качественно, оценочно связан с активностью ближайшего к электроду участка миокарда. Использование многоэлектродных отведений позволяет на количественном уровне ставить обратную задачу электрокардиологии – задачу пространственно-временной реконструкции эквивалентного электрического генератора сердца (ЭЭГС) [1, 2].

В основе подхода лежит использование электрокардиосигналов (ЭКС), которые регистрируются с помощью системы электродов, располагаемых на поверхности торса с помощью надеваемого на торс «многоэлектродного жилета» (см., например, [3, 4]). Вариант размещения электродов показан на рис. 1.

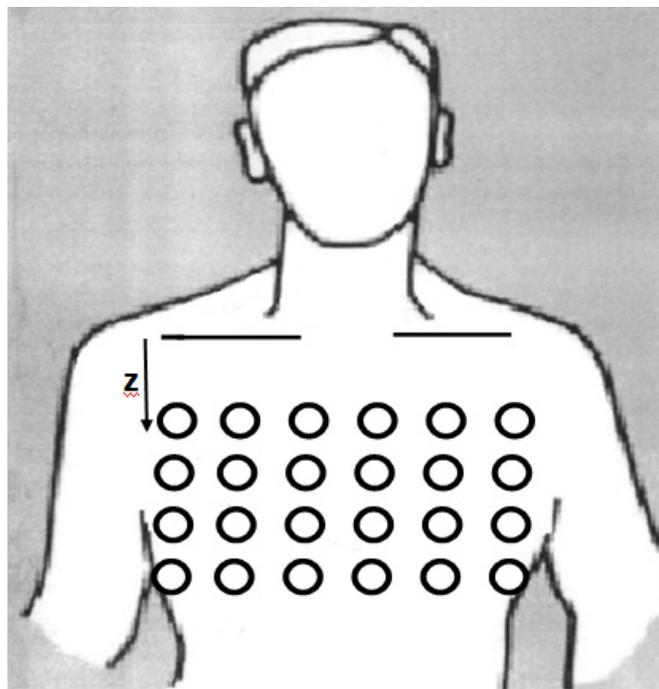


Рис. 1. Пример размещения электродов на поверхности торса многоэлектродных отведений

Эквивалентный электрический генератор сердца (ЭЭГС) поверхностного типа характеризуется распределениями электрического потенциала ϕ_h и нормальной производной электрического потенциала (далее – потенциала) на поверхности эпикарда $\partial\phi_h/\partial n$ [5, 6]. Связь

между этими распределениями и регистрируемым распределением потенциала ϕ_b на поверхности торса имеет интегральный характер и вытекает из уравнения Лапласа для области между поверхностями эпикарда и торса [7].

Актуальность задачи реконструкции ЭЭГС поверхностного типа связана с возможностью наблюдения более детальных карт распределения ϕ_n потенциала на поверхности эпикарда (КППЭ) [6] по сравнению с картами распределения регистрируемого потенциала ϕ_b на поверхности торса (КППТ). Такая возможность иллюстрируется рис. 2 и 3, на которых для случая модельной задачи (комбинация двух дипольных источников) представлен пример двумерной развертки КППТ (рис. 1) и карты распределения потенциала ϕ_{qe} на поверхности квазиэпикарда (КППКЭ), окружающей область сердца (см. рис. 2).

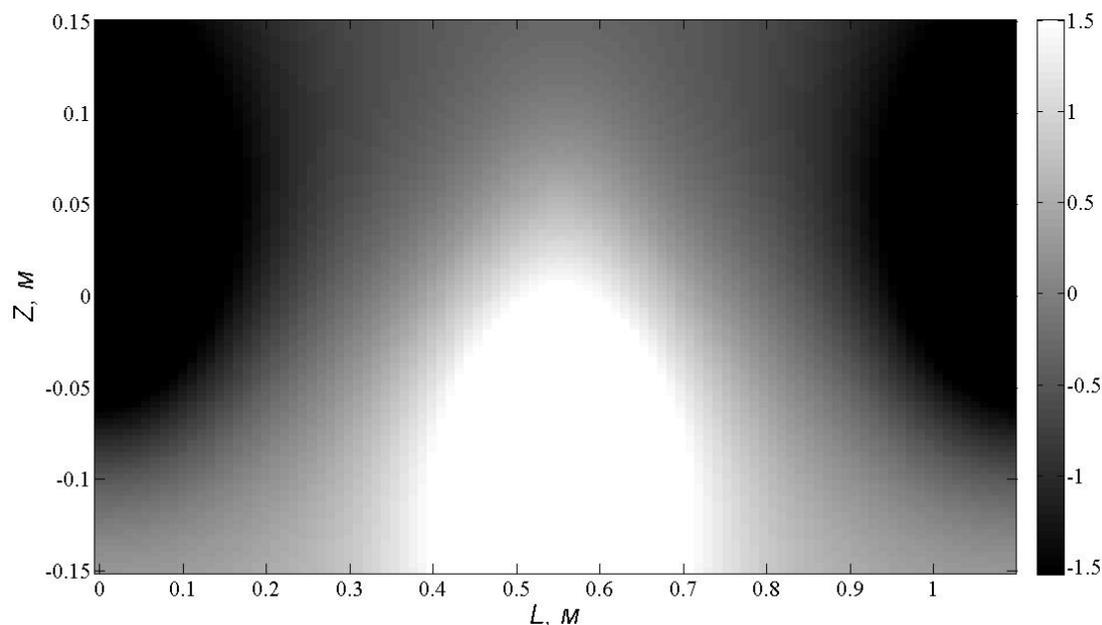


Рис. 2. КППТ, координата L изменяется по периметру торса, центр ($L = 0,55$ м) соответствует левой боковой вертикальной линии

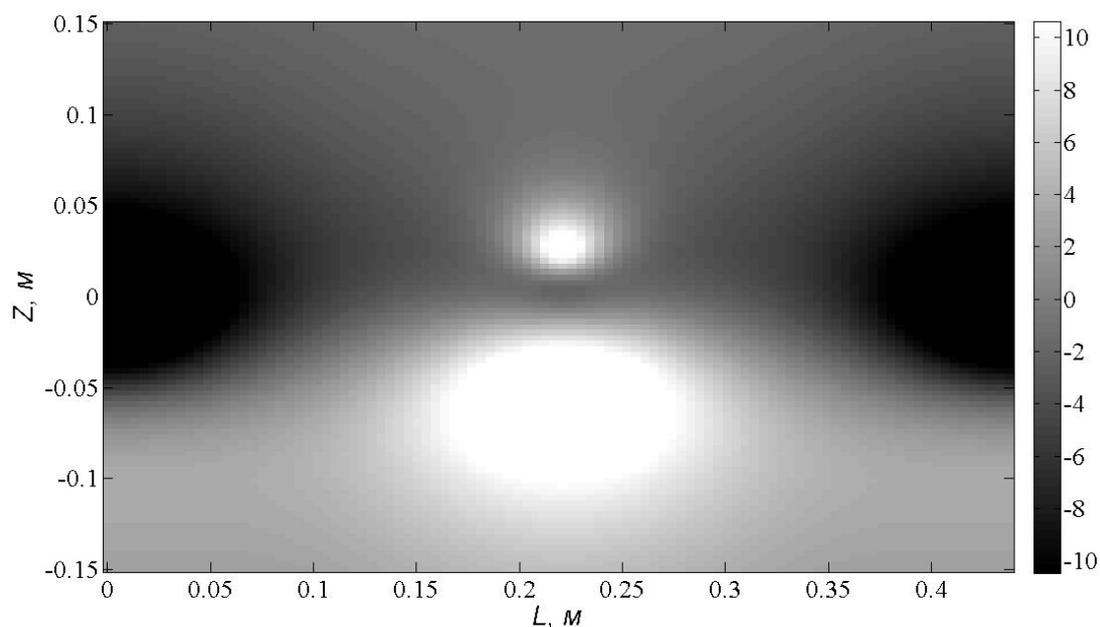


Рис. 3. КППКЭ, координата L изменяется по периметру цилиндрической модели квазиэпикарда (эллиптический цилиндр), центр ($L = 0,225$ м) соответствует левой боковой вертикальной линии

В соответствии с рис. 2. и 3 неоднородность размеров порядка 2–3 см может быть заметна на квазиэпикарде и не наблюдаться на торсе. Таким образом, в целях повышения эффективности кардиодиагностики представляет интерес анализ повышения степени детализации на КППЭ, т.е. повышения разрешающей способности при использовании КППКЭ.

Анализ влияния выбора числа электродов и числа точек интерполяции

При реконструкции ЭЭГС поверхностного типа на основе поверхностных интегралов в (1) используются разностные вычислительные схемы, основанные на дискретизации поверхностей торса S_b и эпикарда S_h . В ходе построения разностной схемы используются координаты точек размещения электродов и потенциалы, зарегистрированные в этих точках. Распределение потенциала на той или иной поверхности можно рассматривать как двумерный пространственный сигнал. При этом погрешность дискретизации такого сигнала в соответствии с теоремой В. А. Котельникова [8] определяется интервалом между точками дискретизации, в нашем случае – пространственным интервалом между электродами на поверхности торса. Интервал дискретизации должен выбираться в соответствии с частотным пространственным спектром распределения потенциала на поверхности наблюдения.

Рассмотрим дискретизацию распределения потенциала на поверхности торса и поверхности квазиэпикарда, представляемых моделями соосных эллиптических цилиндров. В соответствии с [9] в случае вещественного распределения ширина спектрального окна по вертикальной координате K_z и по периметру цилиндрической поверхности K_l определяется формулами

$$K_z = 1/2\Delta z = N_z/2B; \quad K_l = 1/2\Delta l = N_l/2L, \quad (1)$$

где N_z и N_l – количества точек дискретизации поверхности эллиптического цилиндра по вертикальной координате z и по длине дуги периметра l ; B и L – высота и периметр цилиндрической поверхности распределения потенциала.

Проанализируем влияние выбора количества электродов на примере одиночной неоднородности в распределении потенциала, порождаемой дипольным источником, расположенным в объеме сердца около его поверхности (рис. 4).

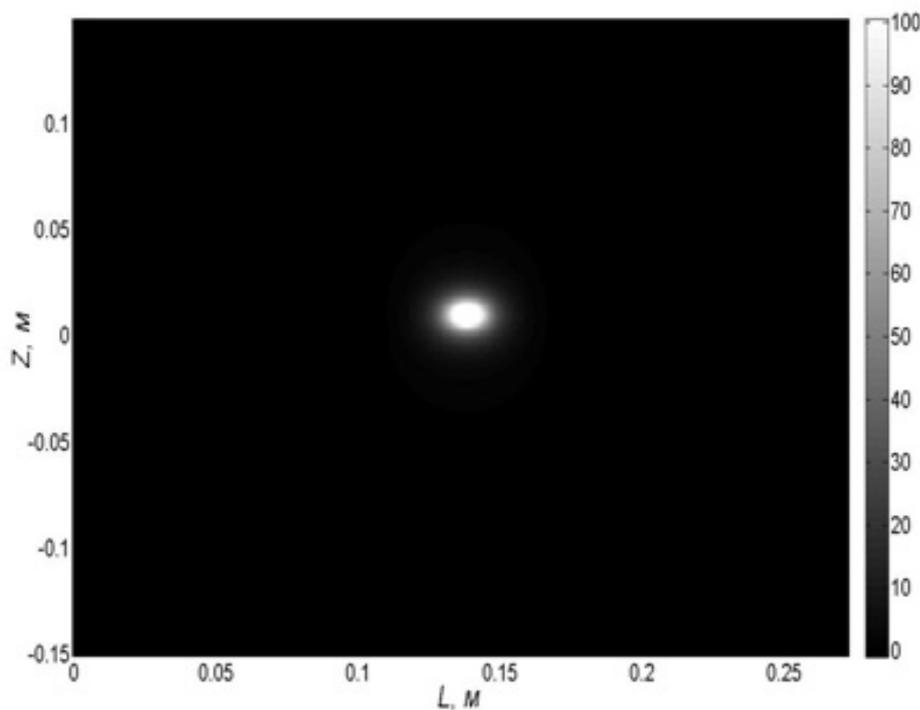


Рис. 4. КППКЭ для малой неоднородности

Рассмотрим случай, когда интервалы Δz и Δl представляют собой интервалы между соседними электродами, а количество электродов $N_s = (N_z + 1)N_L$ с учетом цикличности распределения потенциала по периметру. Для получения сглаженных спектральных оценок пространственные распределения потенциала взвешивались двумерным окном Хэмминга [9]. При этом поскольку частотный дискрет (шаг частотной сетки) по вертикальному и горизонтальному направлениям определяется формулами

$$\Delta k_l = 1/\Delta l \cdot N_l; \quad \Delta k_z = 1/\Delta z \cdot N_z, \quad (2)$$

то для уменьшения частотного дискрета при вычислении спектра путем двумерного дискретного преобразования Фурье распределения потенциала дополнялись нулевыми отсчетами.

Центральные сечения пространственных спектров потенциала на поверхности торса и квазиэпикарда для рассматриваемого случая представлены на рис. 5, причем по горизонтальной оси откладываются пространственные частоты k_l , соответствующие интервалам длин дуг периметра. Параметрами кривых на рис. 5 являются количества рядов электродов по периметру (первый параметр) и по высоте (второй параметр). Из рис. 5 следует, что выбор числа точек дискретизации равным числу электродов по соответствующему направлению ограничивает обзор частотного спектра карты потенциалов и не позволяет регистрировать достаточно высокие пространственные частоты, т.е. достаточно мелкие неоднородности в распределении потенциала.

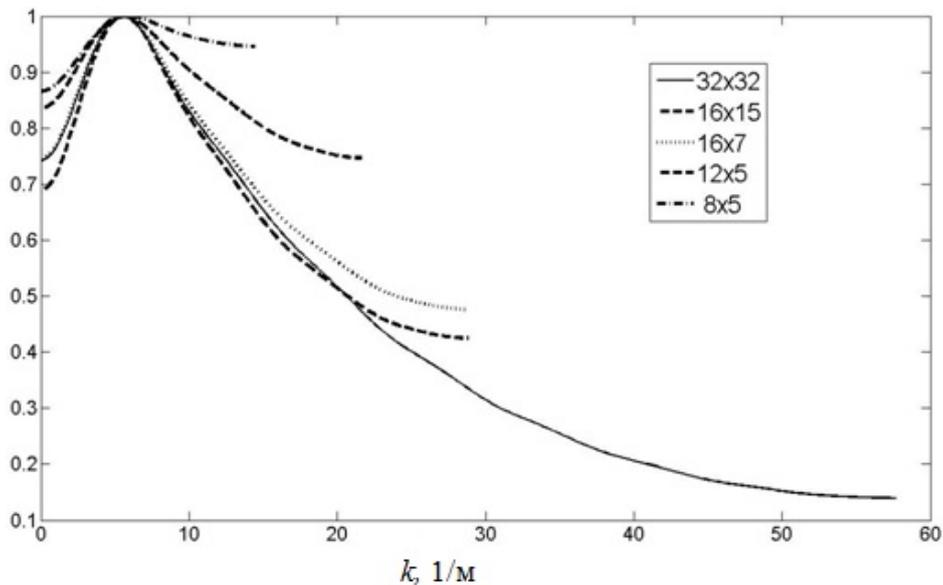


Рис. 5. Центральное сечение в горизонтальном направлении нормированного спектра потенциала на квазиэпикарде без интерполяции

Таким образом, для приемлемой регистрации достаточно высоких пространственных частот (более 20 м^{-1}) необходимо увеличивать ширину спектрального окна путем уменьшения пространственных дискретов по вертикальной координате Δz и по длине периметра Δl :

$$\Delta l = L/N_{el}n_{int}; \quad \Delta z = B/N_{ez}n_{int}, \quad K_l = K_{l0}n_{int}; \quad K_z = K_{z0}n_{int}, \quad (3)$$

где N_{el} , N_{ez} — количества рядов электродов по периметру и по высоте соответственно; n_{int} — коэффициент интерполяции, показывающий, во сколько раз увеличивается количество интервалов дискретизации по каждому направлению; K_{l0} , K_{z0} — размеры спектрального окна при отсутствии интерполяции, когда $N_l = N_{el}$; $N_z = N_{ez}$ в формуле (2).

На рис. 6 приведено центральное сечение двумерного спектра потенциала на квазиэпикарде с учетом интерполяции ($n_{int} = 8$) для неоднородности, показанной на рис. 4. Параметры

кривых аналогичны рис. 5: N_{el} и N_{ez} соответственно. Как следует из рис. 6, проведение интерполяции позволяет расширить частотный диапазон при анализе карт потенциала на квазиэпикарде. Так, при комбинации электродов 16×7 (16 рядов по периметру, 7 рядов по высоте) регистрируются пространственные частоты до $40\text{--}45 \text{ м}^{-1}$.

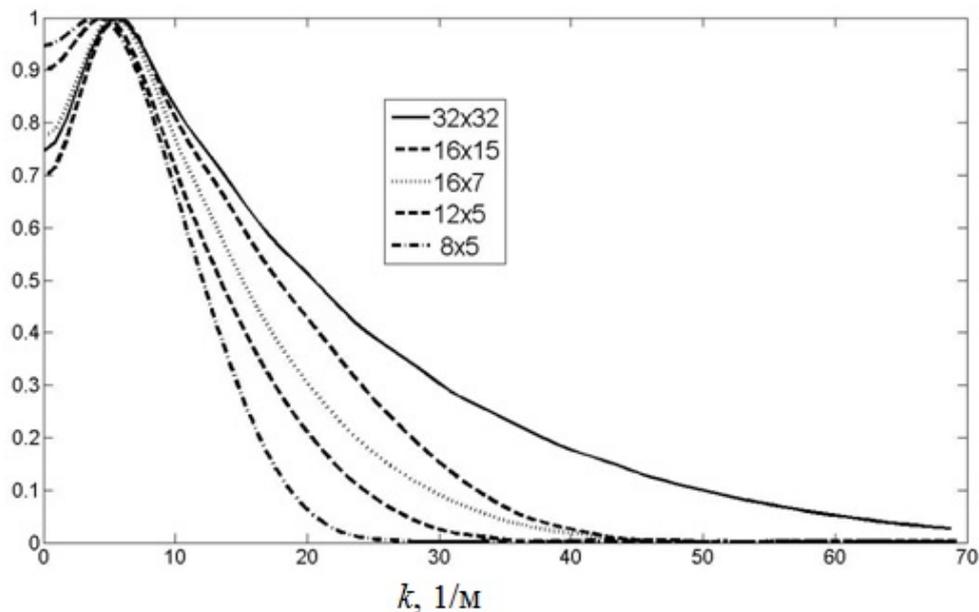


Рис. 6. Центральное сечение в горизонтальном направлении нормированного спектра потенциала на квазиэпикарде с интерполяцией

Для сравнения на рис. 7 представлено центральное сечение двумерного спектра потенциала на торсе, полученное при тех же условиях, как для рис. 6. Характерно, что пространственное разрешение на торсе получается существенно хуже: пространственные частоты в спектре на порядок меньше, чем для распределения потенциала на квазиэпикарде. Это объясняется эффектом ослабления пространственных гармоник потенциала, удовлетворяющего уравнению Пуассона и создаваемого источниками поля в эпикарде [Гранада]. В соответствии с рис. 7 для описания карты потенциалов на торсе не требуется большое количество электродов: спектр при $N_{el} = 8$, $N_{ez} = 5$ практически не отличается от спектра при $N_{el} = 32$, $N_{ez} = 32$.

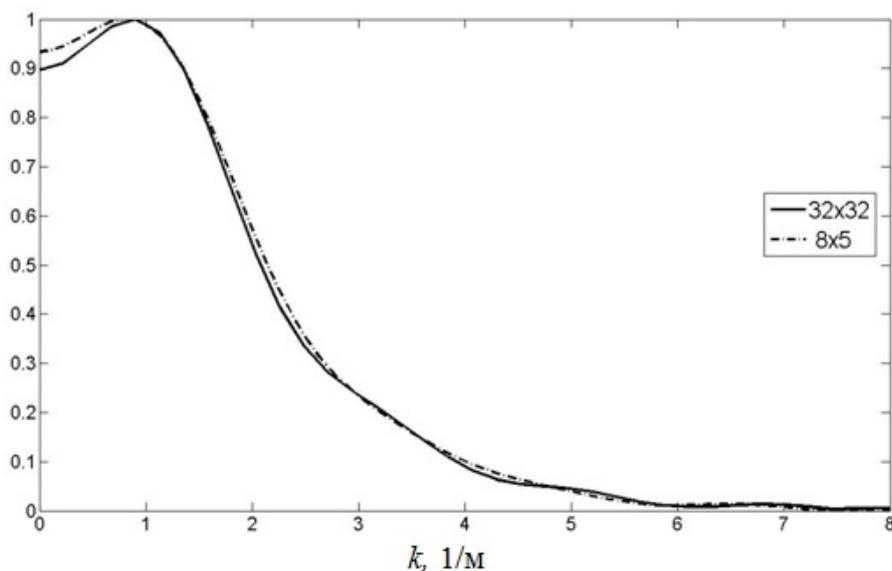


Рис. 7. Центральное сечение в горизонтальном направлении нормированного спектра потенциала на торсе с интерполяцией

Таким образом, карты потенциала на квазиэпикарде являются более информативными и отображают более высокие пространственные частоты, а значит, более мелкие неоднородности. Предложенный подход с использованием пространственных спектров для карт потенциала на поверхности квазиэпикарда позволяет оценивать влияние количества и способа расположения электродов в многоэлектродной системе на поверхности торса на пространственное разрешение в карте потенциала.

Библиографический список

1. *Титомир, Л. И.* Неинвазивная электрокардиотопография / Л. И. Титомир, В. Г. Трунов, Э. А. И. Айду. – Москва : Наука, 2003.
2. *Comprehensive Electrocardiology* / P. W. Macfarlane, A. van Oosterom, O. Pahlm, P. Kligfield, M. Janse, J. Camm. – 2nd edn. – London : Springer, 2011. – Chapter 9. – P. 2291.
3. URL: <https://www.medtronic.com/us-en/healthcare-professionals/products/cardiac-rhythm/cardiac-mapping>
4. Пат. 2651068 Российская Федерация. Способ неинвазивного определения электрофизиологических характеристик сердца / Бодин О. Н., Бодин А. Ю., Жихарева Г. В., Крамм М. Н., Палютин Ю. А., Стрелков Н. И., Черников А. И. – заявл. 05.07.2017 ; опубл. 18.04.2018.
5. Reconstruction of equivalent electrical sources on heart surface / G. V. Zhikhareva, M. N. Kramm, O. N. Bodin, R. Seepold, A. I. Chernikov, Y. A. Kupriyanova, N. A. Zhuravleva // Proceedings of 6th International Work-Conference (IWBBIO 2018). – Granada, Spain, 2018. – Part I.
6. *Бодин, О. Н.* Обработка электрокардиосигналов для реконструкции электрической активности сердца на квазиэпикарде / О. Н. Бодин, М. Н. Крамм, А. И. Черников, Ю. А. Палютин // Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации : материалы Междунар. науч.-техн. конф. «Шляндинские чтения – 2018». – Пенза : Изд-во ПГУ, 2018. – С. 161–164.
7. *Zhikhareva, G.* Reconstruction of Current Sources of Heart in the ECG Inverse Problem / G. Zhikhareva, M. Kramm. – Saarbrücken : LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2012.
8. *Баскаков, С. И.* Радиотехнические цепи и сигналы / С. И. Баскаков. – Москва : Высш. шк, 2016. – 528 с.
9. *Марпл.-мл., С. Л.* Цифровой спектральный анализ и его приложения / С. Л. Марпл.-мл. – Москва : Мир, 1990. – 584 с.

References

1. Titomir L. I., Trunov V. G., Aydu E. A. I. *Neinvazivnaya elektrokardiotopografiya* [Non-invasive electrocardiography]. Moscow: Nauka, 2003. [In Russian]
2. Macfarlane P. W., van Oosterom A., Pahlm O., Kligfield P., Janse M., Camm J. *Comprehensive Electrocardiology*. 2nd edn. London: Springer, 2011, chapter 9, p. 2291.
3. Available at: <https://www.medtronic.com/us-en/healthcare-professionals/products/cardiac-rhythm/cardiac-mapping>
4. Pat. 2651068 Russian Federation. *Sposob neinvazivnogo opredeleniya elektrofiziologicheskikh kharakteristik serdtsa* [Pat. 2651068 Russian Federation. Method of noninvasive determination of electrophysiological characteristics of the heart]. Bodin O. N., Bodin A. Yu., Zhikhareva G. V., Kramm M. N., Palyutina Yu. A., Strelkov N. I., Chernikov A. I. – zavavl. 05.07.2017 ; opubl. 18.04.2018. [In Russian]
5. Zhikhareva G. V., Kramm M. N., Bodin O. N., Seepold R., Chernikov A. I., Kupriyanova Y. A., Zhuravleva N. A. *Proceedings of 6th International Work-Conference (IWBBIO 2018)*. Granada, Spain, April 25–27, 2018, part I.
6. Bodin O. N., Kramm M. N., Chernikov A. I., Palyutina Yu. A. *Metody, sredstva i tekhnologii polucheniya i obrabotki izmeritel'noy informatsii: materialy Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. «Shlyandinskije chteniya – 2018»* [Methods, means and technologies of obtaining and processing of measurement information: materials of the Intern. scientific.-tekhn. conf. "Selenginskii read – 2018"]. Penza: Izd-vo PGU, 2018, pp. 161–164. [In Russian]
7. Zhikhareva G., Kramm M. *Reconstruction of Current Sources of Heart in the ECG Inverse Problem*. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2012.
8. Baskakov S. I. *Radiotekhnicheskie tsepi i signaly* [Electronic circuits and signals]. Moscow: Vyssh. shk, 2016, 528 p. [In Russian]
9. Marpl.-ml., S. L. *Tsifrovoy spektral'nyy analiz i ego prilozheniya* [Digital spectral analysis and its applications]. Moscow: Mir, 1990, 584 p. [In Russian]

Крамм Михаил Николаевич

кандидат технических наук, доцент,
кафедра основ радиотехники,
Национальный исследовательский университет
«МЭИ»
(Россия, г. Москва, ул. Красноказарменная, 14)
E-mail: KrammMN@mail.ru

Kramm Mikhail Nikolaevich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of radio engineering fundamentals,
National Research University "MPEI"
(14 Krasnokazarmennaya street, Moscow, Russia)

Образец цитирования:

Крамм, М. Н. Анализ влияния выбора количества электродов на карты распределения электрического потенциала на поверхностях торса и квазиэпикарда / М. Н. Крамм // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2019. – № 3 (29). – С. 61–68. – DOI 10.21685/2307-5538-2019-3-7.