

УДК 004:615.478.6:616.12-005.4

**ПОРІВНЯННЯ ІНФОРМАТИВНОСТІ МЕТОДІВ
МАГНІТОКАРДІОГРАФІЧНОГО ТА ЕЛЕКТРОКАРДІОГРАФІЧНОГО
КАРТУВАНЬ ЩОДО ВИЯВЛЕННЯ ОЗНАК ПОРУШЕНЬ ПРИ ІШЕМІЧНІЙ
ХВОРОБІ СЕРЦЯ**

М.М. Будник, І.А. Чайковський, Л.П. Дробуш, В.В. Конєва, О.В. Кухарев
Інститут кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України

Резюме. У роботі представлено порівняльний аналіз методів магнітокардіографічного та електрокардіографічного картувань в аспекті їх інформативності.

Ключові слова: методи магнітокардіографічного та ЕКГ- картувань, порушення при ішемічній хворобі серця.

**СРАВНЕНИЕ ИНФОРМАТИВНОСТИ МЕТОДОВ
МАГНИТОКАРДИОГРАФИЧЕСКОГО И ЭЛЕКТРОКАРДИОГРАФИЧЕСКОГО
КАРТИРОВАНИЙ ПРИ ВЫЯВЛЕНИИ ПРИЗНАКОВ НАРУШЕНИЙ ПРИ
ИШЕМИЧЕСКОЙ БОЛЕЗНИ СЕРДЦА**

М.М. Будник, И.А. Чайковский, Л.П. Дробуш, В.В. Конева, О.В. Кухарев
Институт кибернетики им. В.М. Глушкова НАН Украины

Резюме. В работе представлен сравнительный анализ методов магнитокардиографического и электрокардиографического картирований в аспекте их информативности.

Ключевые слова: методы магнитокардиографического и ЭКГ-картирований, нарушения при ишемической болезни сердца.

**COMPARISON OF INFORMATIVENESS OF METHODS OF
MAGNETOCARDIOGRAPHIC AND ELECTROCARDIOGRAPHIC MAPPING
CONCERNING REVEALING OF VIOLATION SIGNS AT ISCHEMIC HEART
DISEASE**

M.M. Budnyk, I.A. Chaykovsky, L.P. Drobush, V.V. Konyeva, O.V. Kukharev
V.N. Glushkov institute of cybernetics

Summary. The comparative analysis of methods of magnetocardiographic and electrocardiographic mapping in the aspect of their informativeness is represented in the article.

Key words: methods of magnetocardiographic and ECG-mapping, violations at ischemic heart disease.

ВСТУП. Надійна неінвазивна діагностика серцевих хвороб на ранніх стадіях все ще залишається клінічно актуальною проблемою, особливо це стосується такої розповсюдженої, як ішемічна хвороба серця (ІХС) [1]. Відомо, що електрофізіологічні параметри різних ділянок міокарда можуть істотно змінюватися як у результаті різних захворювань, так і в результаті лікування. Ці зміни виявляються в

регіональних відхиленнях від норми локальної щільності мембранних струмів іонів і, відповідно, в зростанні електричної гетерогенності в окремих ділянках міокарда [2].

На сьогодні ЕКГ залишається найпоширенішим та найдешевшим методом обстеження серця. Однак клінічні дослідження показали, що ЕКГ нездатна виявити зазначені відхилення на ранніх стадіях. В результаті, ЕКГ має

© І.І. А́оаіеё, ².À. ×áëëíâñüëë, Ё.Ї. Æðíáóø, Â.Â. Ёííªää, Í.Â. Ёóðaðää

низьку діагностичну точність в діагностиці деяких хвороб серця. Так, для виявлення ІХС найбільше значення має ST-T інтервал, але на ньому ЕКГ не має достатньої чутливості, оскільки струми, які протікають у серці, розповсюджуються тангенціально до поверхні грудної клітки людини [3]. Тому потрібно розвивати та впроваджувати нові методи діагностики хвороб серця. Такими методами є електропотенціальне (ПКТ) [4] та магнітокардіографічне (МКГ) [5] картування.

Постановка задачі. Впровадженню нових методів обстежень у клінічну практику перешкоджає відсутність надійних діагностичних показників. Метою даної роботи є виявлення можливостей МКГ та ПКТ щодо діагностики ІХС, як кожного окремо, так і встановлення того, чи їх поєднання дасть нову інформацію про патологію.

МАТЕРІАЛ І МЕТОДИ. У даній роботі досліджено біоелектричний генератор серця методами ПКТ та МКГ, в яких сигнал (потенціал чи поле) породжується різним за фізичним принципом джерелом біосигналу (електричний чи струмовий диполь). Перевіряється, який з методів більш інформативний і чи існують діагностичні показники при їх поєднанні. Порівняння методів проводилось на основі зіставлення числових показників, отриманих у результаті обробки карт розподілу потенціалу та магнітного поля різними математичними методами. Іншим аспектом є виявлення того, які відмінності в цих показниках є нормофізіологічними, а які зумовлені патологічними ураженнями міокарда ішемічного характеру.

Для дослідження було відібрано дві особи: здоровий без кардіологічних захворювань та пацієнт з ІХС, обидва були обстежені методами ПКТ та МКГ. Реєстрація ПКТ проводилася у 40 відведеннях по сітці 5 рядків по 8 відліків у рядку, з кроком між електродами у рядку 3 см та 5 см між рядками у клініці університету м. Наймеген (Голандія). Реєстрація МКГ проводилася у 36 відведеннях по сітці 6X6 з кроком 4 см приладом MCG-7 фірми SQUID AG за стандартною методикою [4].

Досліджувались ПКТ та МКГ карти здорового волонтера та хворого на ІХС на зубцях P, Q, R, S, T. При ЕКГ обстеженні пацієнта ознак ІХС виявлено не було, діагноз ІХС було встановлено на основі коронарної ангіографії. Алгоритм обробки даних включає такі етапи:

1. Імпорт даних та побудова ЕКГ та МКГ часових кривих у різних відведеннях.

2. Побудова карт електричного потенціалу та магнітного поля на зубцях P, Q, R, S, T.

3. Оцінка карт за допомогою наступних математичних підходів: 1) Фур'є-аналіз; 2) Асиметрія еквівалентних електричного та струмового диполів; 3) Кут між електричним та струмовим диполями серця; 4) Кореляційний аналіз; 5) Згортка карт.

4. Порівняння методів та формулювання висновків. Всього можливі 4 логічні висновки про корисність методів для раннього виявлення порушень, спричинених ІХС:

1 Обидва методи необхідно використовувати в поєднанні;

2) Метод МКГ має перевагу над методом ПКТ;

3) Метод ПКТ має перевагу над методом МКГ;

4) Немає сенсу використовувати обидва методи в поєднанні.

Останній висновок про непридатність обох методів може мати такі причини:

а) Відмінності показників немає, тобто методи мають однакову інформативність;

б) Відмінність є, але мала, що дає підстави прогнозувати, що при статистичній обробці і порівнянні груп здорових і хворих на ІХС така відмінність буде недостовірною;

в) Відмінність є великою, але постійною (систематичною), тобто неінформативною, такою, що не пов'язана з електрофізіологічними процесами у міокарді.

Результати:

1. Імпорт даних та побудова усереднених кривих на протязі кардіоциклу.

Вхідні дані мають вигляд ASCII файлів, які вміщують усереднені протягом кардіоциклу набори значень електричного потенціалу і магнітного поля, виражені, відповідно у мілівольтах та пікотеслах. Їх вигляд для здорової особи наведено на рисунку 1.

2. Побудова карт розподілу електричного потенціалу та магнітного поля.

З наведених на рисунку 1 кривих для різних ПКТ та МКГ відведень вибрано такі, де чітко виражені всі характерні зубці (P-Q-R-S-T) кардіоциклу.

На рисунку 2 наведено вигляд цих кривих, де числа біля зубців вказують на момент часу з початку кардіоциклу. Далі у відібрані моменти кардіоциклу методами інтерполяції будувались карти розміром 20X20 см, подані на ри-

сунку 3. Вони мають вигляд кольорових карт, де червоним (синім) кольором палітри відпо-

відають додатні (від’ємні) значення потенціалу (поля), а нуль позначено жирною ізолінією.

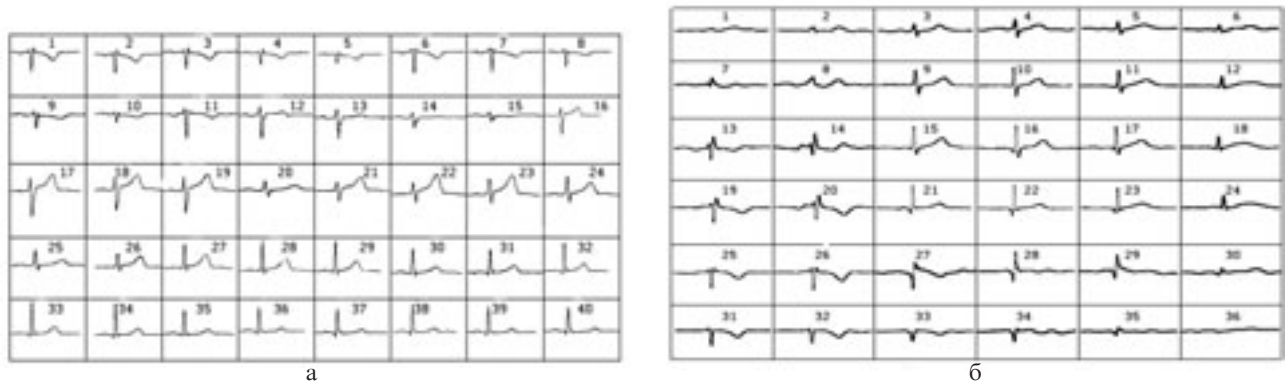


Рис. 1. Вигляд усереднених ПКТ (а) та МКГ (б) кардіоциклів для здорової особи.

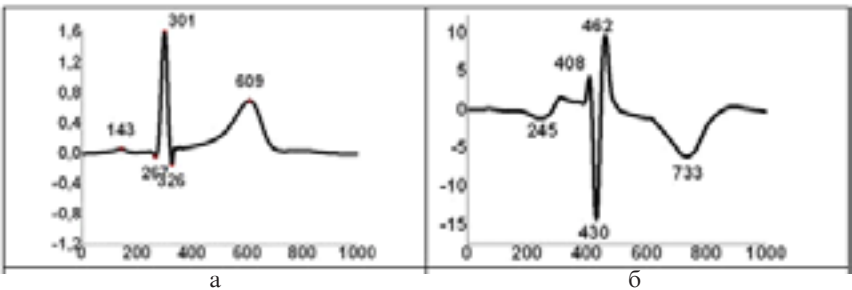


Рис. 2. Визначення моментів часу, які відповідають характерним зубцям по усередненому кардіоциклу, отриманому методом ПКТ (а) та МКГ (б).

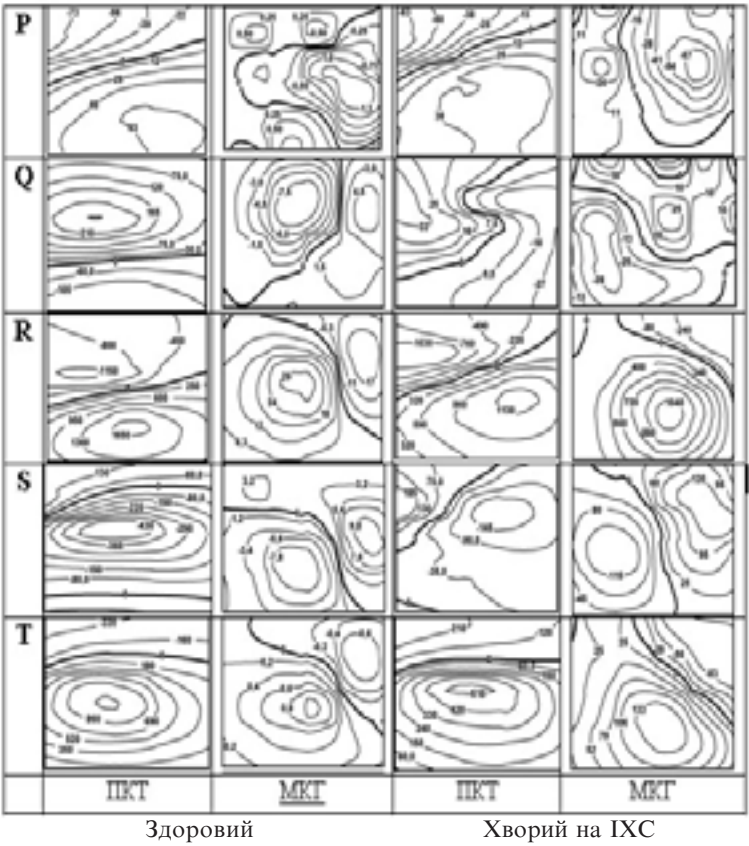


Рис. 3. Вигляд ПКТ та МКГ карт на зубцях P, Q, R, S, T для здорового та хворого на ІХС.

3. Оцінка карт за допомогою Фур'є-аналізу. Фур'є-спектри МКГ та ПКТ карт обчислено методом швидкого перетворення Фур'є. Для

більшої регулярності спектрів використано не амплітуду, а потужність (квадрат амплітуди Фур'є) гармоніки (див. рис. 4).

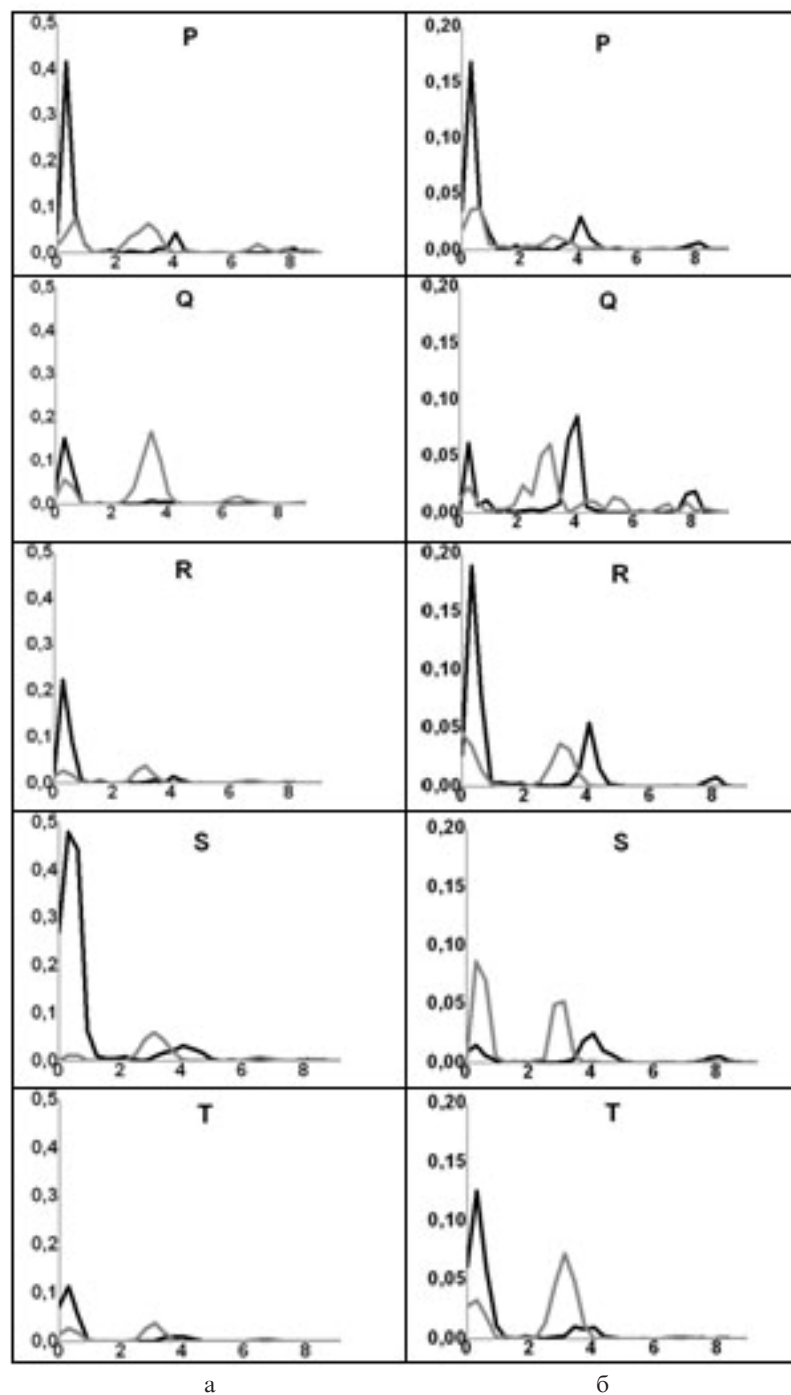


Рис. 4. Фур'є-спектри на різних зубцях кардіоциклу для здорового (а) та хворого на ІХС (б).

З рисунка 4 видно, що спектр доцільно розділити на 3 діапазони: $0 \div 1 \text{ м}^{-1}$ (низькі частоти, НЧ), $2 \div 5 \text{ м}^{-1}$ (середні частоти, СЧ) та $6 \div 8 \text{ м}^{-1}$ (високі частоти, ВЧ), які мають такий зміст:

1) Діапазон НЧ – це найбільш однорідна (гомогенна, розподілена, розмита) компонента. Мається на увазі, що чим вона більша, тим

більша однорідність карти, тим менше виражена дипольність та фрагментарність карти.

2) Діапазон СЧ відображає дипольність. Дипольність означає, що на карті присутні тільки 2 протилежні за знаком і приблизно рівні за амплітудою сильні екстремуми.

3) ВЧ діапазон відображає як недипольні (квадрупольні, октупольні та ін.) компоненти, пов'язані з патологією, так і зовнішні магнітні або електричні шуми.

Для аналізу було вибрано такі числові показники: Z – відношення потужностей спектральних компонент, Δf (ΔF) – відносний (абсолютний) зсув частот компонент на картах ПКТ відносно МКГ карт. Тоді наведені на рисунку 4 спектри можна пояснити у такий спосіб:

1. На спектрах відображається ступінь недипольності карти. Дипольний характер карти пропорційний амплітуді СЧ компоненти. Чим більші амплітуди НЧ та ВЧ компонент і зсув частот ΔF , тим більший ступінь недипольності.

2. Зсув частот ΔF на СЧ в основному спричинений особливостями реєстрації даних, оскільки він майже сталий на всіх зубцях, а зсув ΔF на зубцях Р і R на НЧ – спричинений фізіологічними або патологічними особливостями. Вказані особливості полягають у тому, що точки реєстрації МКГ знаходяться на певній відстані від тіла, а в ПКТ електроди знаходяться безпосередньо на поверхні тіла і повторюють його контури.

3. Зі спектрів S і T зубців можна бачити більшу дипольність саме МКГ карт. Це пов'язано з тим, що, по-перше, МКГ більш чутлива саме до тангенціальних струмів, які спостерігаються при реполяризації шлуночків (ST-T), а по-друге, – значний внесок в недипольність ПКТ карт дає неоднорідність та анізотропія тіла людини.

Висновки про перевагу того чи іншого методу робляться з наступних міркувань:

1. Якщо $Z > 2$, то має перевагу метод МКГ при дослідженні хворого на ІХС.

2. Якщо $0,5 < Z < 2$ – методи мають приблизно однакову інформативність.

3. Якщо $Z < 0,5$, то перевагу має ПКТ метод.

4. Якщо зсув частот в певному діапазоні частот однаковий, то фізіологічний або патологічний вплив відсутній.

5. Якщо зсув частот в певному діапазоні не систематичний – це означає, що методи дають різну інформацію, отже доцільно використовувати їх у поєднанні.

6. Результати аналізу спектрів стосовно інформативності певних діапазонів частот для вивчення електрофізіологічних процесів у серці здорової людини та діагностики ІХС зведені у таблиці 1.

Таблиця 1. Результати спектрального аналізу МКГ і ПКТ карт

Діапазон	Параметр	Здоровий					Хворий на ІХС				
		P	Q	R	S	T	P	Q	R	S	T
НЧ	Z	0,18	0,37	0,12	0,027	0,24	0,22	0,37	0,24	<i>5,8</i>	0,26
	$\Delta F, \text{м}^1$	<u>0,31</u>	0	0	0	0	<u>0,3</u>	0	<u>-0,32</u>	0	0
СЧ	Z	1,48	<i>16,7</i>	2,5	1,87	3,8	0,43	0,7	0,67	2,08	7,3
	$\Delta f, \%$	23	0	23	23	16,7	-23,15	-23,15	-23,15	-23,15	-17,02
ВЧ	Z	2,02	Компонента значна лише для МКГ				Компонента існує тільки для ПКТ				Відсутні
	$\Delta f, \%$	-0,15									

Примітка: жирний (курсив) – інформативний тільки метод ПКТ (МКГ), підкреслений (звичайний) – обидва методи інформативні (неінформативні) в поєднанні.

Як видно з таблиці 1 висновок про неінформативність обох методів у поєднанні може мати такі причини: 1) відмінності між спектрами немає (наприклад, на зубцях Q, S, T ΔF рівна нулю); 2) відмінність існує, але вона мала (наприклад, на зубцях Q та R $0,5 < Z < 2$); 3) відмінність велика, але має систематичний характер, не пов'язаний із фізіологією, наприклад, – зсув Δf на СЧ на всіх зубцях постійний і рівний приблизно 23 %.

4. Аналіз карт на основі їх асиметрії та

кута анізотронії. Для ідеального диполя існує тільки два екстремуми рівної амплітуди. Під асиметрією розуміємо нерівність амплітуд мінімуму та максимуму, що має місце при слабкому ступені недипольності карти, коли екстремумів тільки два, але вони мають різні амплітуди.

Величини асиметрії для різних зубців подані на рисунку 5. Інформативним для даного зубця є той метод, в якому значення асиметрії для здорового та хворого найбільше

відрізняються. З рисунка 5 можна визначити, який метод доцільно застосовувати на певному зубці, а саме – МКГ (P, Q, R), ПКТ (S), на зубці Т жоден з методів не демонструє відмінностей. В цілому, залежність для МКГ

методу має регулярний характер, при цьому ясно видно, що асиметрія у хворого на ІХС більша, ніж у здорового, і монотонно зменшується протягом кардіоциклу так, що на зубці Т відмінність практично відсутня.

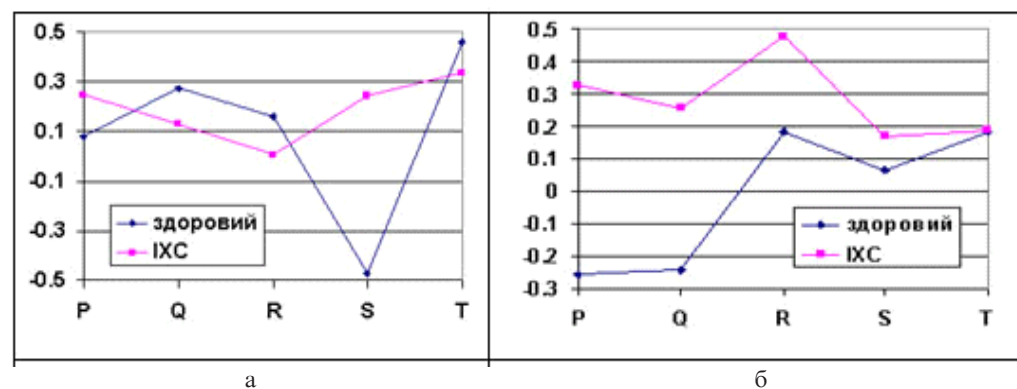


Рис. 5. Асиметрія еквівалентних електричного та струмового диполів на основі порівняння даних для здорового та хворого на ІХС для методів ПКТ (а) та МКГ (б).

Також видно закономірність зростання асиметрії від S до Т в обох методах у хворого на ІХС, причому цей ріст більш помітний в МКГ. Отже, при реполяризації шлуночків неоднорідність електричного фронту більш помітна на МКГ картах. Крім того, порівняння із Фур'є-аналізом показує, що для ST-T інтервалу існує спільна закономірність – зростання асиметрії та другої гармоніки Фур'є-спектру.

Дослідимо зміну кута між еквівалентними струмовим та електричним диполями. Положення диполів визначалося як середина відрізка, проведеного між екстремумами,

напрямок електричного співпадає з напрямком променя від мінімуму до максимуму, а напрямок струмового – це напрямок перпендикуляра до цього відрізка. В ізотропному середовищі напрями обох диполів повинні точно співпадати. Проте, у зв'язку зі спіральною структурою волокон серця, у кожної здорової людини кут між напрямками диполів (кут анізотропії) відрізняється від 0. Однак, як видно із рисунка ба, для здорової особи він не перевищує 1° , в той час як для хворого на ІХС (Рис. 6б) він змінюється майже на 100° .

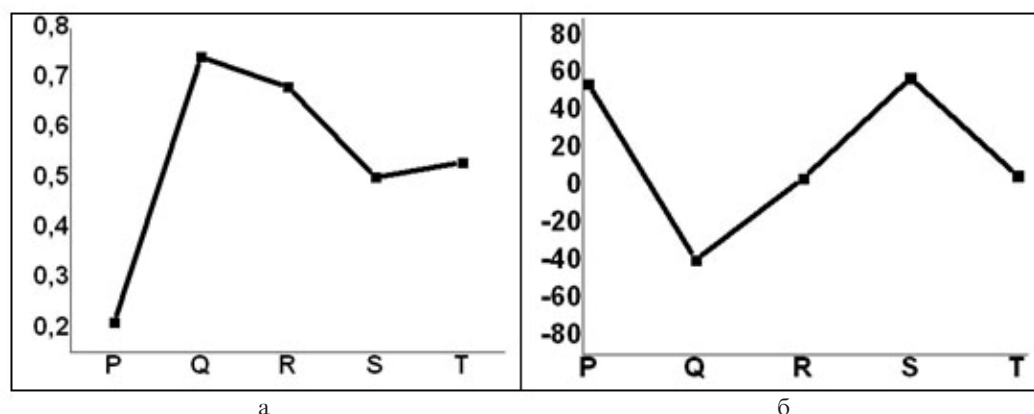


Рис. 6. Відмінність кута анізотропії між напрямком електричного та струмового диполів для здорового (а) та хворого на ІХС (б).

Нещодавно на основі зіставлення методів МКГ та вектор-ЕКГ було показано, що у пацієнтів з ІХС кут анізотропії лежить в межах $61,7^\circ \pm 17,2^\circ$ (R) та $45,4^\circ \pm 13,5^\circ$ (T), а у групи

здорових він становить $20,8^\circ \pm 3,3^\circ$ (R) та $18^\circ \pm 5,3^\circ$ (T) [6]. Тому для подальшого аналізу розіб'ємо значення кута на 2 діапазони: 1) від $-20^\circ < \alpha < 20^\circ$; 2) $\alpha < -20^\circ$ та $\alpha > 20^\circ$. У 1-му

діапазоні знаходяться кути на R і T зубцях, отже кут не є інформативним показником, пов'язаним з ішемічними ураженнями міокарда. На зубцях P, Q та S кут анізотропії є інформативним і породжений саме впливом патології.

5. Аналіз ПКТ та МКГ карт на основі кореляційного аналізу та згортки. Для 5-ти моментів кардіоциклу обчислюємо кореляцію між нормованими картами, отриманими різними методами. Отримані залежності наведені на рисунку 7 і мають такі особливості:

1. Кореляційні криві, в основному, несиметричні, окрім кривих на піках R і T.

2. Екстремум в нулі по осі абсцис спостерігається лише для піків Q, R, T.

3. Криві на всіх піках спадають немонотонно від нуля.

4. Наявність осциляцій зумовлена розгорткою по строках тому, що карти мають вигляд матриць, які при кореляційному аналізі перетворювалися в 1-мірний масив.

Також були обчислені згортки нормованих ПКТ та МКГ карт для кожного зубця кардіоциклу та побудовані згладжені криві, наведені на рисунку 7.

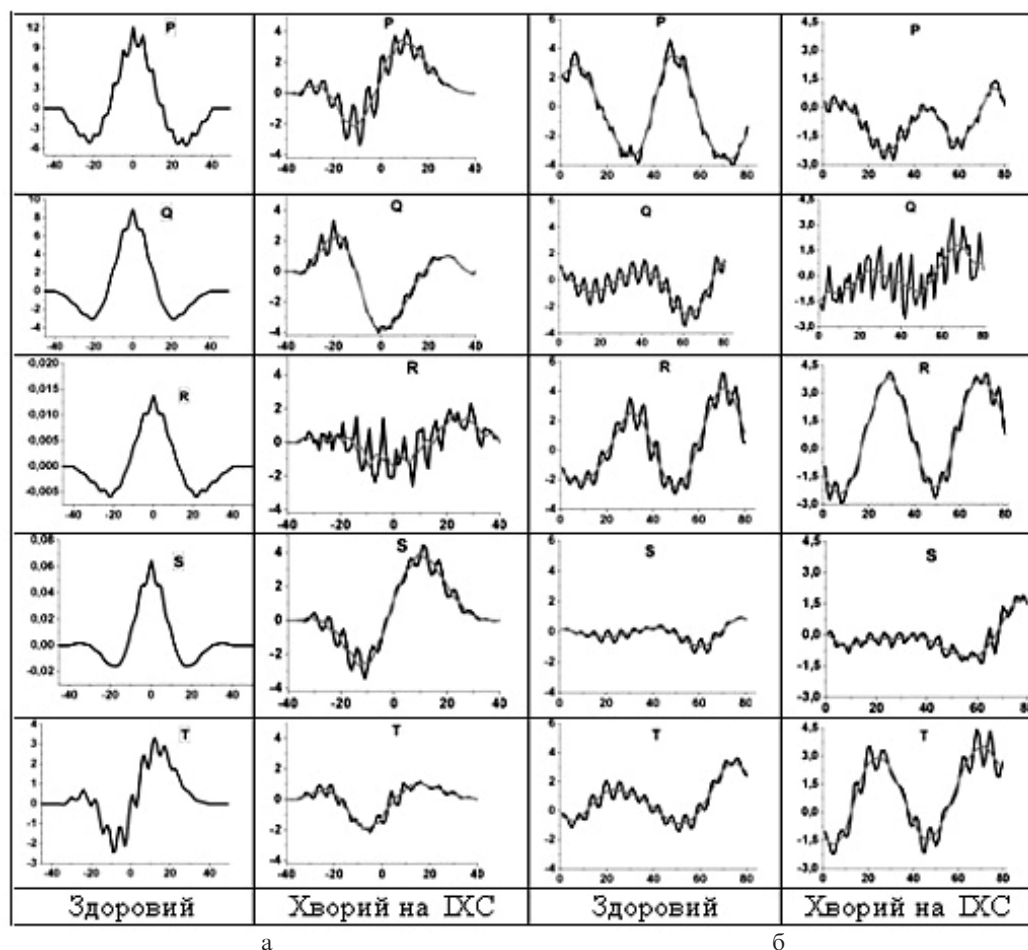


Рис. 7. Кореляція (а) і згортка (б) між ПКТ і МКГ картами для здорового та хворого на ІХС.

Для кількісної оцінки вибрано амплітуду кореляційної кривої в нулі осі абсцис і розмах кривої згортки (див. рис. 8). Використання кореляції чи згортки є доцільним для даного зубця, коли їх значення для здорового та хворого значно відрізняються. З рисунка 9 видно, що на зубцях P і Q інформативні обидва підходи, крім того, кореляція досить відрізняється на зубцях S і T, а згортка – на R. Залежність

для згортки якісно подібна для норми та хвороби, при цьому розмах згортки для хворого на ІХС менший ніж у здорового протягом P-Q-R і більший на S-T.

Також видно, що від S до T амплітуда кореляції змінює тенденцію у хворого (спадання), порівняно зі здоровим (зростання), в той час як розмах згортки зростає як у здорового, так і у хворого. Отже, для аналізу порушень при

реполяризації шлуночків інформативним буде аналіз кореляції, а не згортки.
Результати аналізу за допомогою обох мето-

дів всіх зубців кардіоциклу за допомогою усіх застосованих математичних методів обробки карт представлені у таблиці 2.

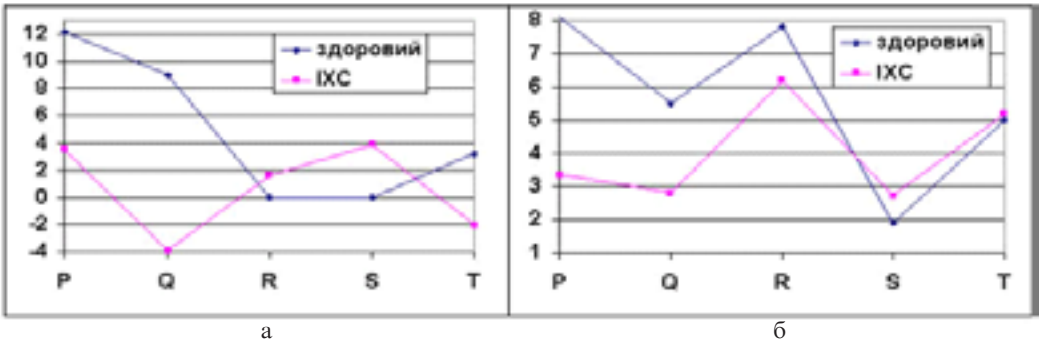


Рис. 8. Амплітуда кореляції (а) та розмах згортки (б) між картами при нормі та ІХС.

Таблиця 2. Інформативність методу для діагностики ІХС на зубцях кардіоциклу та рекомендовані методи математичної обробки карт

Зубець	Доцільно використовувати методи			Інформативність обох методів мала
	МКГ	ПКТ	обидва у поєднанні	
P	Асиметрія	Фур'є-аналіз	Фур'є-аналіз Кут анізотропії Кореляція, Згортка	
Q	Асиметрія	Фур'є-аналіз	Кут анізотропії Кореляція, Згортка	
R	Асиметрія	Фур'є-аналіз	Фур'є-аналіз Згортка	Кут анізотропії Кореляція
S	Фур'є-аналіз	Асиметрія	Кут анізотропії Кореляція	Згортка
T	Фур'є-аналіз	Фур'є-аналіз Асиметрія	Кореляція	Асиметрія, Згортка Кут анізотропії

ВИСНОВКИ. В роботі, на основі сигналів магнітного поля та електричного потенціалу, отриманих, відповідно, методами МКГ та ПКТ, проведено математичну обробку карт та обчислено ряд числових показників. На цій

основі було зроблено ряд висновків про інформативність цих методів (як окремо, так і в поєднанні) щодо діагностики ішемічних уражень міокарда.

БІБЛІОГРАФІЯ

1. U.S. Preventive Services Task Force. Guide to Clinical Preventive Services, 2nd Edition. Washington, DC: U.S. Department of Health and Human Services, Office of Disease Prevention and Health Promotion, 1996.
2. Connolly D.C., Elveback L.R., Oxman H.A. Coronary heart disease in residents of Rochester, Minnesota: Prognostic value of the resting electrocardiogram at the time of initial diagnosis of angina pectoris // Mayo. Clin. Proc. – 1984. – 59. – Д. 247-250.
3. Electrical heterogeneity in the heart: physiological, pharmacological and clinical implications /Antzelevich C., Dumaine R. // The Heart. E. Page, H. Fozzard, R. Solario. – N.Y.: Oxford University press. – 2002. – P. 654-692.
4. The use of magnetocardiography and body surface

potential mapping in the detection of coronary artery disease in chest pain patients with the normal electrocardiogram / R. Hoekema, C. Gurlek, I. Chaikovsky et al. // Computers in Cardiology. – 2004. – 31. – Д. 389-392.
5. Detection of coronary artery disease in patients with normal or unspecifically changed ECG on the basis of magnetocardiography / I. Chaikovsky, J.Kohler, Th. Hecker et al // Biomag 2000: Proc. of the 12-th Int. Conf. on Biomagnetism, Eds. J. Nenonen, R. Ilmoniemi, T. Katila. – Helsinki Univ. of Technology, Espoo (Finland). – 2001. – P. 565-568.
6. Detecting of the manifestation of myocardium anisotropy by the magnetocardiographic method / V. Sosnitsky, M. Budnyk, I. Chaikovsky et al. // Ibid. – P. 825-828.