

---

# ТЕХНОЛОГИЯ АВТОМАТИЧЕСКОЙ КЛАССИФИКАЦИИ ГРУПП ПАЦИЕНТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАГНИТОКАРДИОГРАФИИ В ДИАГНОСТИКЕ ПОРАЖЕНИЯ ПРЕДСЕРДИЙ У БОЛЬНЫХ ХРОНИЧЕСКОЙ ОБСТРУКТИВНОЙ БОЛЕЗНЬЮ ЛЕГКИХ И ИШЕМИЧЕСКОЙ БОЛЕЗНЬЮ СЕРДЦА\*

**Г.Г. Иванов, Н.А. Буланова, В.А. Востриков**

Отдел кардиологии НИЦ  
Первый Московский медицинский университет им. И.М. Сеченова  
*ул. Трофимова, 26, корп. 2, Москва, Россия, 109432*

Кафедра госпитальной терапии  
Российский университет дружбы народов  
*ул. Миклухо-Маклая, 8, Москва, Россия, 117198*

**В.Е. Дворников, Н.А. Чуйко, Г. Халаби**

Кафедра госпитальной терапии  
Российский университет дружбы народов  
*ул. Миклухо-Маклая, 8, Москва, Россия, 117198*

**Ю.В. Масленников**

ООО «Научно-производственное объединение КРИОТОН»  
*ул. Лесная, 4Б., Троицк, Москва, Россия, 142190*

**М.А. Примин, И.В. Недайвода**

Институт кибернетики им. В.М. Глушкова  
*проспект Академика Глушкова, 40, Киев, Украина, 03680 МСП*

**С.Ю. Кузнецова, В.Н. Гунаева**

Центральная клиническая больница РАН  
Поликлиника № 3 ЦКБ РАН  
*ул. Фотиевой, 12-3, Москва, Россия, 119333*

Настоящая работа посвящена исследованию возможности технологии автоматической классификации групп пациентов с использованием магнитокардиографии в диагностике поражения предсердий. Был выполнен анализ магнитокардиографических данных для трех групп пациентов. В первую вошли 31 МКГ запись здоровых волонтеров. Во вторую группу — 45 МКГ записей для пациентов, у которых установлена хроническая обструктивная болезнь легких (ХОБЛ). Третья группа включала 58 МКГ записей пациентов с ишемической болезнью сердца. Результаты статистического анализа показали, что решающее правило для классификации групп пациентов с ХОБЛ и ИБС может иметь четыре информационных параметра: 1 — показатель вариации магнитного поля (ПВМП), который характеризует процент превышения заданного уровня магнитного поля на всем временном интервале (104 мсек), в точках плоскости измерений каждой магнитной карты. 2 — параметр инверсий (ПИ), который определяется на интервале 2—40 мсек. 3 — параметр изменения интегральной карты токов (ПИКТ), характеризующий изменения структуры (величин векторов; направления векторов; пространственное распределение в границах области измерений) карты распределения вектора плотности токов за время 10 мсек (на зубце Р, в данном случае). 4 — параметр интегрального минимума магнитного поля (ИМП).

**Ключевые слова:** магнитокардиография, Р-зубец, хроническая обструктивная болезнь легких, пароксизмальная форма мерцательной аритмии.

---

\* Работа выполнена при поддержке Фонда развития Центра разработки и коммерциализации новых технологий Соглашение № МГ 15/14 от 16.04.2014 г. и Благотворительного фонда «РЕНОВА», Соглашение № 207 от 23.05.2014 г.

Фибрилляция предсердий представляет собой комплексную патологию, основанную на нескольких этиопатогенетических механизмах. Несмотря на отсутствие на сегодняшний день абсолютной изученности анатомо-функциональных основ ФП, современные исследования показывают, что данная аритмия, как правило, требует триггера, необходимого для ее запуска, а также наличия электрофизиологических и анатомических изменений для ее сохранения. На молекулярном уровне риентри может возникать за счет двух разных патофизиологических механизмов.

Возникновение риентри и дальнейшее развитие ФП могут зависеть от локального баланса между клеточной рефрактерностью и скоростью проведения импульса (теория ведущего круга). Скорость проведения импульса и рефрактерные периоды волокон, участвующих в круге повторного входа возбуждения, определяют его длину, в то время как анатомические препятствия (устья вен) являются лишь пассивными зонами, вокруг которых распространяются уходящие из ведущего круга волны возбуждения. Формированию круга риентри небольших размеров способствует наличие волокон с разной рефрактерностью, расположенных в непосредственной близости друг к другу [1—3].

**Ключевым моментом в понимании развития персистирующей ФП является электрофизиологическое ремоделирование.** В ходе этого процесса клетки, задействованные в макрориентри, подвергаются изменениям с точки зрения характеристик реполяризации, проявляющимся в укорочении потенциала действия, а вследствие этого и периода рефрактерности ФП становится персистирующей, когда у кругов макрориентри возникает способность поддерживать себя самостоятельно, без участия триггеров.

Электрофизиологическое ремоделирование может как быть, так и не быть связано с анатомическим ремоделированием. Источники ФП чаще расположены в ЛП, где впадают четыре легочных вены и откуда исходит большая часть триггеров ФП. Известно, что причины, вызывающие начало ФП, включают в себя факторы, которые запускают аритмию и субстрат, который ее поддерживает.

Пошаговый (визуальный) анализ МКГ предполагает, в основном, оценку функционирования миокарда на основе опыта эксперта при сравнении реальных визуальных образов и характеристик исследуемой записи МКГ-сигнала с соответствующими их образцами и характеристиками для заведомо здорового испытуемого. Однако часто, даже для эксперта, наличие автоматического заключения информационной системы МКГ является полезной информацией при постановке или уточнении диагноза, особенно в случаях анализа больших объемов данных МКГ. В программном обеспечении магнитокардиографа SoftMAG предусмотрена возможность автоматического сбора числовой информации в специальные текстовые файлы для построения таблиц параметров, необходимых для поиска правил классификации. Большинство числовых параметров определяется для каждой отдельной карты магнитного поля или карты распределения токов [4; 5].

Настоящая работа посвящена исследованию возможности технологии автоматической классификации групп пациентов с использованием магнитокардиографии в диагностике поражения предсердий.

**Материал и методы.** В нашем исследовании был выполнен анализ магнитокардиографических данных для трех групп пациентов. В первую вошли 31 МКГ запись здоровых волонтеров, которые не имели «истории» какой-либо болезни

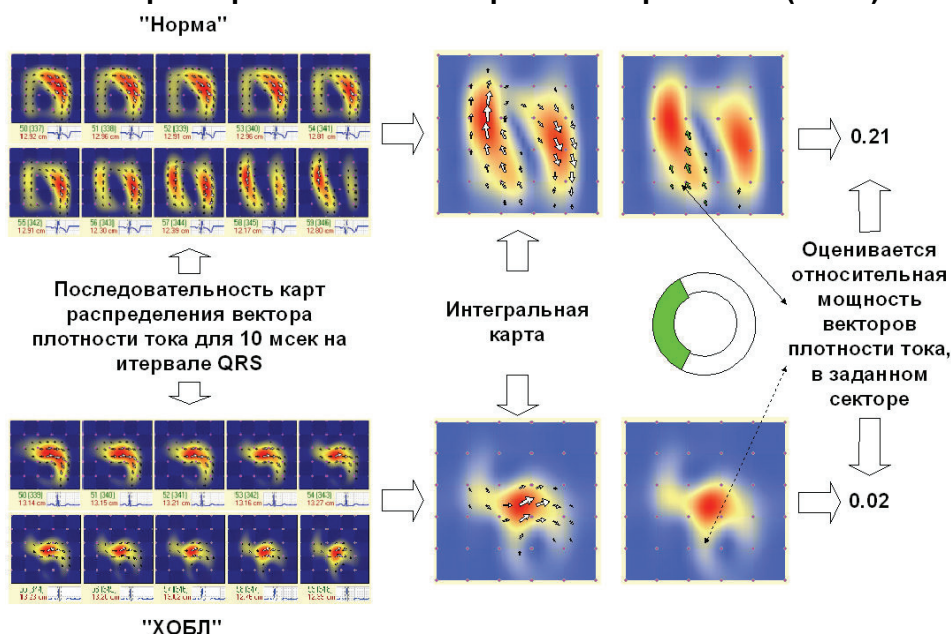
сердца. Во вторую группу вошли 45 МКГ записей для пациентов, у которых установлена хроническая обструктивная болезнь легких (ХОБЛ). Третья группа включала 58 МКГ записей пациентов с ишемической болезнью сердца.

После регистрации и анализа МКГ пациентов с помощью программного обеспечения магнитокардиографа «МАГ-СКАН» в автоматическом режиме были получены файлы параметров. Этот набор параметров был исследован с помощью пакета статистической обработки «STATISTIKA». Устойчивость работы алгоритма классификации проверена на тестовых выборках и с помощью стандартных алгоритмов кросс-оценок. Причем на первом этапе исследований группа 1 включала только МКГ «норма», а в группу 2 входили пациенты с ХОБЛ и ИБС.

**Полученные результаты.** Решающее правило включало следующие параметры: 1) параметр изменения интегральной карты токов (ПИКТ), характеризующий изменения структуры (величин векторов; направления векторов; пространственное распределение в границах области измерений) карты распределения вектора плотности токов за каждые 10 мсек исследуемого интервала кардиокомплекса; 2) параметр «МКГ отведение» (МКГО), который характеризует в относительных единицах степень отличия МКГ кривой исследуемого пациента от такой же зависимости для «нормы» в найденный момент времени кардиоцикла; 3) параметр корреляции направления токов (ПКНТ) — определяется как значение корреляции между графической зависимостью изменения направления вектора максимальной плотности токов на интервале ST-T для исследуемого пациента и «средней нормы».

На рис. 1—3 в графическом виде показан алгоритм получения параметров решающего правила для одного из волонтеров группы «норма» и пациента группы «ХОБЛ».

### 1. Параметр изменения интегральной карты токов (ПИКТ)



**Рис. 1.** Алгоритм вычисления первого параметра в решающем правиле (характеризует изменения структуры карты распределения вектора плотности токов за время 10 мсек)

## 2. Параметр «МКГ отведение» (МКГО)

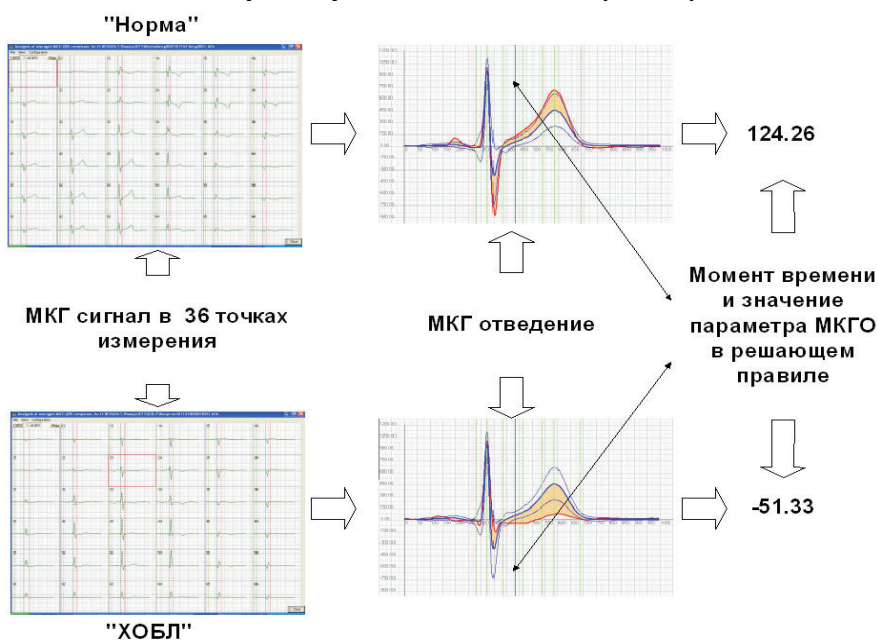


Рис. 2. Определение второго параметра решающего правила по данным МКГ отведения

## 3. Параметр корреляции направления токов (ПКНТ)

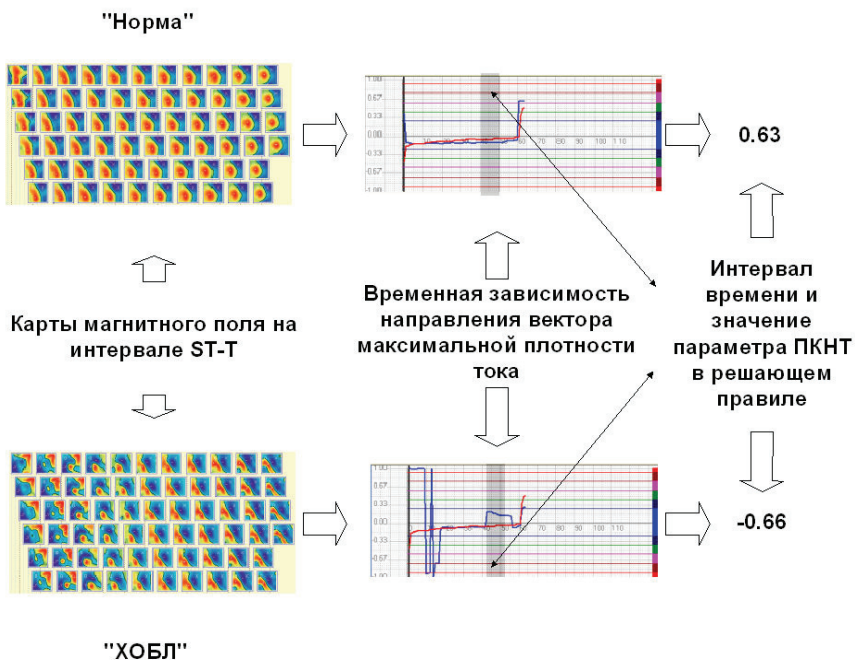


Рис. 3. Алгоритм поиска третьего параметра решающего правила при сравнении графических зависимостей изменения направления вектора максимальной плотности тока для «нормы» и исследуемого пациента

Заметим, что для получения решающего правила наиболее подходящим являются линейные дискриминантные функции (ЛДФ). В данном исследовании был использован пошаговый дискриминантный анализ «с включением». Для данных исследуемых групп пациентов было найдено решающее правило в виде функции имеющей, вид:

Группа «1» — «норма

$$A_1 = -3,58715 + (23,95487) \times \text{ПИКТ}(17) + 0,01628 \times \text{МКГО}(435) + 1,38477 \times \text{ПКНТ}(8).$$

Группа «2» — «ХОБЛ» + «ИБС»

$$A_2 = -1,10404 + 7,32162 \times \text{ПИКТ}(17) + (-0,00926) \times \text{МКГО}(435) + (-0,46518) \times \text{ПКНТ}(8).$$

Понятно, что название параметров для первой и второй групп в этой функции одинаковы — различны их значения и соответствующие коэффициенты. Пусть мы исследуем нового пациента и получили для него (это автоматически считает программное обеспечение магнитокардиографа) свои индивидуальные значения параметров ПИКТ, МКГО и ПКНТ. К какой группе этого пациента отнести? Формально программа автоматически считает по приведенным формулам решающего правила значения классификационной функции  $A_1$  и  $A_2$  и их сравнивает. Исследуемый пациент относится к той группе, для которой классификационное значение ( $A_1, A_2$ ) максимально. Другими словами,

если  $A_1 > A_2$  — «группа 1»,

если  $A_2 > A_1$  — «группа 2».

В результате использования данного подхода были получены следующие результаты классификации при обработке 134 МКГ записей (группы «норма», «ХОБЛ + ИБС») (табл. 1).

Таблица 1

**Результаты классификации записей групп «норма» и «ХОБЛ + ИБС»**

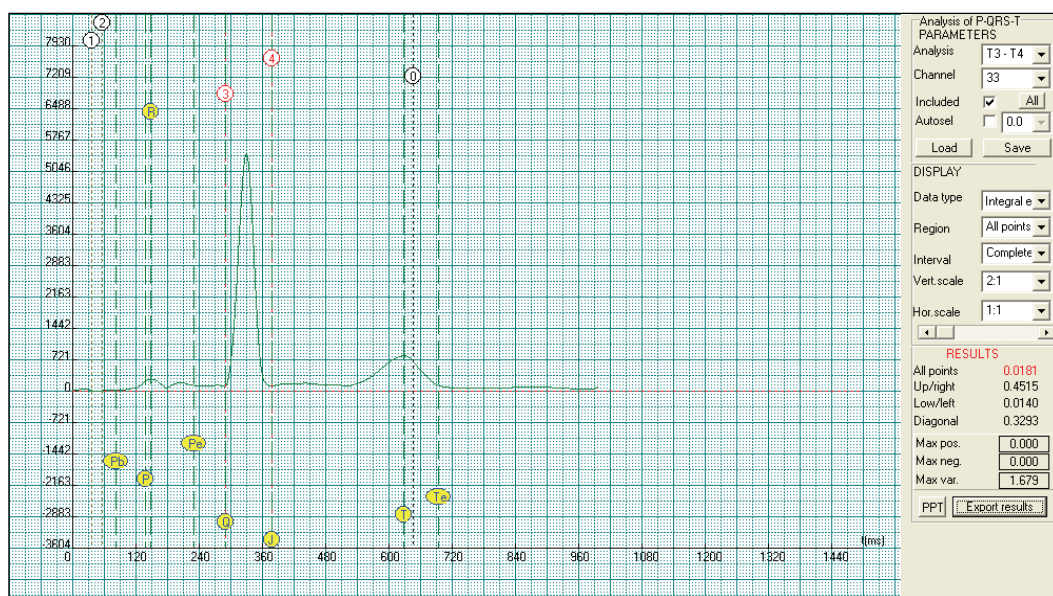
Параметры	Средние значения и стандартное отклонение		Статистическая значимость (p-value)
	Группа 1	Группа 2	
ПИКТ	0,204 ± 0,123	0,067 ± 0,084	7,4 × 10 <sup>-11</sup> 2,2 × 10 <sup>-5</sup> 3,2 × 10 <sup>-4</sup>
МКГО	40,304 ± 50,176	-16,243 ± 46,089	
ПКНТ	0,163 ± 0,523	-0,116 ± 0,420	
Результаты автоматической классификации групп «норма» — «ХОБЛ + ИБС»	23 записей (17,03%) отнесены в группу 3 TP = 79 FN = 8 TN = 22 FP = 2 Группа «3» — «пограничные»	Sensitivity Se Positive Predictivity +P Specifity Sp False Positive Rate FPR Negative Predictivity -P	TP\ (TP+FN) 90,80% TP\ (TP+FP) 97,53% TN\ (TN+FP) 91,67% FP\ (TN+FP) 8,33% TN\ (TN+FN) 73,33%

На втором этапе исследовалась возможность поиска решающего правила для классификации групп пациентов с ХОБЛ и ИБС. При этом алгоритм предварительного анализа и обработки данных состоял в следующем:

— в программе анализа усредненных МКГ кардиокомплексов (закладка «энергия», см. рис. 4) для каждой МКГ записи на зубце «Р» выделяется временной интервал длительностью 104 мсек. При этом курсор с маркером «R» совпадает с узловой точкой «Р»;

— записывается файл данных с помощью пункта меню программы «File» — «Save» — «(R-42) — R — (R+61)» для каждой МКГ.

В результате для каждой МКГ записи для исследований и анализа выделяется временной интервал в 104 мсек. таким образом, что точка с номером 41 соответствует узловой точке «Р» усредненного кардиокомплекса.



**Рис. 4.** Пример графической зависимости изменения энергии магнитного поля в границах области измерений за время одного усредненного кардиокомплекса МКГ

Далее для выделенного временного интервала каждой МКГ записи были выполнены в автоматическом режиме решения обратной задачи магнитостатики для дипольной модели источника кардиомагнитного сигнала и для источника поля в виде системы токов распределенной в плоскости (или N плоскостях), параллельной плоскости измерений. Результаты статистического анализа показывают, что решающее правило для классификации групп пациентов с ХОБЛ и ИБС может иметь четыре информационных параметра:

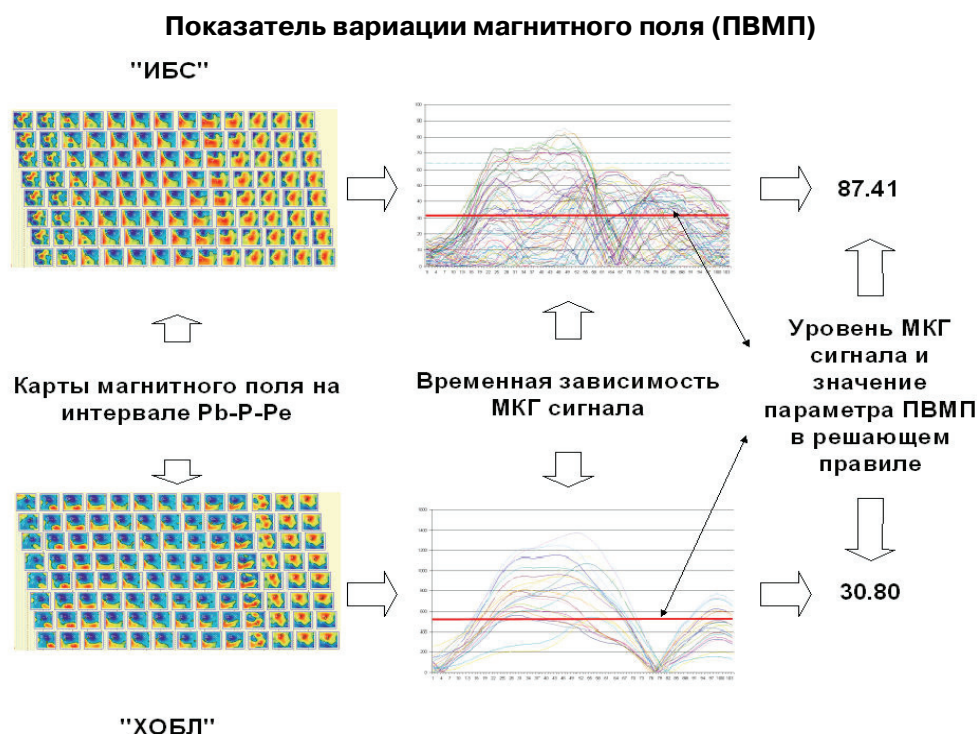
1 — показатель вариации магнитного поля (ПВМП), который характеризует процент превышения заданного уровня магнитного поля на всем временном интервале (104 мсек), в точках плоскости измерений каждой магнитной карты. На рис. 5 показан алгоритм получения этого параметра в графическом виде.

2 — параметр инверсий (ПИ), который определяется на интервале 2—40 мсек. Причем значение этого параметра принимается равным единице, если максимальное значение МКГ сигнала для исследуемого момента времени меньше чем значение для предыдущего момента времени; в остальных случаях его величина равна нулю. Алгоритм вычисления этого параметра представлен на рис. 6.

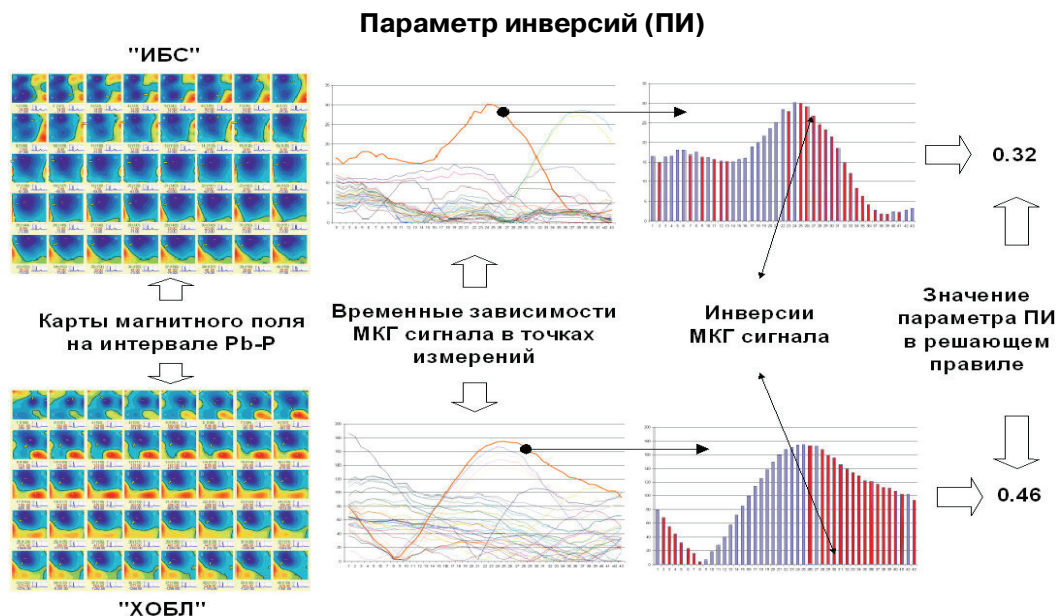
3 — параметр изменения интегральной карты токов (ПИКТ), характеризующий изменения структуры (величин векторов; направления векторов; пространственное распределение в границах области измерений) карты распределения вектора плотности токов за время 10 мсек. (на зубце «Р», в данном случае). Алгоритм получения этого параметра аналогичен рис. 1.

4 — параметр интегрального минимума магнитного поля (ИМП), который определяется для каждой карты магнитного поля после выделения в заданных точках плоскости соответствующих отрицательных значений, их суммировании и нормировки на общее количество узлов сетки измерений. Последовательность вычисления этого параметра показана на рис. 7.

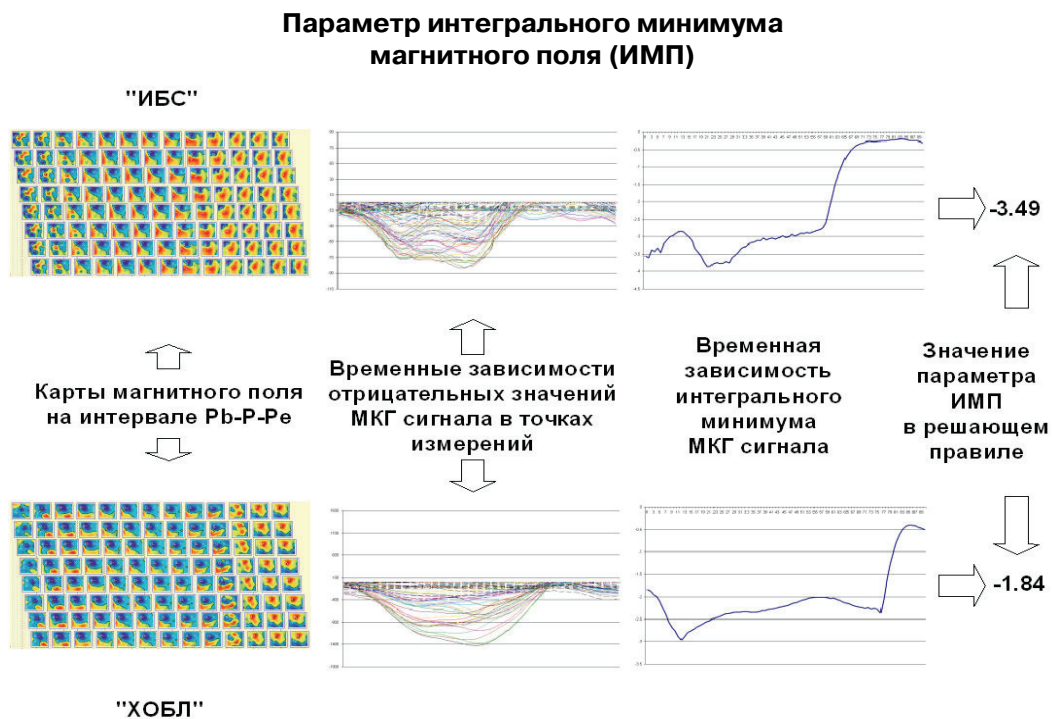
Результаты применения описанного решающего правила для обработки 104 МКГ записей (группы ХОБЛ и ИБС) приведены в табл. 2.



**Рис. 5.** Схема преобразования магнитометрической информации при получении первого параметра второго правила классификации



**Рис. 6.** Алгоритм получения второго параметра правила для автоматической классификации пациентов групп «ХОБЛ» и «ИБС»



**Рис. 7.** Графическое представление получения четвертого параметра решающего правила для классификации групп пациентов «ХОБЛ» и «ИБС»



**Результаты применения решающего правила для обработки 104 МКГ записей (группы ХОБЛ и ИБС)**

Параметры	Средние значения и стандартное отклонение		Статистическая значимость (p-value)	
	Группа 1	Группа 2		
ПВМП	45,815 ± 13,189	67,998 ± 14,909	3,4 × 10 <sup>-12</sup>	
ПИ	0,382 ± 0,075	0,321 ± 0,079	6,4 × 10 <sup>-4</sup>	
ПИКТ	0,851 ± 0,163	0,865 ± 0,186	4,5 × 10 <sup>-4</sup>	
ИМП	-1,760 ± 0,925	-2,267 ± 0,865	2,2 × 10 <sup>-3</sup>	
Результаты автоматической классификации групп	TP = 39	Sensitivity Se	TP/(TP+FN)	86,67%
	FN = 6	Positive Predictivity +P	TP/(TP+FP)	95,45%
	TN = 52	Specifity Sp	TN/(TN+FP)	84,78%
	FP = 7	False Positive Rate FPR	FP/(TN+FP)	11,86%
		Negative Predictivity -P	TN/(TN+FN)	91,67%

Таким образом, полученные данные свидетельствуют о достаточно высокой диагностической ценности применения метода МКГ для классификации групп пациентов с ХОБЛ и ИБС.

Несмотря на уже достаточно длительное исследование метода, больших исследований Р-зубца с использованием МКГ до сих пор организованы не было. Это обусловлено, в первую очередь, не всегда достаточным для анализа соотношением сигнал/шум и, во-вторых, не всегда совпадающей визуальной интерпретацией имеющих изменений среди специалистов.

Соответственно, к сожалению, визуальный анализ магнитокардиографических карт имеет существенные недостатки, свойственные визуальной классификации любых медицинских изображений. К этим недостаткам относится необходимость довольно длительного периода обучения и относительно слабая воспроизводимость результатов. Поэтому мы в настоящее время предпринимаем усилия по созданию программного обеспечения для анализа магнитокардиографических карт, основанного на современных методах искусственного интеллекта.

Несомненно, магнитокардиографический метод обладает значительным потенциалом роста в диагностике поражения миокарда предсердий. Необходимы дальнейшие усовершенствования как технических, так и клинических аспектов технологии, особенно когда речь идет о магнитокардиографии в незранированном помещении. Одним из шагов в этом направлении является комплексное исследование электрических процессов в миокарде (МКГ и ДК) на примере группы больных с артериальной гипертонии [3; 6; 7].

Исследования, посвященные сравнению морфологических особенностей предсердий у пациентов с ФП и без нее, свидетельствуют о резком увеличении фиброзной ткани в области синоатриального узла и значительное ее увеличение внутри дилатированных стенок ЛП [3]. Однако и в настоящее время неинвазивных технологий для этой диагностики крайне мало. Метод магнитокардиографии может дать новую диагностическую информацию по электрофизиологическому ремоделированию предсердий.

Совершенствование методов МКГ и ЭКГ-диагностики, разработка надежных неинвазивных показателей электрической гетерогенности миокарда, анализ электрической нестабильности представляет актуальную клиническую задачу для кардиологии и заслуживает большего внимания клиницистов.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Бокерия Л.А., Шенгелия Л.Д. Механизмы фибрилляции предсердий: от идей и гипотез к эффективному пониманию проблемы // *Анналы аритмологии*. 2014. Т. 11. № 1. С. 4—14.
- [2] Бокерия Л.А., Филатов А.Г., Ковалев А.С. Сравнительный анализ эффективности расширенной радиочастотной абляции зон функционального субстрата при различных формах фибрилляции предсердий // *Анналы аритмологии*. 2013. Т. 10. № 2. С. 111—120.
- [3] Кузнецова С.Ю., Примин М.А., Недайвода И.В., Масленников Ю.В., Иванов Г.Г. Автоматическая классификация пациентов с гипертонической болезнью сердца при магнитокардиографическом обследовании // *Функциональная диагностика*. 2011. № 1. С. 34.
- [4] Primin M.A., Nedayvoda I.V., Maslennikov Yu.V., Gulyaev Yu.V. Software for the Magnetocardiographic Complex for the Early Diagnostics and Monitoring of Heart Diseases // *J. of Commun. Technology and Electronics*. 2010. Vol. 55. No. 10.
- [5] Primin M., Nedayvoda I. Inverse problem solution algorithms in magnetocardiography: new analytical approach and some results // *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*. 2009. Vol. 29. N 2. P. 65—81.
- [6] Иванов Г.Г., Кузнецова С.Ю., Примин М.А. Нарушения электрофизиологических свойств миокарда у больных артериальной гипертонией по данным комплекса новых методов ЭКГ-диагностики (магнитокардиография и дисперсионное картирование // *Функциональная диагностика*. 2011. Т. 4. С. 58.
- [6] Wakili R., Voigt N., Kääh S. et al. Recent advances in the molecular pathophysiology of atrial fibrillation // *J. Clin. Invest.* 2011; 121 (8): 2955—68. DOI: 10.1172/JCI46315.

## **AUTOMATIC CLASSIFICATION OF PATIENT GROUPS USING MAGNETOCARDIOGRAPHY IN THE DIAGNOSIS OF THE ATRIA LESIONS IN PATIENTS WITH CHRONIC OBSTRUCTIVE PULMONARY DISEASE AND CORONARY HEART DISEASE**

**G.G. Ivanov<sup>1,2</sup>, N.A. Bulanova<sup>1,2</sup>, V.A. Vostrikov<sup>1,2</sup>,  
V.E. Dvornikov<sup>2</sup>, N.A. Chuiko<sup>2</sup>, G. Halabi<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Department of cardiology SIC  
The first Moscow medical University n.a. I.M. Sechenov  
*Trofimov str., 26-2, Moscow, Russia, 109432*

<sup>2</sup>Department of hospital therapy  
Peoples' Friendship University of Russia  
*Miklukho-Maklaya str., 8, Moscow, Russia, 117198*

**Yu.V. Maslennikov**  
CRYOTON Co. Ltd., Moscow  
*Lesnaya str., 4B, Troitsk, Moscow, Russia, 142190*

**M.A. Prinin, I.V. Nedaivoda**  
The Glushkov's Institute of Cybernetics of NAS, Kyiv, Ukraine, 03680

**S.Yu. Kuznetsova, V.N. Gunava**  
Polyclinic № 3 of the Central clinical hospital of RAS  
*Fotievoy str., 12-3, Moscow, Russia, 117333*

The work is devoted to study the possibilities of automatic classification of patient groups using magnetocardiography (MCG) in the diagnosis of lesions of the atria. Analyzed magnetocardiographic data for the three groups of patients. The first group included 31 MCG record healthy volunteers. The second

group — 45 MCG records of patients with chronic obstructive pulmonary disease (COPD). The third group — 58 MG records of patients with coronary heart disease (CHD). Statistical analysis showed that the decision rule for classification of patients with COPD and IHD can have four information parameter: 1 — the rate of variation of the magnetic field (RVMF), which characterizes the percentage of exceeding a given level of magnetic field in the whole time interval (104 msec), points on the plane dimensions of each magnetic card. 2 — parameter inversion (PI), which is defined on the interval 2—40 msec. 3 — parameter changes integrated map currents (ICT) characterizing changes in the structure (the values of vectors; directions of vectors; spatial distribution within the boundaries of the field measurements) distribution maps of vector current density during msec (on P wave in this case). 4 — parameter integral of the minimum magnetic field (PIMF).

**Key words:** Magnetocardiography, P wave, chronic obstructive pulmonary disease, paroxysmal form of atrial fibrillation.

### REFERENCES

- [1] Bokeria L.A., Shengelia L.D. The mechanisms of atrial fibrillation: the ideas and hypotheses to effective understanding of the problem. *Annals arrhythmology*. 2014. Vol. 11. N 1. P. 4—14.
- [2] Bokeria L.A., Filatov A.G., Kovalev A.S. Comparative analysis of the effectiveness of the extended-radiofrequency ablation of functional substrate zones in various forms of atrial fibrillation. *Annals arrhythmology*. 2013. Vol. 10. N 2. P. 111—120.
- [3] Kuznetsova S.Yu., Primin M.A., Nedayvoda I.V., Maslennikov Yu.V., Ivanov G.G. Automatic classification of patients with hypertensive heart disease with magnetocardiographic examination // *Functional diagnostics*. 2011. № 1. P. 34.
- [4] Primin M.A., Nedayvoda I.V., Maslennikov Yu.V., Gulyaev Yu.V. Software for the Magnetocardiographic Complex for the Early Diagnostics and Monitoring of Heart Diseases. *J. of Communic. Technology and Electronics*. 2010. Vol. 55. N 10.
- [5] Primin M., Nedayvoda I. Inverse problem solution algorithms in magnetocardiography: new analytical approach and some results. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*. 2009. Vol. 29. N 2. P. 65—81.
- [6] Ivanov G.G., Kuznetsova S.Yu., Primin M.A. Violations of electrophysiological properties of myocardium in hypertensive patients according to complex new methods of ECG diagnosis (Magnetocardiography and dispersion mapping). *Functional diagnostics*. 2011. Vol. 4. P. 58.
- [7] Wakili R., Voigt N., Kääh S. et al. Recent advances in the molecular pathophysiology of atrial fibrillation. *J. Clin. Invest.* 2011; 121 (8): 2955—68. DOI: 10.1172 / JCI46315.