

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС «ПРАВОЕ СЕРДЦЕ – ЛЕГОЧНАЯ ЦИРКУЛЯЦИЯ» КАК КАРДИОДИНАМИЧЕСКИЙ ОБЪЕКТ ИМПЕДАНСОМЕТРИИ ПРИ ТЕТРАПОЛЯРНОЙ ГРУДНОЙ РЕОГРАФИИ

Белкания Г.С.¹, Диленян Л.Р.^{2,3}, Собоотницкий А.⁴, Костенко Н.П.⁵, Траханов А.А.², Гвинджилия И.В.⁶, Рыжаков Д.И.³, Пшеничный А.Ю.², Пухальская Л.Г.⁷

¹Лаборатория медицинских экспертных систем «Антропос Системс Лэб.», Украина, belkaniy@mbox.vn.ua;

²Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Россия;

³Нижегородская государственная медицинская академия, Россия;

⁴Институт медицинской техники и аппаратуры, г. Забже, Польша;

⁵Винницкий национальный медицинский университет, Украина;

⁶Лечебно-оздоровительный центр «Антропос», Тбилиси, Грузия;

⁷Варшавский медицинский университет, Польша

Сложившаяся ситуация по использованию в клинической практике тетраполярной грудной реографии рассматривается как следствие незавершенности кардиодинамического обоснования объекта импедансометрии. Приводятся данные собственных экспериментальных и клинических исследований с катетеризацией правых отделов сердца, легочной артерии, грудной аорты и с параллельной регистрацией грудной реограммы, электрокардиограммы, фонокардиограммы при разных условиях регистрации и состояниях. Рассматриваются свидетельства того, что кардиодинамической основой импедансометрии при грудной реографии является функциональный блок правого сердца и легочного кровообращения. На основании проведенного фазового сопоставления кардиодинамических характеристик, полученных реографическим и референтными методами, представлен алгоритм фазового анализа сердечного цикла по реокардиокомплексу.

Ключевые слова: импедансометрия, грудная реография, кардиодинамика, правое сердце, легочная циркуляция, катетеризация, фазовый анализ

FUNCTIONAL COMPLEX “RIGHT HEART – PULMONARY CIRCULATION” AS CARDIODYNAMIC OBJECT OF IMPEDANCE METERY IN TETRAPOLAR CHEST RHEOGRAPHY

Belkaniya G.S.¹, Dilenyan L.R.^{2,3}, Sobotnicki A.⁴, Kostenko N.P.⁵, Trakhanov A.A.², Ghvinjilia I.W.⁶, Ryzhakov D.I.³, Pshenichnyi A.Y.², Puchalska L.G.⁷

¹Laboratory of Medical Expert System «Anthropos Systems Lab.», Ukraine, belkaniy@mbox.vn.ua;

²Nizhny Novgorod State Technical University, Russia;

³Nizhny Novgorod State Medical Academy, Russia;

⁴Institute of Medical Technology and Equipment ITAM, Zabrze, Poland

⁵Vinnitsa National Medical University, Ukraine;

⁶Medical practice and health center “Anthropos”, Tbilisi, Georgia;

⁷Warsaw Medical University, Poland

The current situation for the use of tetrapolar chest rheography in clinical practice is seen as a consequence of incompleteness of cardiodynamic justification, in fact, of the impedance meter object. Data of own experimental and clinical studies with right heart catheterization, pulmonary artery and thoracic aorta and parallel registration of thoracic rheogram electrocardiogram phonocardiograms under different positions of registration and conditions are given. The evidence is given that cardiodynamic basis of impedance metery in chest rheography is a functional block of the right heart and pulmonary circulation. The represented algorithm of phase analysis of cardiac cycle obtained with reocardiocomplex is based on the comparison of cardiodynamic characteristics obtained with rheographic and reference methods.

Keywords: impedance metery, chest rheography, cardiodynamic, right heart, pulmonary circulation, catheterization, phase analysis

Изначально метод тетраполярной грудной реографии был разработан для определения ударного объема сердца (УОС) и минутного (МОК) сердечного выброса [24, 25,26]. Метод

был успешно апробирован в сопоставлении с эталонными методами определения МОК (метод Фика, индикаторно–дилуционные методы) и стал широко использоваться в экспериментальной и клинической практике. Однако на определенном этапе проявилось достаточно сдержанное отношение к дальнейшему использованию именно грудной реографии, как метода определения УОС и МОК. Одной из причин тому была сохраняющаяся неопределенность в идентификации кардиодинамического объекта импедансометрии и соответствия его характеристик временным и амплитудным отношениям по основным фазам реального сердечного цикла. Начали появляться публикации, в которых ставились под сомнения результаты определения сердечного выброса с использованием грудной реографии.

Разработка нами методик и использование реографии в экспериментальных (обезьяны, собаки, кролики, морские свинки, крысы, мыши и лягушки) исследованиях [2-6, 12] и в клинической (дети, мужчины и женщины разного возраста, беременные, здоровые и больные) практике [1, 4-11, 13, 14, 16, 21, 27] было начато несколько десятков лет назад и, прежде всего, с ответов на два основных и взаимосвязанных вопроса. Первый – отражением какого гемодинамического субстрата является кардиокомплекс грудной дифференциальной реограммы (РЕОдифф), второй – четкая идентификация амплитуды систолической волны РЕОдифф и длительности периода изгнания, которые являются основными динамическими компонентами в расчете величины УОС при тетраполярной грудной реографии.

Представление о том, что грудная РЕОдифф является отражением легочной гемодинамики и функционального связанного с ним правого сердца, имеет принципиальное значение, если при грудной реографии не ограничиваться только определением УОС, а рассмотреть возможности фазового анализа сердечного цикла по неинвазивно наименее доступным для этого правым отделам сердца. В свою очередь, именно идентификация фаз сердечного цикла позволила определиться с ключевым элементом для адекватного расчета УОС – определение момента начала сердечного выброса и амплитуды систолической волны по РЕОдифф, а также расширить информационные возможности оценки кардиодинамики за счет определения амплитудных и временных характеристик фаз сердечного цикла.

Поэтому, кроме ясности в представлении о кардиодинамическом субстрате грудной реограммы, для определения амплитуды систолической волны РЕОдифф и длительности периода изгнания необходима идентификация момента начала сердечного выброса (на всех рисунках по пересечению кривой РЕОдифф с вертикальным маркером «З»), подчеркиваем, из правого желудочка в легочную артерию. Насколько существенной может быть ошибка расчета УОС при неправильной идентификации и определении амплитуды систолической волны грудной РЕОдифф демонстрирует приведенный, по нашим данным, набор

индивидуальных кардиокомплексов РЕОдифф у пациентов с разными состояниями (рис. 1). Все грудные РЕО-кардиокомплексы упорядочены по началу сердечного выброса (точка «В») на пересечении с линией вертикального маркера 3.

На рисунке по первой и началу второй линии (сверху вниз) хорошо видна группа кардиокомплексов грудной РЕОдифф с очень четкой идентификацией начала сердечного выброса (точка «В») и соответственно систолической волны («А»), что позволяет уверенно определить ее амплитуду (Адифф). При этом отсутствует или определяется небольшая пресистолическая волна («а»), а начало сердечного выброса (точка «В») находится практически на изоэлектрическом уровне кривой РЕОдифф. Это именно те случаи, при которых определение точки «В» по пересечению изоэлектрической линии калибровки и записи реограммы, как часто и практикуется при определении Адифф, совпадает с определением по кардиодинамически обоснованному «фазовому» алгоритму идентификации начала сердечного выброса по систолической волне РЕОдифф.

Такие формы кардиокомплексов РЕОдифф в большей части встречаются у детей, молодых и здоровых людей, у женщин. Собственно, у той категории лиц, с исследований которых и осуществлялась изначальная разработка метода тетраполярной грудной реографии. Понятно, что при более четких по форме реокардиокомплексах усиливается и вероятность точного определения элементов сердечного цикла по грудной РЕОдифф, включая идентификацию точки «В» (начала сердечного выброса) и соответственно определение амплитуды систолической волны (Адифф) и периода изгнания.

Самые разнообразные и сложные для идентификации кардиокомплексы РЕОдифф могут быть кардиодинамическим отражением особенностей конституции тела (астеническая, нормостеническая, гиперстеническая, ожирение), базового соматического состояния (возрастные изменения, утомление, фазы менструального цикла, беременность), а также при разных функциональных состояниях и условиях регистрации грудной реограммы (время суток, положение тела, режимы и фазы дыхания). Сложные по структуре систолические комплексы РЕОдифф с соответствующими сложностями идентификации информативных элементов (см. рис. 1) могут быть при любых соматических состояниях, при которых, как правило, всегда в той или иной степени задействована сердечно-сосудистая система, в том числе и при приеме лекарственных средств, и, наконец, собственно сердечно-сосудистая патология, особенно, сердечные аритмии.

Приведенные образцы кардиокомплексов грудной РЕОдифф четко демонстрируют принципиальное положение для идентификации точки «В» на кардиокомплексе РЕОдифф – физический «0» записи реограммы (изоэлектрический уровень) не совмещается с физиологическим «0» (начало сердечного выброса из правого сердца). Этот уровень является

«0» только для калибровочного сигнала реограммы. Потому отсчет Адифф от изоэлектрического уровня является ошибочным, а точка «В», как физиологический «0» для сердечного выброса, может очень существенно смещаться по отношению к изоэлектрическому уровню (физический «0») реограммы. Причем, различная форма систолической части кардиокомплекса РЕОдифф и соответственно разное положение точки «В» (начало сердечного выброса в легочную артерию), в том числе и по отношению к изоэлектрическому (нулевому) уровню, определяется целым комплексом внутрисердечных факторов и внесердечных условий и отражает различия в состоянии насосной функции правого сердца и легочной гемодинамики.

Следует отметить, что именно ориентир на изоэлектрический уровень для расчета амплитудных показателей грудной РЕОдифф (рис. 2) был использован в большинстве аппаратных комплексов с автоматизированной обработкой реограмм [17, 18, 20]. При этом не акцентировалось внимание на топическое соответствие РЕО-кардиокомплекса правому или левому сердцу, а использовалось такое размытое определение, как сократительная функция сердца. Да и сам используемый показатель, кроме сомнительного отсчета амплитудных характеристик от изоэлектрического уровня, был весьма неоднородным по своим расчетным составляющим. Но главное и принципиальное ограничение – ориентация на изоэлектрический уровень нивелирует фазовые соотношения по сердечному циклу и различия по Адифф, как одной из основных характеристик насосной функции правого сердца.

Это на приведенном рисунке 1 кардиоциклы РЕОдифф упорядочены по точке «В» – началу сердечного выброса. На реальной грудной реограмме без однозначного представления о кардиодинамической основе грудного РЕО-кардиокомплекса, необходимой общей ориентации в фазах сердечного цикла, а значит, и четкой идентификации амплитудных и временных элементов ориентироваться гораздо сложнее. При этом следует иметь в виду не только рассмотренные элементы РЕОдифф, а необходимость идентификации и определения и других фазовых и амплитудных характеристик по всему сердечному циклу. Отсутствие такого представления и необходимых кардиодинамических ориентиров в значительной мере и явилось причиной ограниченного использования реографии в клинической практике.

В проведенных нами исследованиях (рис. 3) уже сопоставление электрокардиограммы (ЭКГ), фонокардиограммы (ФКГ) с кривыми грудной реограммы – основной (РЕО), с первой производной (по скорости) дифференциальной реограммы (РЕОдифф_1) и второй производной (по ускорению) дифференциальной реограммы (РЕОдифф_2) позволили, во-первых, идентифицировать по РЕОдифф_1 начало сердечного выброса в легочную артерию

и, соответственно, точку «В» (по линии пересечения вертикального маркера 3 с анакротой РЕОдифф_1). Именно это точка является началом отсчета амплитуды систолической волны (Адифф). Во-вторых, такое сопоставление позволило идентифицировать основные фазы сердечного цикла по кардиокомплексу РЕОдифф_1. Использование РЕОдифф_2 усилило аналитические возможности проведенного фазового анализа кардиодинамики.

Четкое соответствие по использованному нами алгоритму идентификации и маркировки основных фаз сердечного цикла и именно по правому сердцу, включая и начало сердечного выброса крови в легочную артерию, определяется при сопоставлении с приведенными на рис. 4 данными эхокардиографии правого сердца [19]. Исходя из такого сопоставления, выброс крови из правого сердца возможен только после открытия полулунных клапанов легочной артерии, а поэтому и точка «В» систолической волны грудной РЕОдифф соответственно началу расхода крови по легочной артерии будет после зубца S (или QRS) на ЭКГ и после I тона ФКГ. Все остальные соответствия фаз сердечного цикла хорошо определяются на рисунке, особенно те из них, для которых критическим условием является состояние клапанного аппарата. Для фазы изоволюмического сокращения (интервал 2-3) это закрытые клапаны легочной артерии и трехстворчатый клапан. Для начала выброса крови из правого желудочка это открытие полулунных клапанов (3) и на протяжении всего периода изгнания (интервал 3-4). Для фазы изоволюмического расслабления (интервал 4-5) это закрытые клапаны легочной артерии и трехстворчатый клапан.

Нами разделяется представление [22] о том, что гемодинамическим механизмом пресистолической волны является начальное в фазе изоволюмического напряжения миокарда еще до открытия клапанов перемещение объема крови в легочных сосудах в результате передаваемого через клапаны нарастающего внутрижелудочкового давления (продавливание створок еще не раскрывшегося полулунного клапана). Такая выраженность и многообразие форм проявления на РЕОдифф (рис. 1) пресистолической волны связано с тем, что кардиодинамика по правому сердцу реализуется, в отличие от большого круга кровообращения (БКК), в системе легочных сосудов – в системе низкого давления. Во всяком случае, значительно меньшем давлении, чем в системе сосудов БКК. При этом следует иметь в виду, что систолические возможности правого желудочка сердца значительно меньшие, чем левого желудочка.

Отсюда высокая чувствительность кардиодинамики по правому сердцу и легочному кровотоку к изменениям внутрилегочного давления, моментально отражающимся на внутрисосудистом давлении по малому кругу кровообращения (МКК). Подтверждением тому являются имеющиеся данные [22] о высокой зависимости амплитудных и фазовых характеристик и давления в легочной артерии и грудной реограммы от изменений

внутрилегочного давления при тестовых форсированных натуживаниях (пробы Вальсальвы-Бюргера). Не менее убедительными для объяснения такой динамичности кровотока в системе сосудов легочной артерии и соответственно ее отражения на пресистолической волне грудной РЕОдифф, как в системе низкого давления, являются и наши данные по регистрации грудной РЕОдифф при обычных задержках дыхания на вдохе ($2/3$ от максимального) и обычном глубоком выдохе (без натуживания).

На представленном рисунке 5 видно, что на РЕОдифф_1 при задержке дыхания на вдохе соответственно снижению внутригрудного, а значит и внутрилегочного давления отмечается небольшая пресистолическая волна по периоду напряжения (интервал 1-3) и четкая высокоамплитудная систолическая волна. В отличие от этого, на выдохе соответственно повышению внутригрудного и внутрилегочного давления отмечается и выраженное увеличение пресистолической волны с увеличением продолжительности фазы изоволюмического сокращения (интервал 2-3). При этом амплитуда систолической волны РЕОдифф уменьшается по сравнению с вдохом более чем в 2 раза вместе с уменьшением и длительности периода изгнания. Совершенно очевидным является и выраженное уменьшение величины УОС. Следует особо отметить, если при разных режимах дыхания на грудной реограмме (система низкого давления по МКК) отмечалась выраженная эволюция пресистолической волны и соответственно Адифф, то на реограмме головы и других периферических отведениях (система высокого давления по БКК) подобные изменения отсутствовали.

Высокая чувствительность пресистолической волны к изменениям внутригрудного и внутрилегочного давления при задержках дыхания в режимах «вдох–выдох» позволяет использовать их не только в качестве дыхательных проб, но и как дополнительный методический прием для дифференцированной идентификации пресистолической и систолической волны РЕОдифф и, соответственно, индикации начала систолической волны (сердечного выброса), т.е. точки «В».

С одной стороны, насколько сложным для анализа может быть кардиокомплекс РЕОдифф, а, с другой стороны, насколько чувствительной является кардиодинамика по легочному кровотоку (система низкого давления) и правому сердцу (систолически более слабому, чем левое сердце) являются наши данные по динамике изменений пресистолической и систолической волн РЕОдифф у обезьян (макаки резусы) на фоне острого системного (по БКК и МКК) повышения давления при внутривенном введении мезатона (в дозе 0.1 мл 0.1% раствора на 1 кг массы тела).

Первичный сосудистый адреномиметический эффект действия мезатона у обезьян сопровождался острым и быстротечным повышением системного давления (АДср) на 20-

79%, повышением сосудистого сопротивления и уменьшением периферического артериального кровотока (уменьшение Адифф на реограммах головы, плеча и голени). При этом в части опытов выраженное уменьшение частоты сердечных сокращений отражало включение депрессорного рефлекса, как ответа на острое повышение АДсер, а в ряде случаев и с аритмией, отражающей напряженную ситуацию по сердцу в результате острого повышения систолической постнагрузки.

Во всех опытах на фоне системной вазоконстрикции динамика РЕОдифф и ее пресистолической (а) и систолической (А) волн была очень демонстративной. Данные по одной из обезьян приведены на рисунке 6. В исходном состоянии (эпизод 1) пресистолическая волна отсутствует в периоде изоволюмического сокращения (интервал 2–3). На второй минуте после введения (эпизод 2) на фоне снижения насосного потенциала правого сердца (депрессия систолической волны – А) отмечается появление пресистолической волны (а), которая становится доминирующей в систолической части кардиокомплекса грудной РЕОдифф – ее амплитуда в 1,5–2 раза превышает амплитуду систолической волны. Проявляется и одновременное увеличение продолжительности фазы изоволюмического сокращения (интервал 2–3), по сравнению с исходной длительностью этой фазы до введения мезатона. В дальнейшем на 3-й минуте (эпизод 3) отмечается депрессия обеих волн – значительное снижение амплитуды систолической волны (А) и исчезновение пресистолической волны (а) с восстановлением исходной длительности фазы изоволюмического расслабления. На 10-й минуте (эпизод 4) видно практически полное восстановление исходных характеристик РЕОдифф. Обращает внимание на фоне очень выразительной динамики по грудной РЕОдифф инертность характеристик по ЭКГ и ФКГ.

При этом важно отметить, что на периферических реограммах, как отмечалось выше, также уменьшалась амплитуда систолической волны, отражая системную вазоконстрикцию с уменьшением периферического артериального кровотока, но на протяжении всего периода действия мезатона пресистолической волны не было. На наш взгляд, это демонстрирует выраженные различия кардиодинамического проявления изоволюмического сокращения сердца по кровотоку МКК и БКК. В сосудистой системе легочных сосудов, как в системе более низкого давления, чем в БКК, в фазе изоволюмического сокращения миокарда гидродинамически более выражено (продавливание полулунных клапанов легочной артерии) проявляется нарастание внутрижелудочкового давления в правом сердце.

Для подтверждения положения о том, что грудная реограмма является отражением именно кровотока в системе легочных сосудов, начиная с легочной артерии и правого сердца, нами в экспериментах с катетеризацией правых отделов сердца и аорты у животных (Лаборатория физиологии кровообращения и космической медицины НИИ ЭПит АМН

СССР и ИМБП МЗ СССР), а также на базе Силезского центра болезней сердца (г. Забже, Польша) и клинического отделения сердечно-сосудистой хирургии Варшавского медицинского университета был проведен цикл исследований [28], в которых у пациентов клиник осуществлялась параллельная регистрация ЭКГ, тетраполярной грудной реографии с кривыми давления в полостях сердца (правый желудочек и правое предсердие, левый желудочек), аорты и легочной артерии. Для измерения давления и записи кривых давления использовались стандартные методы катетеризации и регистрации сигналов.

На рисунке 7 приводятся данные по катетеризации правого желудочка сердца и аорты у взрослой собаки с параллельной регистрацией ЭКГ, ФКГ и грудной реограммы. На кардиокомплексе грудной РЕОдифф определяется выраженная пресистолическая волна, которая захватывает весь период напряжения правого сердца (1-3), включая фазу асинхронного сокращения (1-2, от начала зубца Q и до высокочастотных осцилляций I тона) и фазу изоволюмического сокращения (2-3, на протяжении I тона и до начала сердечного выброса).

Начало сердечного выброса по РЕОдифф (по вертикальному маркеру 3) четко проецируется по кривой давления ПЖ на момент (3) открытия полулунных клапанов и начала выброса в легочную артерию. Об этом свидетельствует явная задержка прироста давления в полости правого желудочка с последующим уменьшения скорости нарастания внутрижелудочкового давления в связи с начавшимся выбросом крови в легочную артерию. В условиях повышенного давления в легочной артерии начало выброса крови в нее из правого желудочка почти совпадает с началом анакроты кривой давления в аорте. В любом случае отсчет амплитуды систолической волны грудной РЕОдифф и начала периода изгнания крови соответствует точке пересечения вертикального маркера 3 (точка «В») с кривой РЕОдифф (на рис. 7 обозначено ограничивающими стрелками).

На представленном рисунке 8 хорошо видно, что при бигеминии у собаки экстрасистола соответствует эктопическому сокращению желудочка сердца. При этом по каждому экстрасистолическому циклу определяется соответствующая пульсовая волна на кривой давления правого желудочка (ПЖ) и отсутствие пульсового эквивалента на кривой давления в аорте. Но главное, что каждому такому эктопическому пульсовому сокращению правого желудочка соответствует кардиокомплекс по грудной РЕОдифф и идентифицируется систолическая волна (А). На другом рисунке 9 у той же собаки одиночному агональному кардиальному комплексу грудной РЕОдифф соответствует правожелудочковое сокращение сердца (пульсовая волна на кривой давления правого желудочка – ПЖ) при полном «молчании» левого желудочка по кривой давления в аорте.

И, наконец, на рисунке 10 по данным катетеризации правых отделов сердца у человека представлены (сверху вниз) ЭКГ, первая производная дифференциальной кривой давления в легочной артерии (РА, d_{mmHg}/dt) и первая производная дифференциальной грудной реограммы (РЕО, d_z/dt). Видно, что именно после зубца S на ЭКГ по линии вертикального маркера 3 полное фазовое совпадение начала выброса крови из правого сердца и в целом систолической волны по дифференциальной кривой давления легочной артерии с точкой «В» на РЕОдифф. Более того, определяется четкое фазовое соответствие достаточно выраженной, особенно по легочной артерии, пресистолической волны как по РАдифф, так и по РЕОдифф. При этом использованный алгоритм позволяет ориентироваться в фазовой структуре как нормального, так и экстрасистолического (бигеминия) кардиокомплекса РЕОдифф (см. на этой же записи).

На рисунке 11 приведены данные синхронной регистрации (сверху вниз): электрокардиограммы (ЭКГ), давления в легочной артерии (РА), в правом желудочке (RV), правом предсердии (RA), основной реограммы (РЕО-0), дифференцированной реограммы – первой производной (РЕО_1), второй производной (РЕО_2) и третьей производной (РЕО_3). Справа от группы кривых РА, RV и RA дается 0-уровень и калибровочный сигнал давления (mmHg).

Основная разметка на рисунке (черные точки) дается по опциям анализа реограммы, буквами обозначаются маркеры только тех зубцов ЭКГ (на рисунке EKG), которые идентифицируются у данного пациента. На EKG справа обозначены идентифицируемые зубцы (P, Q, R и S), а на анализируемом цикле маркерами обозначены только те зубцы ЭКГ, которые идентифицируются у данного пациента (из-за отсутствия зубца Т маркеры Т₁, Т и Т₂ не идентифицируются), и проставлены дополнительные маркеры по зубцам Р и S. Основная разметка на рисунке (черные точки и вертикальные маркерные линии) дается по опциям анализа реограммы. Ниже приводятся цифровые и буквенные обозначения индикаторных (маркерных) точек:

1 – **точка Q** берется по началу зубца Q или при отсутствии этого зубца отметка делается по началу комплекса QRS или началу зубца R; **соответствует началу периода напряжения и фазы асинхронного сокращения;**

2 – **точка R***: при симметричном комплексе QRS или асимметричном смещении зубца R вправо отметка делается по вершине зубца R; при асимметричном смещении зубца R или при расщеплениях зубца R влево отметка делается по маркеру посередине между точками Q и S (по ФКГ совпадает с началом высокочастотных колебаний I тона, а по эхокардиограмме хорошо совпадет с моментом закрытия трехстворчатого клапана – см.

рис 4, по маркеру 2); **соответствует окончанию фазы асинхронного напряжения и началу фазы изоволюмического напряжения;**

3 – **точка В** берется по РЕО_3 (первый положительный пик после зубца S или точка 2–3-го перегиба от отрицательного пика систолической волны); точка В всегда после комплекса QRS и до точки T_1 на ЭКГ – у данного пациента точки T_1 (начало зубца Т), Т (вершина зубца Т) и T_2 (конец зубца Т) не идентифицируются); точка В всегда после I тона на ФКГ и по эхокардиограмме совпадает с открытием полулунных клапанов легочной артерии (см. рис. 4, по маркеру 3); **соответствует окончанию периода напряжения (фазы изоволюмического напряжения) и началу периода изгнания крови (фазы быстрого изгнания) из правого желудочка сердца;**

4 – **точка С** берется по вершине систолической волны на РЕО_1 и **соответствует фазе максимальной скорости изгнания крови;**

5 – **точка F** берется по вершине систолической волны на РЕО_0 или по точке Т (вершина зубца Т) на ЭКГ;

6 – **точка Х** берется в интервале «конечная часть зубца Т – сразу после зубца Т» («влево-вправо» от точки T_2) и всегда после точки F: по РЕО_1 – после маркера F точка ближайшего минимума и по РЕО_3 после маркера F первый положительный пик высокоамплитудного колебания с выраженным отрицательным пиком (по ФКГ совпадает с II тоном); **соответствует завершению фазы быстрого изгнания крови, началу фазы редуцированного изгнания крови и закрытия полулунного клапана легочной артерии;**

7 – **точка Y** берется на РЕО_3 по первому пиковому минимуму после точки X (по ФКГ после высокочастотного колебания II тона на ФКГ, по эхокардиограмме соответствует закрытию полулунных клапанов легочной артерии – см. рис. 4, по маркеру 4); **соответствует окончанию фазы редуцированного изгнания крови и периода изгнания крови в целом и закрытию полулунного клапана легочной артерии, началу диастолы и фазы изоволюмического расслабления;**

8 – **точка О** берется по пику диастолической волны на РЕО_1, как ориентировочный маркер для определения точки ОТ (открытие трехстворчатого клапана правого желудочка);

9 – **точка ОТ** берется на РЕО_2 по первому минимуму после точки О (по эхокардиограмме соответствует открытию трехстворчатого клапана – см. рис. 4, по маркеру 5); **соответствует открытию трехстворчатого клапана и завершению фазы изоволюмического расслабления правого желудочка.**

Рассмотренный общий алгоритм идентификации индикаторных точек с проведением первичной («точечной») маркировки грудной РЕОдифф может быть использован как для ручной, так и автоматической обработки грудного кардиокомплекса РЕОдифф и фазового анализа сердечного цикла (по правому сердцу!).

Представленные выше материалы позволили определиться с идентификацией объекта импедансометрии при грудной реографии и на этой основе разработать адекватный алгоритм фазового анализа сердечного цикла по грудной РЕОдифф. Индикация фаз сердечного цикла и ключевого элемента структуры систолической части РЕОдифф – начала сердечного выброса (точка «В») обеспечивает возможность «сильной» кардиодинамической характеристики функционального блока «правое сердце – легочный кровоток», т.е. наиболее закрытой для неинвазивных методов исследования части ССС.

В первую очередь, это относится к уверенному определению амплитуды систолической волны грудного РЕОкардиоцикла, как реографического отражения скорости сердечного выброса и легочного кровотока, и периода изгнания крови из правого желудочка сердца в легочную артерию. В свою очередь, это обеспечивает и определение величины сердечного выброса (по расчету УОС и МОК). Показатель Адифф позволяет по динамической составляющей легочного кровотока оценивать сократительную функцию правого (а не левого!), а по соотношению пресистолической и систолической волн РЕОдифф оценивать эффективность систолической функции сердца.

Возможность на основе разработанного алгоритма анализа грудной РЕОдифф четкой идентификации основных фаз сердечного цикла и определения временных характеристик периода напряжения, фаз изоволюмического сокращения и расслабления позволяет неинвазивно определять давление в легочной артерии [23]. Безусловно, полезной является и возможность неинвазивного определения давления «заклинивания» или давления в легочных венах, экстраполируя его на давление в левом предсердии [15]. Все это значительно усиливает информативные возможности фазового анализа сердечного цикла по грудной РЕОдифф и его временных и амплитудных характеристик.

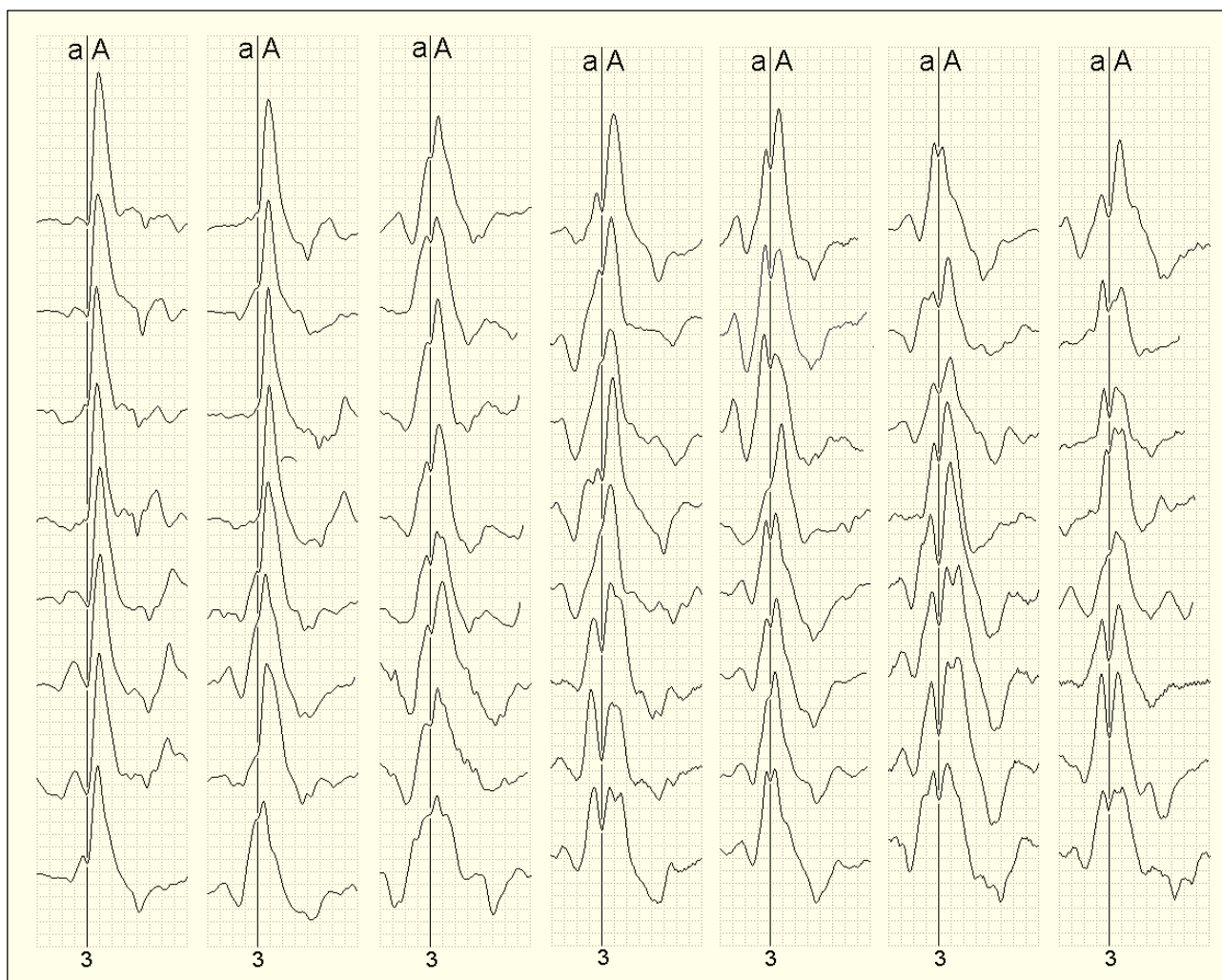


Рис. 1. Разнообразие форм кардиокомплекса РЕОдифф при тетраполярной грудной реографии у разных пациентов и при разных соматических состояниях (собственные материалы). Пояснения к обозначениям см. в тексте

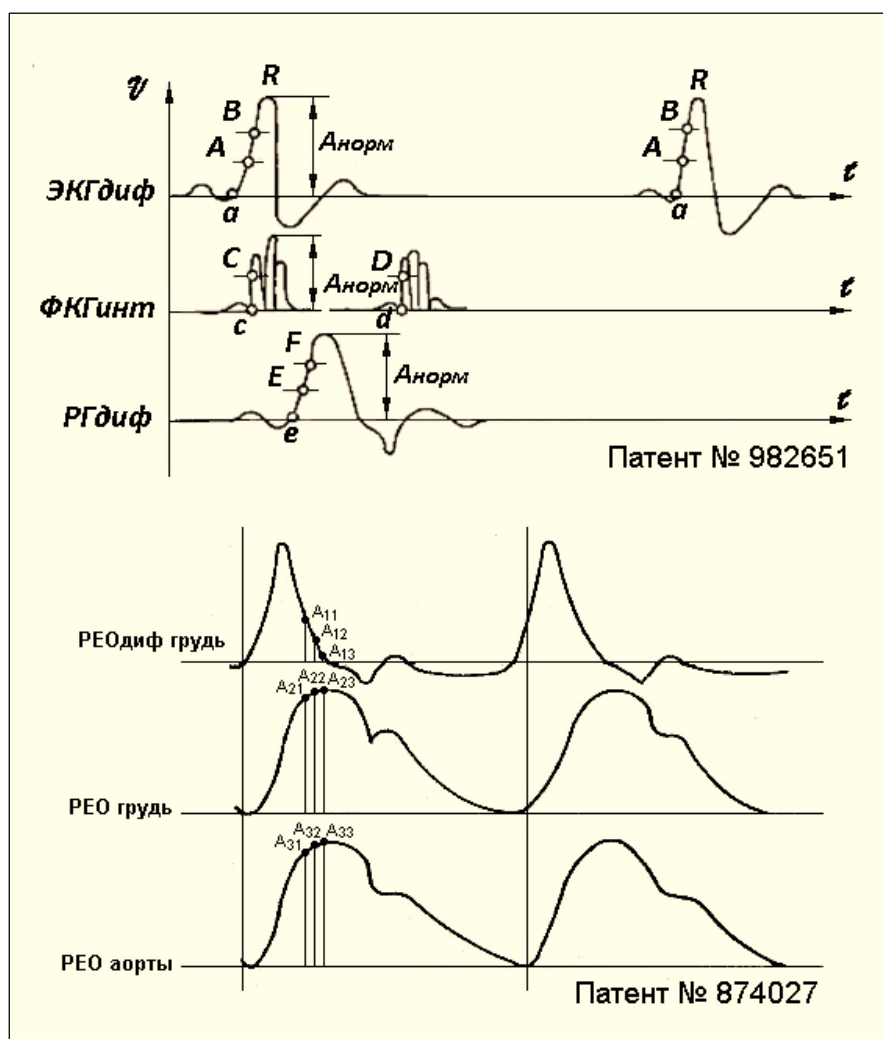


Рис. 2. Способы автоматизированного анализа реограмм, ориентированные на изoeлектрический (нулевой) уровень в качестве базового для определения амплитуды систолической волны грудной РЕОдифф [17, 18]

Патент № 982651: фонокардиограмма (ФКГ), первая производная дифференциальной электрокардиограммы (ЭКГдиф) и грудной реограммы (РГдиф); ось «t» соответствует изoeлектрическому (нулевому) уровню (физический «0»), который пересекает систолическую волну РГдиф в точке «е», которая рассматривается как начало сердечного выброса и от нее рассчитывается амплитуда РГдиф – «Анорм».

Патент №874027: дифференциальная реограмма груди (РЕОдиф), основные реограммы груди (РЕОгрудь) и аорты (РЕОаорты (? Прим. авторов). Для определения амплитуд в качестве базового используется изoeлектрический (нулевой) уровень (физический «0»). При сопоставлении точек пересечения начала пульсовых кривых с изoeлектрическим уровнем (обозначены вертикальными маркерами) определяется фактическое фазовое расхождение между дифференциальной и основной реограммами.



Рис. 3. Фазовый анализ сердечного цикла по данным синхронной регистрации (сверху вниз) основной грудной реограммы (Reo), первой производной (по скорости) дифференциальной грудной реограммы (Дифф.1), второй производной (по ускорению) дифференциальной грудной реограммы (Дифф.2), фонокардиограммы (ФКГ) и электрокардиограммы (ЭКГ).

Для фазового анализа использовались усредненные комплексы, полученные программным наложением сердечных циклов, синхронизированных по пику зубца R ЭКГ, в интервале 15-секундой записи сигналов.

Начало сердечного выброса (точка «В») идентифицируется по пересечению вертикального маркера 3 с систолической волной Дифф.1. Вертикальными маркерами выделены фазы: асинхронного (1-2) и изоволюмического сокращения (2-3), общего периода напряжения (1-3) правого желудочка сердца, периода изгнания (3-4), фазы закрытия клапанов легочной артерии (4-4) и фазы изоволюмического расслабления (4-5) правого желудочка сердца.

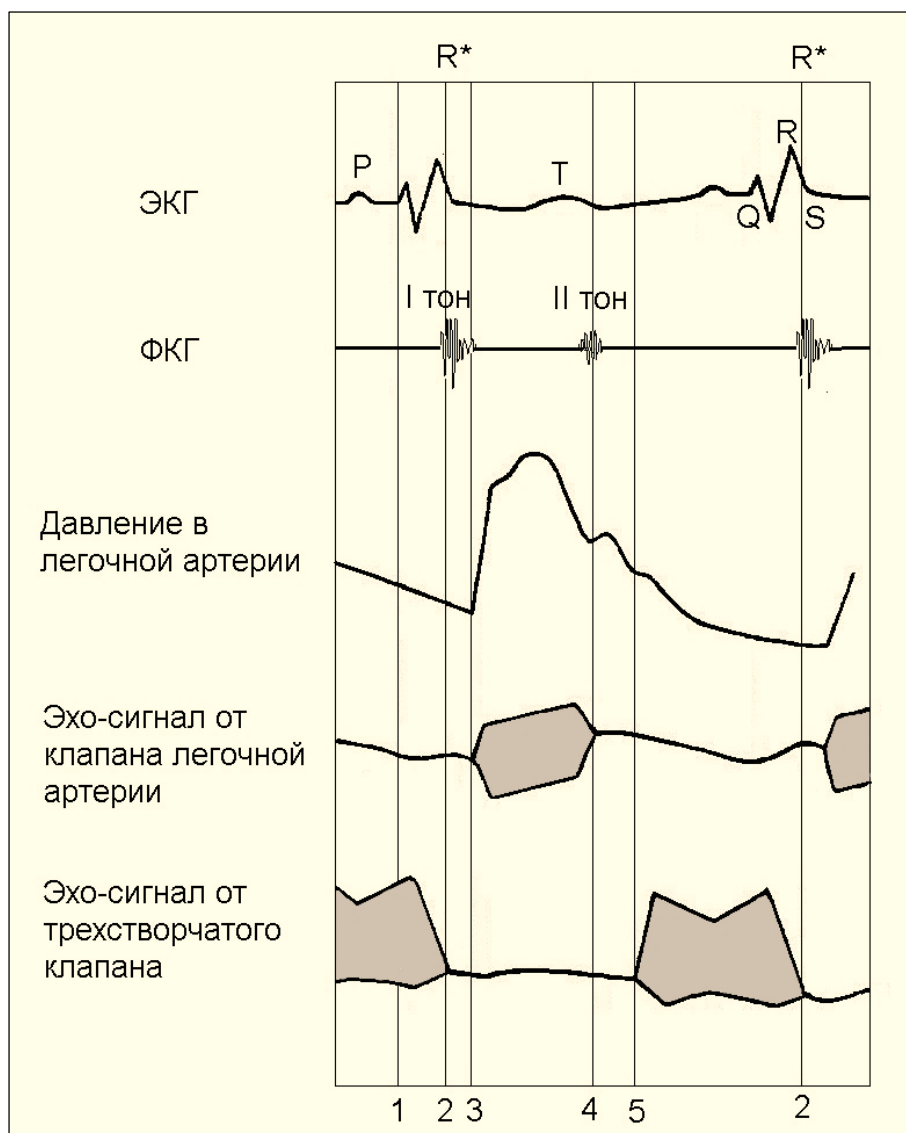


Рис. 4. Схематическое изображение соотношения фаз сердечного цикла по данным эхокардиографии правых отделов сердца [19]

Сверху вниз: электрокардиограмма (ЭКГ, зубцы P, Q, R, S, T), фонокардиограмма (ФКГ, тоны I и II), давление в легочной артерии, Эхо-сигналы клапана легочной артерии и трехстворчатого клапана (створ открытых клапанов затемнен). 1 – начало периода напряжения (фаза асинхронного сокращения), 2 – момент закрытия трехстворчатого клапана (R*) и начало фазы изоволюмического сокращения (2), завершение периода напряжения и момент открытия клапан легочной артерии (3), период изгнания из правого желудочка (3-4), момент закрытия клапана легочной артерии (4) и начало фазы изоволюмического расслабления, завершения фазы изоволюмического расслабления и момент открытия трехстворчатого клапана (5).

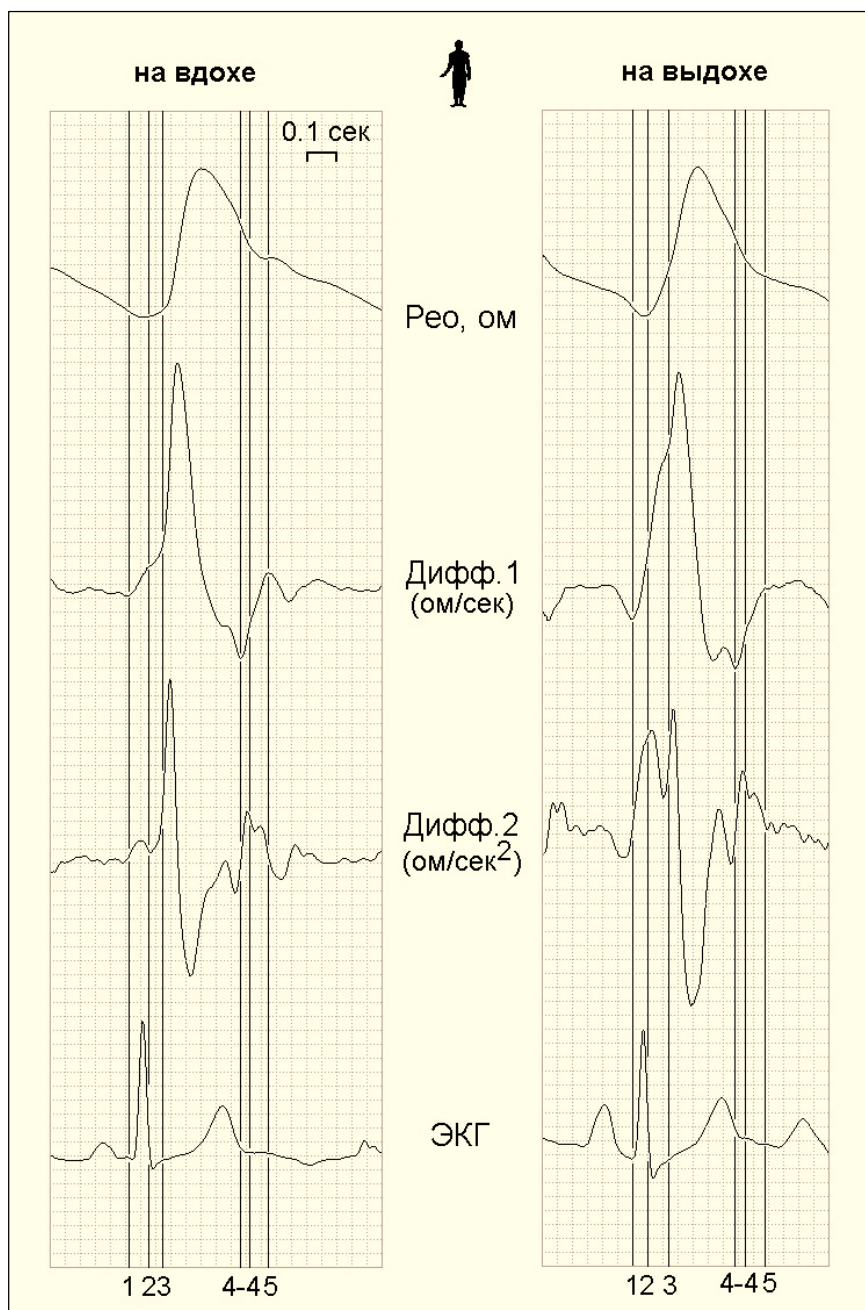


Рис. 5. Изменения пресистолической и систолических волн дифференциальной грудной реограммы (РЕОдифф) при задержках на вдохе и выдохе в положении стоя (собственные исследования).

Сверху вниз:
 основная (Рео) и дифференциальная (первая производная – Дифф.1, вторая производная – Дифф.2) грудная реограмма, электрокардиограмма (ЭКГ). 1, 2, 3, 4-4, 5 – вертикальные маркеры, соответствующие границам фаз сердечного цикла (объяснения см. на рис. и в тексте).

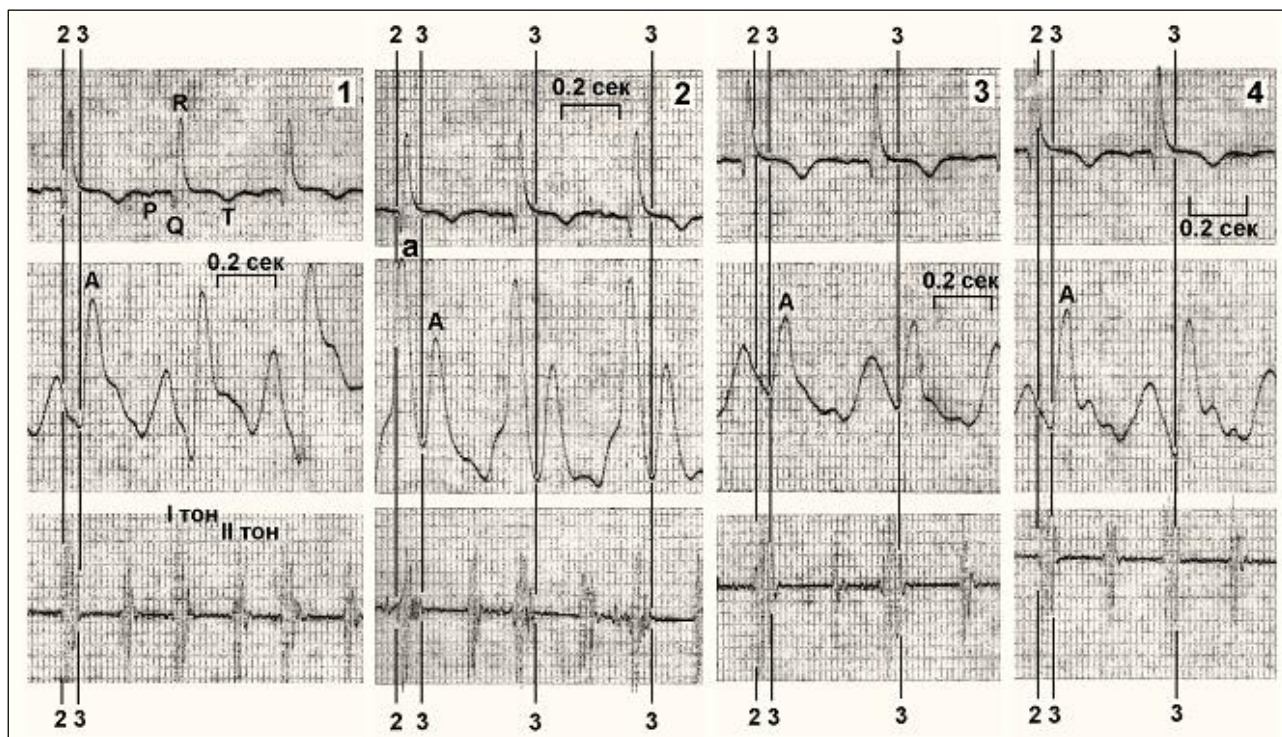


Рис. 6. Кардиодинамические проявления на фоне симпатотонического действия мезатона (внутривенное введение) у обезьяны (собственные исследования)

Сверху вниз: электрокардиограмма Р, Q, R, Т – зубцы ЭКГ), дифференциальная грудная реограмма (а – пресистолическая волна, А – систолическая волна РЕОдифф), фонокардиограмма. 2 – вертикальный маркер через начало фазы изоволюмического сокращения (через середину комплекса QRS на ЭКГ и начало I тона на ФКГ), 3 – вертикальный маркер через точку «В» (начало сердечного выброса) по РЕОдифф.

1 – исходное состояния. 2 – 1 минута после внутривенного введения мезатона, 3 – 2-я минута, 4 – 10-я минута после введения. Остальные обозначения см. на рисунке.

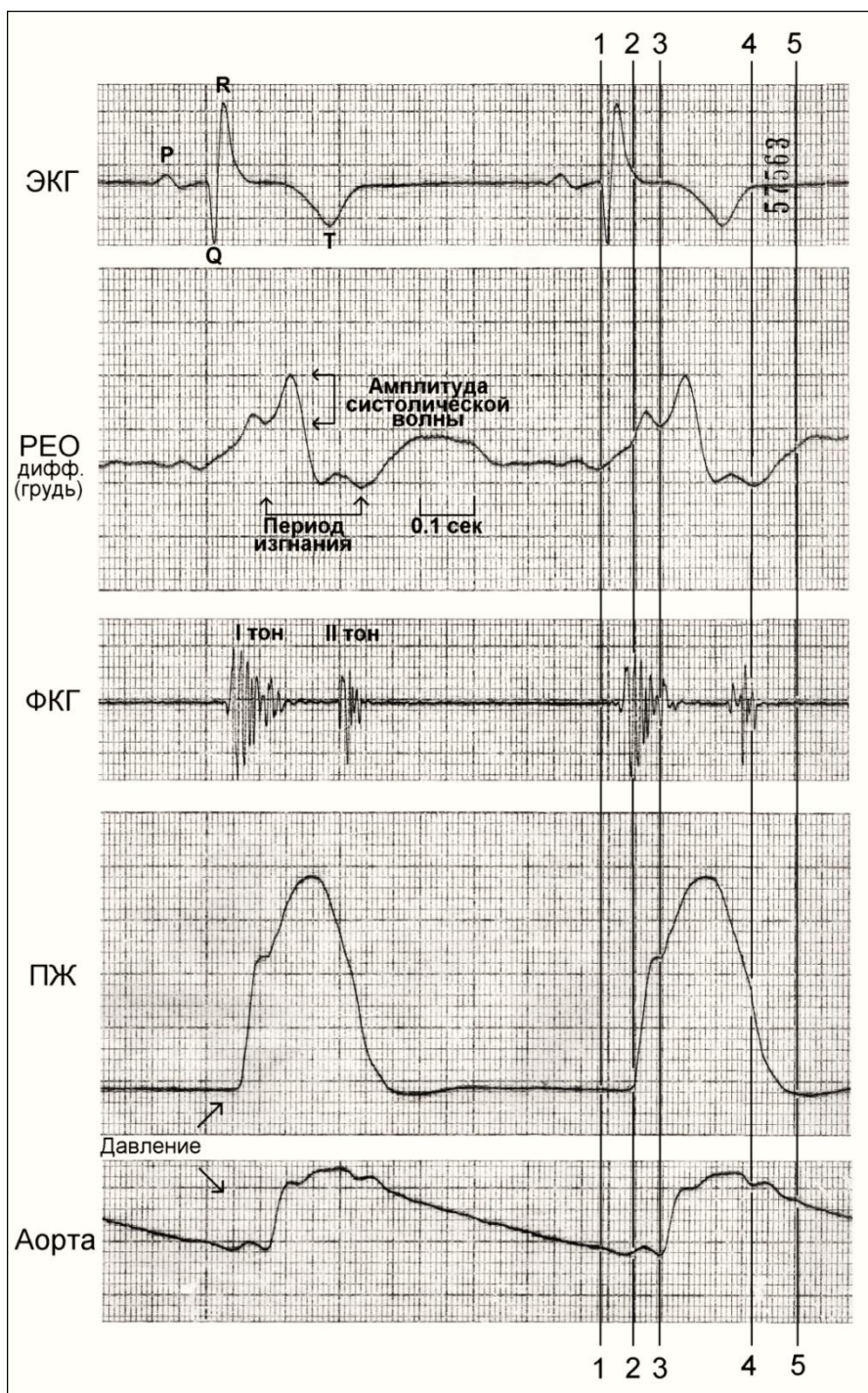


Рис. 7. Фазовые соотношения по сердечному циклу у собаки при сопоставлении электрокардиограммы (Р, Q, R, Т зубцы ЭКГ), грудной дифференцированной реограммы (РЕОдифф), фонокардиограммы (I и II тоны ФКГ), пульсовых кривых давления в правом желудочке (ПЖ) и в аорте (Аорта)

1, 2, 3, 4, 5 – вертикальные маркеры, соответствующие границам фаз сердечного цикла (объяснения см. рис. 7).

Остальные обозначения см. на рисунке.

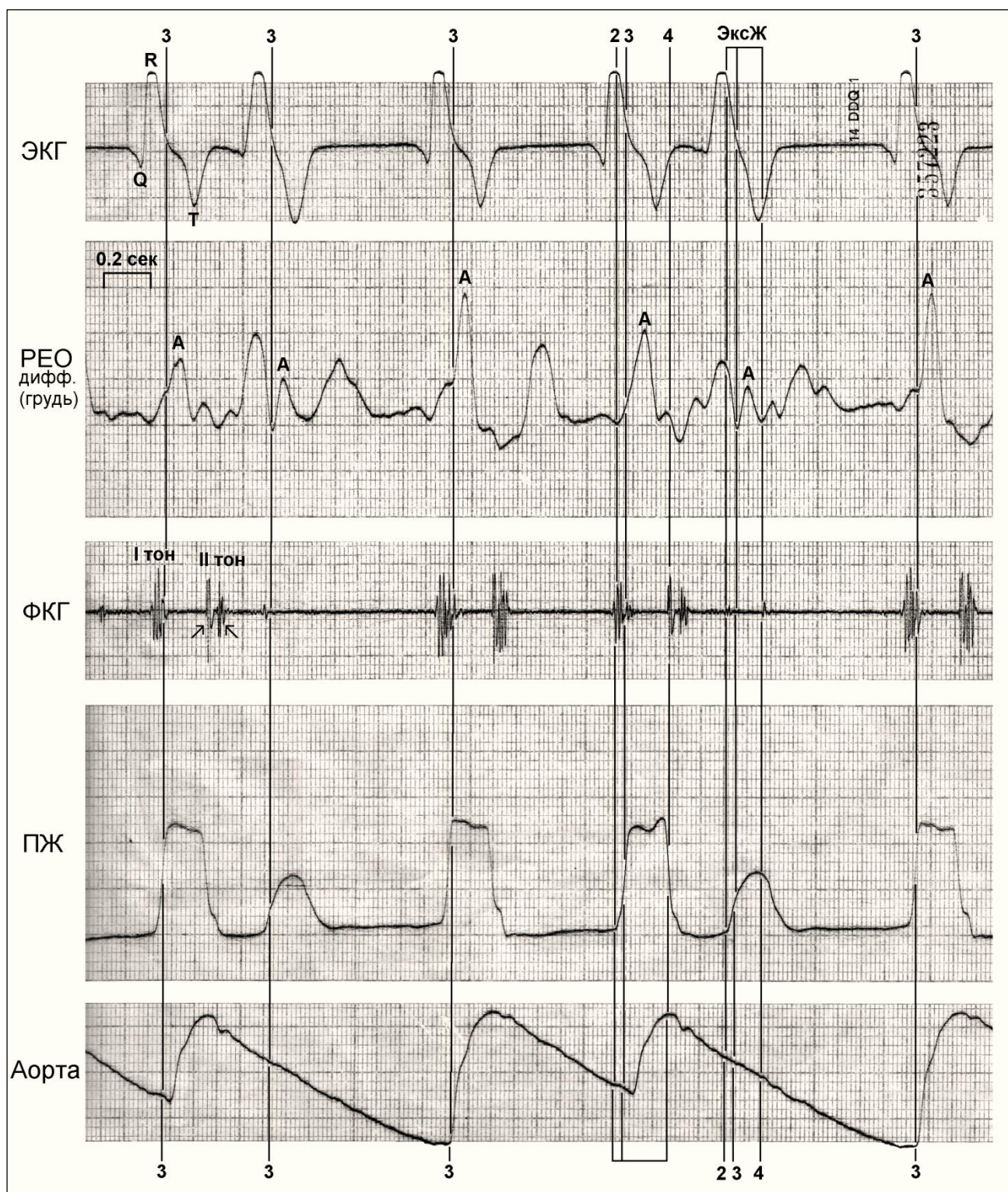


Рис. 8. Кардиодинамическое отражение на грудной РЕОдифф эктопического сокращения правого желудочка сердца

Сверху вниз: электрокардиограмма – ЭКГ, грудная РЕОдифф, фонокардиограмма – ФКГ, кривые давления в правом желудочке (ПЖ) и в грудной аорте.

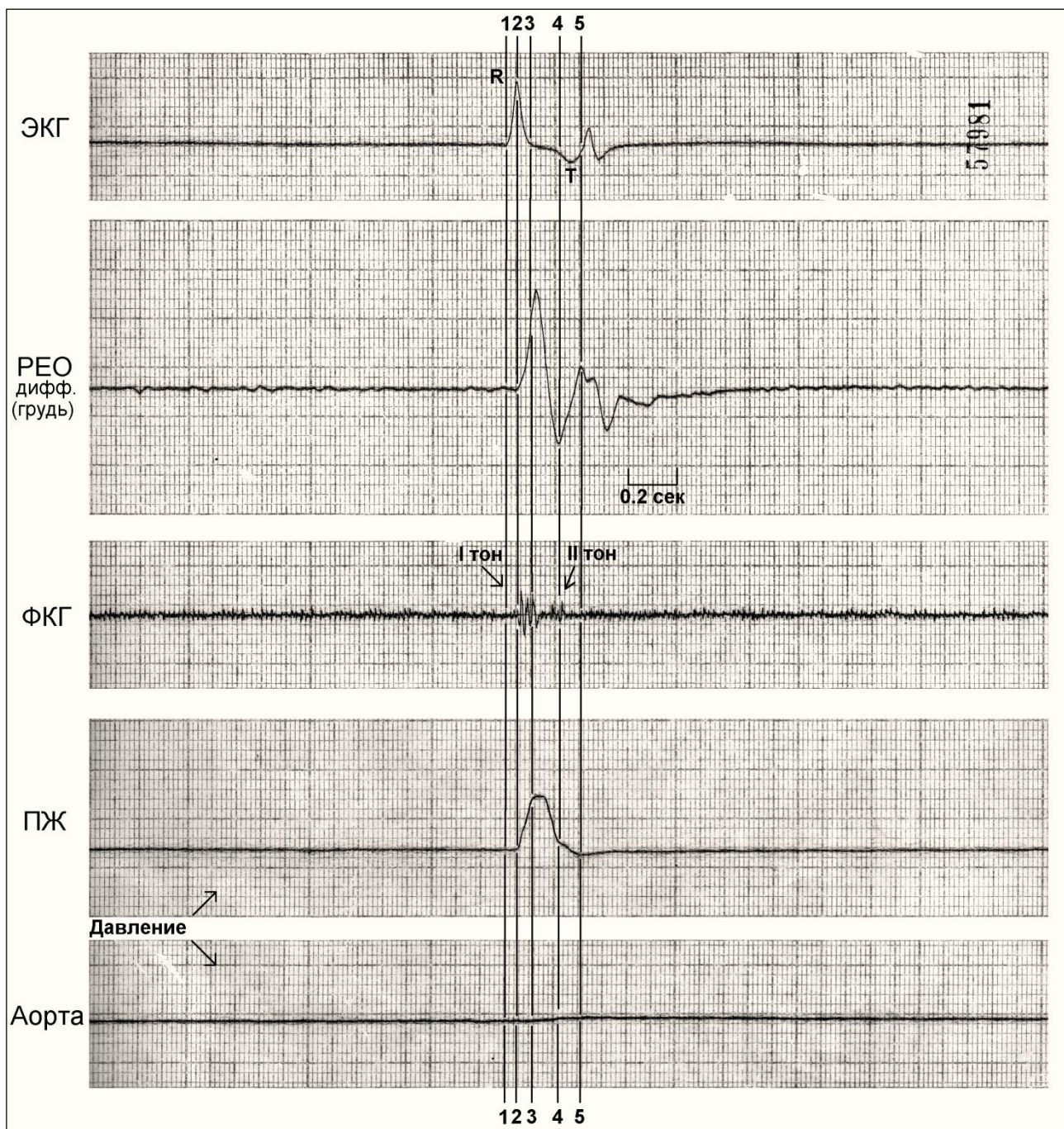


Рис. 9. Агональное сокращение сердца с соответствующим кардиодинамическим отражением на кривые давления правого желудочка (ПЖ) и грудной РЕОдифф при отсутствии пульсовой волны на кривые давления в грудной аорте



Рис. 10. Синхронная запись электрокардиограммы (EKG), дифференциальной кривой (первой производной) давления в легочной артерии (PA) и грудной дифференциальной реограммы (REO). Собственные исследования

Цифрами обозначены вертикальные маркеры разметки фаз сердечного цикла (см. рис. 12, описание в тексте).

Рабочая разметка для фазового анализа
кардиоцикла

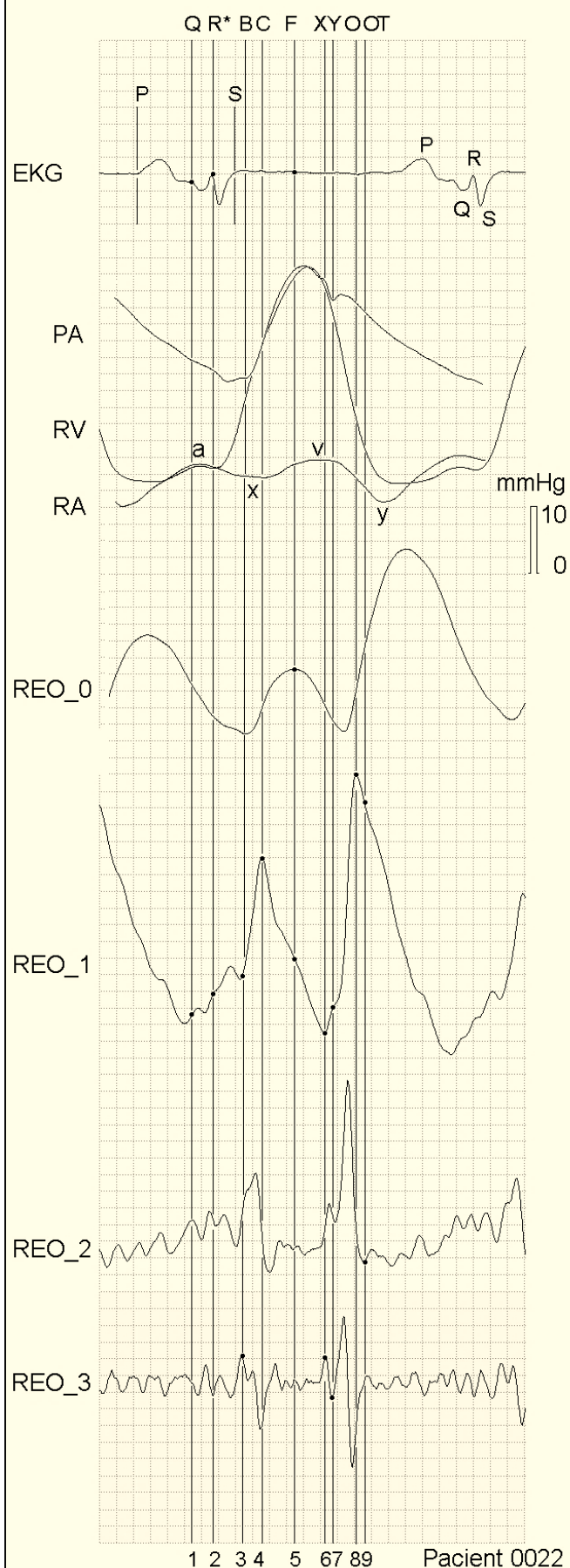


Рис. 11. Фазовые соотношения
сердечного цикла по электрокардиограмме
(ЭКГ), кривым давления в легочной артерии
(РА), правом желудочке (RV), правом
предсердии (RA) и по грудной реограмме –
основной (REO_0) и дифференциальной (по
первой производной – REO_1, второй
производной – REO_2 и третьей производной
– REO_3). Собственные исследования
Пояснения к обозначениям см. в тексте.

Список литературы

1. Багрий А.С., Белкания Г.С., Диленян Л.Р. Антропофизиологический подход как методологическая основа в разработке новых диагностических средств превентивной медицины и поддержки здоровья // Медицинский альманах – 2013 – №2 (26) – С. 165-168.
2. Белкания Г.С., Дарцмелия В.А. Определение ударного и минутного сердечного выброса у обезьян. Космич. биол. и авиакосмич. мед. 1983, т. 17, №4 – С. 72-75.
3. Белкания Г.С., Дарцмелия В.А., Демин А.Н. Способ определения сердечного выброса у животных // Физиологический журнал СССР им. Сеченова – 1985 – Т. 71, №3 –С. 383-389.
4. Белкания Г.С., Дарцмелия В.А., Галустян М.В., Демин А.Н., Курочкин Ю.Н., Шеремет И.П. Антропофизиологическая основа видового стереотипа реактивности сердечно-сосудистой системы у приматов // Вестник АМН СССР – 1987, 10 –С.52-60.
5. Белкания Г.С., Дарцмелия В.А., Демин А.Н., Курочкин Ю.Н., Галустян М.И., Гвинджилия И.В. Антропогенетическая основа формирования артериальной гипертонии у приматов // Физиологический журнал СССР – 1988 –Т.84 – 11 –С. 1664-1676.
6. Белкания Г.С., Дарцмелия В.А., Демин А.Н., Галустян М.В., Шеремет И.П., Курочкин Ю.Н., Неборский А.Т. Эмоциональное напряжение, постуральная регуляция кровообращения и некоторые противоречия в представлениях о патогенезе артериальной гипертонии. // Успехи физиологических наук – 1990 –Т.21 – 1 –С.78-96.
7. Белкания Г.С., Ткачук В.Г., Пухальска Л., Корольчук А.П. Антропофизиологический подход в биоритмологическом обеспечении здоровья. Сообщение 1. Прямохождение как синхронизатор суточного ритма кардиодинамики // Физическое воспитание студентов творческих специальностей – Харьков: ХГАДИ (ХХПИ) – 2003, №3 –С. 11-34.
8. Белкания Г.С., Пухальская Л.Г., Коньков Д.Г. Антропофизиологическая основа кровообращения у беременных. 1. Типологическая характеристика и динамика кровообращения при физиологической беременности // Вісник Вінницького державного медичного університету – 2001 –Т.5 – 1 –С.23-28.
9. Белканиа Г.С., Пухальска Л., Коньков Д.Г. Антропофізіологічна основа кровообігу у вагітних. 2. Пози тіла і кровообіг при вагітності // Вісник Вінницького державного медичного університету – 2003 –Т.7 – №2/2 –С.678-682.
10. Белкания Г.С., Диленян Л.Р., Багрий А.С., Рыжаков Д.И., Пухальская Л.Г. Антропофизиологический подход в диагностической оценке состояния сердечно-сосудистой системы // Медицинский альманах – 2013 – 4(28) – С. 108-114.

11. Белкания Г.С., Диленян Л.Р., Багрий А.С., Рыжаков Д.И., Пухальская Л.Г., Коньков Д.Г. Особенности методического обеспечения антропофизиологической диагностики состояния сердечно-сосудистой системы // Медицинский альманах – 2013, 6(30) –С. 208-214.
12. Демин А.Н., Галустян М.В., Белкания Г.С., Дарцмелия В.А. Реотахоосциллографическая регистрация артериального давления у обезьян // Космическая биол. и авиакосмич. Мед. – 1986 – 3 –С. 73-75.
13. Диленян Л.Р. Антропофизиологические, половые и возрастные особенности центральной и периферической гемодинамики в норме и при артериальной гипертензии – Дисс.канд.мед.наук – Н.-Новгород, 2001 – 156 с.
14. Диленян Л.Р., Белкания Г.С., Багрий А.С., Рыжаков Д.И., Коньков Д.Г., Пухальская Л.Г. Антропофизиологический подход в системном алгоритме критериального анализа состояния сердечно-сосудистой системы // Медицинский альманах – 2014 – 5(35) –С. 170-174.
15. Елизарова Н.А., Рубанова М.П., Гаевский Ю.Г., Сааташвили Г.А., Мареев В.Ю., Атьков О.Ю. Способ определения функционального состояния левого желудочка сердца //. Авторское свидетельство 1284509 СССР – Бюлл. изобрет. 1987, №3.
16. Коньков Д.Г., Белкания Г.С., Пухальска Л. Антропофизиологическая основа кровообращения у беременных. 1. Типологическая характеристика и динамика кровообращения при физиологической беременности // Вісник Вінницького державного медичного університету – 2001 – т.5 – 1 – С.23-28.
17. Мухарлямов Н.М., Пушкарь Ю.Т., Хеймец Г.И., Цветков А.А., Понамарев Ю.А., Одинец Г.С. Способ определения сократительной функции сердца и устройство для его осуществления – Авторское свидетельство СССР №874027 – Бюлл. изобрет. 1981 – №39.
18. Одинец Г.С., Иванченко С.В., Макеев О.Д., Ратманский А.Ю., Мухарлямов Н.М. и Ю.Т. Пушкарь. Устройство для неинвазивного исследования кардиогемодинамики – Авторское свидетельство СССР №982651 – Бюллет. изобрет. – №47.
19. Педиатрия. Руководство. – Пер. с англ. / Под ред. З.Е.Бермана, В.К.Вогана. Книга 4. Болезни органов дыхания и сердечно-сосудистой системы. – М.: Медицина, 1988.
20. Пушкарь Ю.Т., Ватманский А.Ю., Одинец Г.С. Приборы для исследования сердечно-сосудистой системы методом поликардиографии, реоплетизмографии и ритмометрии. – В кн.: Современные методы и аппаратура для автоматизированных измерений в кардиологии. – М.: Медицина, 1982 – С. 20-59.
21. Рыжаков Д.И., Диленян Л.Р. Антропофизиологический анализ центральной и периферической гемодинамики у женщин с артериальной нормо-гипертензией // Нижегородский медицинский журнал – 2001 –№1 – С. 25-31.

22. Чебышев Н.С., Левчук В.П., Невзоров В.П., Касымжанова Р.Д. Применение модифицированной пробы Вальсальвы–Бюргера для оценки легочного кровотока // Советская медицина – 1977 – №4 – С. 24-28.
23. Burstin L. Determination of Pressure in the Pulmonare Artery // Brit. Heart. J., 1967, 29, 396-403.
24. Kubicek W.G., Petterson R.P., Witson D.A. et al. Development and evaluation of a impedance cardiac output system //Aerospase Med., 1966, v.37, N12, p. 1208-1212.
25. Kubicek W.G. Impedance pletysmograph –United States Patent Office. Patent N 3340867. September, 12, 1967.
26. Kubicek W.G., Petterson R.P., Witson D.A. Impedance cardiography as a noninvasive method of monitoring cardiac function and other parameters of the cardiovascular system //Ann. N.Y. Acad. Sci., 1970, v. 170, p. 724-732.
27. Puchalska L., Belkania G.S. Haemodynamic respons to the dynamic exercise in subjects exposed to different gravitational conditions. // Journal of physiology and pharmacology, 2006, vol.57, N11, p. 103-113.
28. Sobotnicki A., Gibinski P., Hein S., Gacek A., Puchalska L., Belkaniya G., Palko T., Piatkowska-Janko E. Analysis of the agreement of CAVASCREEN system diagnostic suggestions with the real clinic state of a patient / In: Proceedings of the XI International Conference. MIT 2006 – Medical information & Technology /Ed. E. Pietka, J. Leski, S. Franiel – Warshawa, 2006, p.1-6.

Рецензенты:

Трошин В.Д., д.м.н., профессор, профессор кафедры неврологии, нейрохирургии и медицинской генетики Нижегородской государственной медицинской академии, г.Нижний Новгород;

Перетягин С.П., д.м.н., профессор, руководитель отделения экспериментальной медицины ФГБУ «Приволжский федеральный медицинский исследовательский центр» Министерства здравоохранения РФ, г. Нижний Новгород.