

Пространственная векторкардиография: от истоков до наших дней

В.Э. Олейников[✉], А.А. Чернова

ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет», Пенза, Россия

Аннотация

Векторкардиография (ВКГ) зародилась еще в 1887 г. благодаря открытию дипольной теории электрического вектора сердца А. Waller. Несмотря на то что идея построения электрического вектора сердца быстро получила признание среди ученых того времени, технические несовершенства электрокардиографов и трудоемкость ручных расчетов на определенный промежуток времени снизили интерес исследователей к данному методу. Появление цифровых электрокардиографов и разработка алгоритмов автоматического построения векторов сердца подарили ВКГ вторую жизнь и позволили взглянуть на векторную теорию под иным углом. Стало возможным визуализировать электрические процессы миокарда в трехмерном изображении, производить расчет параметров векторов деполаризации и реполаризации. В обзоре обобщены имеющиеся на настоящее время представления и результаты исследований, посвященных изучению ВКГ. Обсуждаются концепции глобальной электрической гетерогенности и желудочкового градиента, основанные на векторной теории сердца. Приводятся данные многочисленных исследований, свидетельствующих о значимой прогностической и диагностической ценности полученных параметров ВКГ.

Ключевые слова: векторкардиография, цифровая электрокардиография, глобальная электрическая гетерогенность, желудочковый градиент, электрическая нестабильность миокарда

Для цитирования: Олейников В.Э., Чернова А.А. Пространственная векторкардиография: от истоков до наших дней. Терапевтический архив. 2025;97(4):360–366. DOI: 10.26442/00403660.2025.04.203149

© ООО «КОНСИЛИУМ МЕДИКУМ», 2025 г.

REVIEW

Spatial vector cardiography: From origins to the present day. A review

Valentin E. Oleynikov[✉], Angelina A. Chernova

Penza State University, Penza, Russia

Abstract

Vectorcardiography (VCG) originated back in 1887 due to the discovery of the dipole theory of the heart electric vector by Augustus D. Waller. Despite the fact that the idea of constructing an electric vector of the heart quickly gained appreciation among scientists of that time, the technical imperfections of electrocardiographs and the complexity of manual calculations for a certain period of time reduced the interest of researchers in this method. The advent of digital electrocardiographs and the development of algorithms for the automatic construction of heart vectors gave VCG a second life and allowed us to look at vector theory from a different angle. It became possible to visualize the electrical processes of the myocardium in a three-dimensional image, to calculate the parameters of the depolarization and repolarization vectors. This review summarizes the currently available ideas and research results on the study of VCG. The concepts of global electrical heterogeneity and ventricular gradient based on the vector theory of the heart are discussed. The data of numerous studies testifying to the significant prognostic and diagnostic value of the obtained parameters of VCG are presented.

Keywords: vectorcardiography, digital electrocardiography, global electrical heterogeneity, ventricular gradient, electrical instability of the myocardium

For citation: Oleynikov VE, Chernova AA. Spatial vector cardiography: From origins to the present day. A review. Terapevticheskii Arkhiv. 2025;97(4):360–366. DOI: 10.26442/00403660.2025.04.203149

Появление векторкардиографии

Векторкардиография (ВКГ), насчитывающая более чем столетнюю историю, зародилась как предтеча электрокардиографии (ЭКГ) в 1887 г., когда А. Waller впервые представил дипольную теорию электрического вектора сердца [1]. Идея изучения электрического поля миокарда вдохновила ученых того времени и способствовала ряду важнейших открытий. Так, в 1913 г. W. Einthoven, G. Fahr и A. Waart описали возможность определения электрической оси сердца в виде результирующего вектора комплекса QRS во фронтальной плоскости при помощи равнобедренного треугольника, позднее

получившего известность как треугольник Einthoven [2]. Развивая концепцию векторного анализа, Н. Mann в 1920-х годах ввел понятие «петля» для описания последовательных векторов во фронтальной плоскости, назвав ее монокардиограммой [3]. Путем кропотливых расчетов автору удалось построить петлю только для комплекса QRS, поскольку иные отклонения ЭКГ были слишком малы для подобного анализа, а технические возможности весьма ограничены. Стоит отметить, что именно Н. Mann был первым, кто высказал идею о трехмерном изображении петель сердечного цикла, что позже легло в основу «пространственной ВКГ» [4].

Информация об авторах / Information about the authors

[✉]Олейников Валентин Элиевич – д-р мед. наук, проф., зав. каф. терапии Медицинского института.
E-mail: v.oleynikov@gmail.com

Чернова Ангелина Андреевна – аспирант каф. терапии Медицинского института

[✉]Valentin E. Oleynikov. E-mail: v.oleynikov@gmail.com;
ORCID: 0000-0002-7463-9259

Angelina A. Chernova. ORCID: 0009-0002-7957-8034

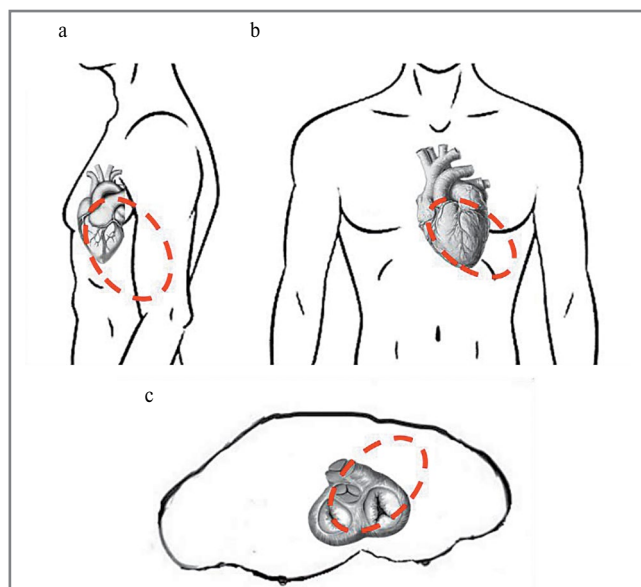


Рис. 1. Схематичное изображение петель сердечного цикла в сагитальной (а), вертикальной (b) и горизонтальной (с) плоскостях.

Fig. 1. Schematic representation of the loops of the cardiac cycle in the sagittal (a), vertical (b) and horizontal (c) planes.

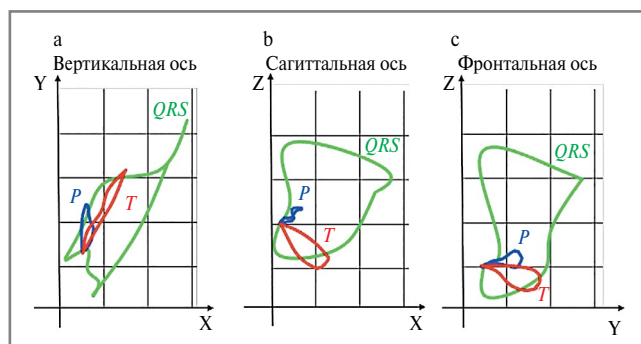


Рис. 2. Петли де- и реполяризации, построенные за время 1 сердечного цикла в 3 ортогональных плоскостях.

Fig. 2. De- and repolarization loops built during 1 cardiac cycle in 3 orthogonal planes.

В начале 1930-х годов F. Wilson построил векторные величины деполяризации (комплекс QRS) и реполяризации (волна T) пропорционально площадям, вписанным в QRS и T соответственно. Автор высказал гипотезу о том, что алгебраическая сумма векторов двух данных площадей в одном отведении будет равняться 0, так как они будут иметь одинаковую величину и противоположное направление, если не будет пространственно-временной неоднородности потенциала действия (ПД) за время сердечного цикла. К своему удивлению, после серии экспериментов на сердцах собак F. Wilson обнаружил, что полученные показатели в каждом случае были отличны от нулевого значения. Полученный остаток, т.е. разность векторов, отражающих площади QRS и T, автор представил в виде 3-го вектора QRST, дав ему название «желудочковый градиент» (ЖГ), подчеркивая тем самым наличие локальных различий между процессами де- и реполяризации миокарда [5, 6].

Ограничения одной фронтальной плоскости для описания электрических процессов сердца как трехмерного

объекта становились все более очевидными. Для решения данной проблемы предпринято немало попыток создания унифицированной системы отведений для записи электрической активности миокарда в 3 взаимно перпендикулярных плоскостях [7, 8]. Наиболее удачной из них и широко используемой в настоящее время оказалась система, разработанная E. Frank, с применением 7 электродов, формирующих 3 ортогональных отведения: X, Y, Z [9]. Она позволила производить расчет векторов и построение петель сердечного цикла в сагитальной, вертикальной и горизонтальной плоскостях тела человека одновременно (рис. 1).

Первые шаги к созданию трехмерной ВКГ

В 1954 г. G. Burch и E. Simonson разработали концепцию пространственной ВКГ, создав формулу для расчета ЖГ в виде трехмерного вектора сердца [10, 11]. Продолжив изучение происхождения ЖГ, G. Burch пришел к теоретическому выводу о том, что вектор ЖГ всегда указывает на область миокарда с самым коротким периодом возбуждения и, более того, не зависит от места активации электрического импульса [12]. В 1959 г. эти предположения были подтверждены экспериментально M. Gardberg и соавт. при стимуляции полосы желудочка черепахи, а также в более поздних работах рядом других авторов [13–15]. Кроме этого, в 1983 г. D. Geselowitz доказал, что ЖГ зависит не только от неоднородности продолжительности, но и от пространственных различий ПД в различных участках миокарда. Таким образом, различия амплитуд, подъемов и спусков ПД также влияют на формирование данного вектора [16]. Это позволило считать ЖГ своеобразным отражением электрической гетерогенности миокарда, мерой трансмуральной дисперсии реполяризации.

Изучение ВКГ как неинвазивного метода диагностики известных на то время заболеваний сердца достигло своего пика в 1960–70-х годах [17]. Однако технические несовершенства электрокардиографов, трудоемкость ручных расчетов при построении векторов в период появления эхокардиографии, магнитно-резонансной (МРТ) и компьютерной томографии обусловили снижение интереса к ВКГ. Это привело к значительному уменьшению числа исследовательских и медицинских учреждений, способных выполнять и интерпретировать векторкардиограмму, диагностический потенциал которой так и не был реализован в полной мере.

Дальнейшее развитие компьютерных технологий, создание ЭКГ высокого разрешения и разработка алгоритмов, позволяющих автоматизировать процесс построения ВКГ-петель в 3 ортогональных отведениях, значительно упростили получение информации, представленной в виде трехмерных изображений, в связи с чем интерес к ВКГ возродился [18]. Появилась возможность построения электрического вектора на протяжении всего сердечного цикла, образующего петли не только желудочковой деполяризации (QRS-петли) и реполяризации (T-петли), но и предсердной активности (P-петли; рис. 2). Более того, с появлением поверхностного картирования ЭКГ было доказано, что локальная неравномерность процессов де- и реполяризации существует в миокарде каждого человека вне зависимости от наличия или отсутствия патологии. Таким образом, субстратом для формирования ЖГ служат различия морфологии ПД между эпи- и эндокардиальными участками, а также базальными и верхушечными отделами. Известно, что ПД эндокардиальных кардиомиоцитов длиннее, чем эпикардиальных, а ПД апикальных клеток несколько превышает таковой базальных [19, 20].

Арсенал технических возможностей компьютерной обработки записей ЭКГ подарил вторую жизнь концепции ЖГ, главным клиническим применением которой поначалу стало выявление и дифференциация первичных и вторичных изменений зубца *T* [21]. Показано, что первичные изменения зубца *T*, обусловленные, например, ишемией миокарда, сопровождаются изменениями значений ЖГ, так как влияют на морфологию и продолжительность ПД, тогда как вторичные изменения (блокады ножек пучка Гиса, желудочковая стимуляция) опосредуют изменения в процессах деполяризации, но не влияют на ПД, а следовательно, не приводят к значительным изменениям ЖГ [20].

Концепция глобальной электрической гетерогенности миокарда

В 2016 г. J. Waks и L.G. Tereshchenko создали концепцию глобальной электрической гетерогенности (ГЭГ), основанную на расчетах пространственного ЖГ и заслуживающую, на наш взгляд, отдельного внимания [22, 23]. Авторы постулировали ГЭГ как глобальную меру электрической неоднородности миокарда. Путем математических расчетов ими были получены 5 ВКГ-параметров, в той или иной степени являющихся производными вектора ЖГ:

- 1) величина пространственного ЖГ;
- 2) азимут пространственного ЖГ;
- 3) высота пространственного ЖГ;
- 4) скалярное значение пространственного ЖГ (SAI_{QRST});
- 5) пространственный угол $QRS-T$.

Стоит отметить, что последний из них, пространственный угол $QRS-T$, представляющий собой угол между средними векторами QRS и T (рис. 3), к моменту создания концепции ГЭГ уже зарекомендовал себя как параметр, способный предсказывать общую смертность в популяции, внезапную сердечную смерть (ВСС), а также аритмические события у пациентов, перенесших острый инфаркт миокарда (ОИМ) [24–26]. Так, по данным крупного многоцентрового исследования ARIC (Atherosclerosis Risk in Communities), включающего более 15 тыс. человек, аномальные значения пространственного угла $QRS-T$ связаны с увеличением риска общей смертности среди обоих полов и являлись независимым предиктором развития ишемической болезни сердца у женщин (относительный риск – ОР 2,14, 95% доверительный интервал – ДИ 1,62–2,82) [27]. В более поздних работах показатель $QRS-T$ наряду с другими известными предикторами стал все чаще фигурировать в прогностических шкалах по стратификации риска ВСС. Однако ввиду различий в методах построения и расчета угла $QRS-T$ рядом исследователей получены разные пороговые значения границ между нормой и патологией [28].

Параметр SAI_{QRST} представляет собой сумму площадей под кривой $QRST$ выше и ниже изолинии в 3 ортогональных плоскостях (рис. 4). Первое упоминание об этом параметре относится к 2010 г., когда L.G. Tereshchenko и соавт. в рамках проспективного когортного исследования пациентов с показаниями к имплантации кардиовертера-дефибриллятора с целью первичной профилактики (Prospective Observational Study of Implantable Cardioverter Defibrillators – PROSE-ICD) обнаружили, что $SAI_{QRST} \leq 145$ мВ×мс ассоциирован с 3-кратным увеличением риска желудочковой тахикардии и/или фибрилляции желудочков (ОР 3,25, 95% ДИ 1,59–6,75) [29]. Это позволило авторам выдвинуть гипотезу о том, что данный параметр может служить отражением электрического ремоделирования миокарда. Проанализировав в дальнейшем

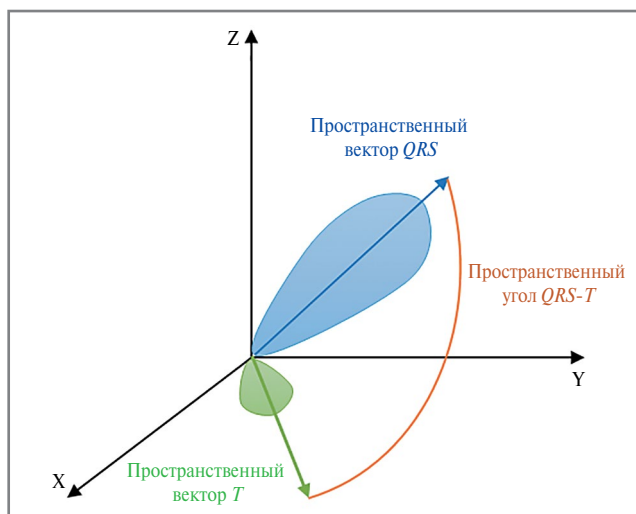


Рис. 3. Схематичное изображение пространственного угла $QRS-T$.

Fig. 3. Schematic representation of the $QRS-T$ spatial angle.

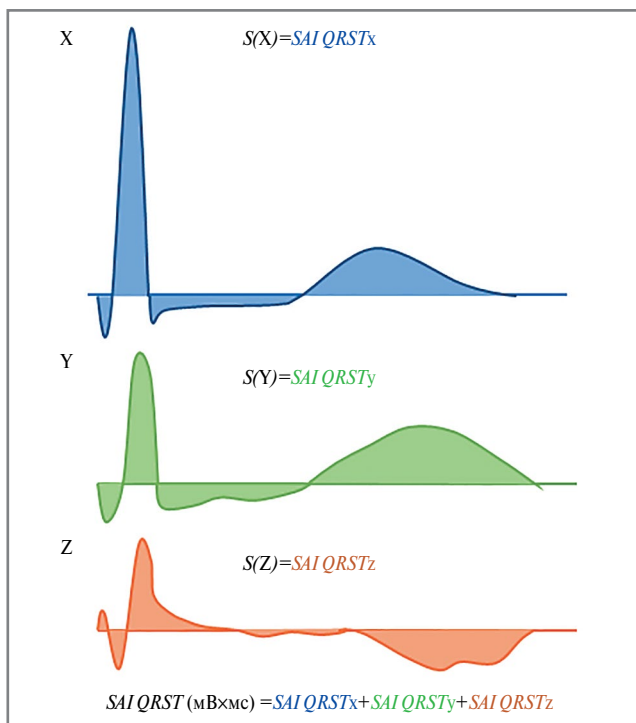


Рис. 4. Алгоритм расчета SAI_{QRST} по 3 ортогональным отведениям: X, Y, Z.

Fig. 4. Algorithm for calculating SAI_{QRST} using 3 orthogonal leads: X, Y, Z.

ЭКГ 750 участников исследования MADIT II (Multicenter Automatic Defibrillator Implantation Trial), перенесших ОИМ, в ходе многофакторного регрессионного анализа Кокса продемонстрировано, что увеличение значения SAI_{QRST} предсказывало ВСС, жизнеугрожающие нарушения ритма (ОР 1,33, 95% ДИ 1,11–1,59), а также смерть от других причин (ОР 1,33, 95% ДИ 1,03–1,55). Кроме того, обнаружена корреляция SAI_{QRST} со временем после ОИМ: наибольшие его значения отмечались в первые 3 мес от индексного события. Интересным представляется и тот

факт, что наличие блокад ножек пучка Гиса не искажало прогностической значимости данного показателя [30].

Продолжив изучение SAI QRST как маркера ВСС наряду с другими параметрами ГЭГ, S. Sur и соавт. провели анализ гендерных различий среди здоровых мужчин и женщин. По его итогам продемонстрировано, что большая лабильность реполяризации связана с мужским полом [31]. Принимая во внимание тот факт, что повышенная изменчивость реполяризации лежит в основе развития жизнеугрожающих нарушений ритма [32], полученные данные представляются весьма интересными и, вполне возможно, объясняют большую частоту ВСС среди лиц мужского пола. Стоит также отметить, что ранее известные параметры, применяемые для описания реполяризации, базировались на оценке дисперсии интервала QT [19]. Однако их существенным ограничением является вклад процессов деполяризации, которого лишены показатели ГЭГ, что делает их более специфичными.

Разработке концепции ГЭГ как единого современного прогностического инструмента ВСС предшествовала масштабная работа исследователей во главе с L.G. Tereshchenko. Для получения широко обобщаемых результатов авторами объединены 2 крупных межрасовых исследования ARIC и CHS (Cardiovascular Health Study), общая численность участников которых составила более 20 тыс. человек. Расчеты параметров ГЭГ осуществляли в ортогональной системе (X, Y, Z), полученной из 10-секундных цифровых записей 12-канальной ЭКГ путем преобразования Фурье. Первичной конечной точкой являлась ВСС. Результаты анализа оказались весьма многообещающими, параметры ГЭГ оставались независимо связаны с риском развития ВСС даже после многофакторной корректировки с учетом известных факторов риска. Кроме того, все показатели ГЭГ, хотя и являются комплементарными, не коррелировали между собой, что свидетельствовало об их взаимодополняющем характере и различном способе оценки электрической нестабильности миокарда [33].

Последующие исследования данной популяции пациентов показали, что увеличение ГЭГ ассоциировалось с ухудшением систолической функции и дилатацией левого желудочка (ЛЖ). Так, рост SAI QRST на 20 мВ×мс за каждые 3 года наблюдался среди участников с дальнейшей дилатацией ЛЖ, а увеличение на 100 мВ×мс и более связано с уменьшением фракции выброса ЛЖ на 2% (95% ДИ 1,6–2,1%). Аналогичные данные получены и для других параметров ГЭГ: угла QRS-T, азимута и высоты пространственного вектора ЖГ [34]. Для подтверждения гипотезы о том, что параметры ГЭГ отражают субклиническое поражение миокарда, группа исследователей – L.G. Tereshchenko и соавт. – изучили взаимосвязь между динамикой высокочувствительного тропонина I (high sensitivity troponin I – hs-TnI) и SAI QRST у пациентов с подозрением на ОИМ в течение первых 3 ч с момента обращения за медицинской помощью [35]. По итогам исследования выявлена линейная связь между обоими показателями, особенно выраженная в группе пациентов с развившейся острой декомпенсацией сердечной недостаточности: нарастание hs-TnI в 10 раз у исследуемых больных сопровождалось увеличением SAI QRST на 61 мВ×мс и более (95% ДИ 5,9–116,1).

В свете данных о том, что серийно повышенная концентрация hs-TnI ассоциирована с риском неблагоприятных сердечно-сосудистых исходов и развитием патологического ремоделирования [36], процесс которого на начальных стадиях протекает бессимптомно, изучение параметров ГЭГ как ранних предикторов структурной перестройки

миокарда представляется особенно важным для своевременной персонализации лечения пациентов.

Успех полученных результатов вдохновил группу L.G. Tereshchenko и соавт. на создание концепции ГЭГ с последующим поиском способов ее внедрения в клиническую практику. Для этого разработано программное обеспечение MATLAB (MathWorks, США) с открытым доступом, позволяющее любому желающему преобразовать цифровые записи стандартной 12-канальной ЭКГ в ортогональную систему Франка и произвести расчет параметров ГЭГ [37]. Спустя несколько лет подобная возможность реализована и для бумажных записей ЭКГ при помощи алгоритмов оцифровки данных [38]. Таким образом, идея F. Wilson о ЖГ была претворена в жизнь с помощью компьютерных алгоритмов и популяризирована для рутинного клинического применения.

Современные исследования в области пространственной ВКГ и ГЭГ

После выхода в свет унифицированных алгоритмов расчета ГЭГ исследования в области ВКГ были продолжены. В частности, продемонстрирована высокая воспроизводимость параметров ГЭГ на фоне фибрилляции/трепетания предсердий и желудочковой стимуляции, что позволило существенно расширить область их клинического использования [39]. Устранив таким образом влияние мерцательной аритмии как одного из факторов риска на развитие ишемического инсульта, авторам удалось изучить иные особенности электрофизиологического субстрата, обуславливающие риск развития кардиоэмболических событий [40]. На основании выявленных факторов риска и показателей ГЭГ составлены модели для прогнозирования как ишемического, так и геморрагического инсульта, а также доказан вклад в их развитие «сердечной памяти», опосредованной частой желудочковой экстрасистолией. Более того, независимость ЖГ от последовательности активации желудочков позволила изучить влияние феномена «сердечной памяти», определяемого как вектор реполяризации, на терапию пациентов с электрокардиостимуляцией и кардиовертерами-дефибрилляторами и уже имеющимся электрическим ремоделированием миокарда в исследовании CAMI (Cardiac Memory with Implantable Cardioverter-defibrillator) [41]. Выявлено, что отклонения от нормы вектора ЖГ предполагают накопление критической массы аномального электрического субстрата, ответственного за развитие устойчивых желудочковых аритмий.

Чувствительность ЖГ к электрофизиологическим изменениям миокарда при использовании антиаритмических препаратов описана в исследовании H. Stabenau и соавт. [42]. Авторы акцентировали внимание на гендерных отличиях в изменениях параметров ГЭГ при приеме хинидина, ранолазина, верапамила и дофетилида, что согласуется с данными некоторых исследований, где был получен различный ответ на антиаритмическую терапию среди лиц мужского и женского полов [43]. Последующие работы H. Stabenau показали, что применение параметров ГЭГ может быть полезным для выявления лиц с проаритмогенным эффектом лекарственной терапии. Так, увеличение азимута ЖГ на каждые 30° ассоциировалось с увеличением риска развития желудочковой тахикардии типа «пируэт» на 3,2% вне зависимости от длительности интервала QT [44].

Изучение ГЭГ позволило также выявить половые и расовые различия в процессах реполяризации [45, 46]. В данном аспекте особый интерес представляют резуль-

таты метаанализа упомянутого исследования ARIC. При анализе параметров ГЭГ у 15 тыс. пациентов K. Jensen и соавт. не выявили влияния расы на электрофизиологический субстрат, связанный с ВСС. Однако после корректировки на традиционные факторы риска сердечно-сосудистых событий, такие как ожирение и артериальная гипертензия, величины ЖГ и SAI QRS-T продемонстрировали значительно более сильную связь с ВСС среди чернокожих пациентов по сравнению с участниками белой расы [47]. Это указывает на необходимость выявления пороговых значений для каждого предиктора ВСС с учетом расы.

Популярность пространственной ВКГ как неинвазивного прогностического инструмента продолжает расти [47]. Появляется все больше исследовательских центров, изучающих различные сферы его применения. Группа C. Jensen и соавт. проанализировала взаимосвязь фронтального угла QRS-T с параметрами MPT с контрастным усилением среди пациентов с подозрением на миокардит. Результаты исследования показали, что значения угла QRS-T свыше 90° с чувствительностью 16,5% и специфичностью 100% предсказывали наличие некроза миокарда или фиброзного рубца по данным MPT. При этом отрицательная и положительная прогностическая ценность составили 24,7 и 100% соответственно [48]. Увеличение угла QRS-T коррелировало с размером фиброзного рубца и у пациентов с ОИМ и гипертрофической кардиомиопатией, что позволило рассматривать данный параметр как более доступный маркер стратификации риска и альтернативу при отсутствии возможности проведения MPT [49, 50]. В ретроспективном анализе пациентов с подтвержденной тромбоэмболией легочной артерии обнаружили, что увеличение величины ЖГ тесно коррелирует с дисфункцией правого желудочка и связано с неблагоприятными исходами. Более того, характеристики ЖГ имели лучшую прогностическую ценность по сравнению с традиционными параметрами ЭКГ [51]. Изменения пространственного угла QRS-T и величина ЖГ коррелируют не только с систолической, но и диастолической дисфункцией правого желудочка у пациентов с идиопатической и хронической тромбоэмболической легочной гипертензией, что продемонстрировано и в исследовании Т.А. Сахановой и соавт. [52]. Ими также получены убедительные данные, свидетельствующие о высокой ценности ВКГ как прогностического инструмента при различных заболеваниях сердечно-сосудистой системы, в том числе гипертонической болезни и ишемической болезни сердца [53, 54].

Отдельного внимания заслуживает исследование китайских ученых J. Chen и соавт., которым удалось инте-

грировать параметры ВКГ в систему холтеровского мониторингирования ЭКГ (Biomedical Instruments, Шэньчжэнь, Китай) [55]. Для анализа использовали 1-минутный отрезок записи в 4 ч утра, как период, характеризующийся максимальной электрической нестабильностью миокарда и минимальным влиянием физических нагрузок и эмоциональных факторов. Результаты характеризовались высокой степенью воспроизводимости в сравнении со стационарной ВКГ.

Заключение

Идея F. Wilson о трехмерном построении электрического вектора реализована благодаря современным методам компьютерной обработки данных. Прошло почти 100 лет, прежде чем диагностический и прогностический потенциал пространственной ВКГ доказал свое право на существование. Накопленные данные многочисленных исследований свидетельствуют о том, что ВКГ таит в себе еще немало загадок, ответы на которые приблизят нас к пониманию аритмогенных и иных процессов в миокарде. Вероятно, параметры ВКГ найдут рутинное применение и помогут своевременному выявлению больных высокого риска ВСС до манифестации сердечно-сосудистых событий.

Раскрытие интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Disclosure of interest. The authors declare that they have no competing interests.

Вклад авторов. Авторы декларируют соответствие своего авторства международным критериям ICMJE. Все авторы в равной степени участвовали в подготовке публикации: разработка концепции статьи, получение и анализ фактических данных, написание и редактирование текста статьи, проверка и утверждение текста статьи.

Authors' contribution. The authors declare the compliance of their authorship according to the international ICMJE criteria. All authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work.

Источник финансирования. Авторы декларируют отсутствие внешнего финансирования для проведения исследования и публикации статьи.

Funding source. The authors declare that there is no external funding for the exploration and analysis work.

Список сокращений

ВКГ – векторкардиография
ВСС – внезапная сердечная смерть
ГЭГ – глобальная электрическая гетерогенность
ДИ – доверительный интервал
ЖГ – желудочковый градиент
ЛЖ – левый желудочек

MPT – магнитно-резонансная томография
ОИМ – острый инфаркт миокарда
ОР – относительный риск
ПД – потенциал действия
ЭКГ – электрокардиография
hs-TnI (high sensitivity troponin I) – высокочувствительный тропонин I

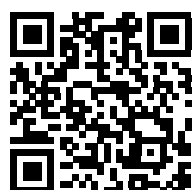
ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

1. Waller AD. A Demonstration on man of electromotive changes accompanying the heart's beat. *J Physiol.* 1887;8(5):229-34. PMID:16991463
2. Einthoven W, Fahr G, de Waart A. Über die Richtung und die manifeste Grösse der Potentialschwankungen im menschlichen Herzen und über den Einfluss der Herzlage auf die Form des Elektrokardiogramms. *Pflügers Arch ges Physiol.* 1913;150:275-315.
3. Mann H. A method of analyzing the electrocardiogram. *Arch Intern Med (Chic).* 1920;25(3):283-94.

4. Burch GE. The history of vectorcardiography. *Med Hist Suppl.* 1985;(5):103-31. PMID:3915520
5. Wilson FN, Macleod AG, Barker PS, Johnston FD. The determination and the significance of the areas of the ventricular deflections of the electrocardiogram. *Am Heart J.* 1934;10(1):46-61.
6. Wilson FN, MacLeod AG, Barker PS. The T deflection of the electrocardiogram. *Trans Assoc Am Physicians.* 1931;46:29-38.
7. Grishman A, Borun ER, Jaffe HL. Spatial vectorcardiography: Technique for the simultaneous recording of the frontal, sagittal, and horizontal projections. *Am Heart J.* 1951;41(4):483-93. PMID:14818957
8. Milnor WR, Talbot SA, Newman EV. A study of the relationship between unipolar leads and spatial vectorcardiograms, using the panoramic vectorcardiograph. *Circulation.* 1953;7(4):545-57. PMID:13033081
9. Frank E. An accurate, clinically practical system for spatial vectorcardiography. *Circulation.* 1956;13(5):737-49. PMID:13356432
10. Burch GE, Abildskov AA, Cronvich JA. A study of the spatial vectorcardiogram of the ventricular gradient. *Circulation.* 1954;9(2):267-75. PMID:13127188
11. Simonson E, Schmitt OH, Dahl J, et al. The theoretical and experimental bases of the frontal plane ventricular gradient and its spatial counterpart. *Am Heart J.* 1954;47(1):122-53. PMID:13114180
12. Burger HC. A theoretical elucidation of the notion ventricular gradient. *Am Heart J.* 1957;53(2):240-6. PMID:13394523
13. Gardberg M, Rosen IL. Monophasic curve analysis and the ventricular gradient in the electrogram of strips of turtle ventricle. *Circ Res.* 1959;7:870-5. PMID:13826483
14. Lux RL, Urie PM, Burgess MJ, Abildskov JA. Variability of the body surface distributions of QRS, ST-T and QRST deflection areas with varied activation sequence in dogs. *Cardiovasc Res.* 1980;14(10):607-12. PMID:7214395
15. Sridharan MR, Horan LG, Hand RC, et al. The determination of the human ventricular gradient from body surface potential map data. *J Electrocardiol.* 1981;14(4):399-406. PMID:7299310
16. Geselowitz DB. The ventricular gradient revisited: Relation to the area under the action potential. *IEEE Trans Biomed Eng.* 1983;30(1):76-7. PMID:6826192
17. Юрасова Е.С., Блинова Е.В., Сахнова Т.А. К истории векторкардиографии: прошлое, настоящее, будущее. *Терапевтический архив.* 2022;94(9):1122-5 [Yurasova ES, Blinova EV, Sakhnova TA. On the history of vectorcardiography: Past, present, future. *Terapevticheskii Arkhiv (Ter. Arkh.).* 2022;94(9):1122-5 (in Russian)]. DOI:10.26442/00403660.2022.09.201841
18. Vondrak J, Penhaker M. Review of processing pathological vectorcardiographic records for the detection of heart disease. *Front Physiol.* 2022;13:856590. DOI:10.3389/fphys.2022.856590
19. Prenner SB, Shah SJ, Goldberger JJ, Sauer AJ. Repolarization heterogeneity: Beyond the QT interval. *J Am Heart Assoc.* 2016;5(5):e003607. DOI:10.1161/JAHA.116.003607
20. Draisma HH, Schalij MJ, van der Wall EE, Swenne CA. Elucidation of the spatial ventricular gradient and its link with dispersion of repolarization. *Heart Rhythm.* 2006;3(9):1092-9. DOI:10.1016/j.hrthm.2006.05.025
21. Hurst JW. Thoughts about the ventricular gradient and its current clinical use (part II of II). *Clin Cardiol.* 2005;28(5):219-24. DOI:10.1002/clc.4960280504
22. Waks JW, Tereshchenko LG. Global electrical heterogeneity: A review of the spatial ventricular gradient. *J Electrocardiol.* 2016;49(6):824-30. DOI:10.1016/j.jelectrocard.2016.07.025
23. Tereshchenko LG. Global electrical heterogeneity: Mechanisms and clinical significance. *Comput Cardiol (2010).* 2018;45:10.22489/cinc.2018.165. DOI:10.22489/cinc.2018.165
24. Kors JA, Kardys I, van der Meer IM, et al. Spatial QRS-T angle as a risk indicator of cardiac death in an elderly population. *J Electrocardiol.* 2003;36(Suppl.):113-4. DOI:10.1016/j.jelectrocard.2003.09.033
25. Yamazaki T, Froelicher VF, Myers J, et al. Spatial QRS-T angle predicts cardiac death in a clinical population. *Heart Rhythm.* 2005;2(1):73-8. DOI:10.1016/j.hrthm.2004.10.040
26. Aro AL, Huikuri HV, Tikkanen JT, et al. QRS-T angle as a predictor of sudden cardiac death in a middle-aged general population. *Europace.* 2012;14(6):872-6. DOI:10.1093/europace/eur393
27. Zhang ZM, Prineas RJ, Case D, et al.; ARIC Research Group. Comparison of the prognostic significance of the electrocardiographic QRS/T angles in predicting incident coronary heart disease and total mortality (from the atherosclerosis risk in communities study). *Am J Cardiol.* 2007;100(5):844-9. DOI:10.1016/j.amjcard.2007.03.104
28. Блинова Е.В., Сахнова Т.А., Юрасова Е.С. Диагностическое и прогностическое значение угла QRS-T. *Терапевтический архив.* 2020;92(9):85-93 [Blinova EV, Sakhnova TA, Yurasova ES. Diagnostic and prognostic significance of QRS-T angle. *Terapevticheskii Arkhiv (Ter. Arkh.).* 2020;92(9):85-93 (in Russian)]. DOI:10.26442/00403660.2020.09.000752
29. Tereshchenko LG, Cheng A, Fetics BJ, et al. Ventricular arrhythmia is predicted by sum absolute QRST integral but not by QRS width. *J Electrocardiol.* 2010;43(6):548-52. DOI:10.1016/j.jelectrocard.2010.07.013
30. Tereshchenko LG, McNitt S, Han L, et al. ECG marker of adverse electrical remodeling post-myocardial infarction predicts outcomes in MADIT II study. *PLoS One.* 2012;7(12):e51812. DOI:10.1371/journal.pone.0051812
31. Sur S, Han L, Tereshchenko LG. Comparison of sum absolute QRST integral, and temporal variability in depolarization and repolarization, measured by dynamic vectorcardiography approach, in healthy men and women. *PLoS One.* 2013;8(2):e57175. DOI:10.1371/journal.pone.0057175
32. Pueyo E, Corrias A, Virág L, et al. A multiscale investigation of repolarization variability and its role in cardiac arrhythmogenesis. *Biophys J.* 2011;101(12):2892-902. DOI:10.1016/j.bpj.2011.09.060
33. Waks JW, Sitlani CM, Soliman EZ, et al. Global electric heterogeneity risk score for prediction of sudden cardiac death in the general population: The Atherosclerosis Risk in Communities (ARIC) and Cardiovascular Health (CHS) studies. *Circulation.* 2016;133(23):2222-34. DOI:10.1161/CIRCULATIONAHA.116.021306
34. Biering-Sørensen T, Kabir M, Waks JW, et al. Global ECG measures and cardiac structure and function: The ARIC Study (Atherosclerosis Risk in Communities). *Circ Arrhythm Electrophysiol.* 2018;11(3):e005961. DOI:10.1161/CIRCEP.117.005961
35. Tereshchenko LG, Feeny A, Shelton E, et al. Dynamic changes in high-sensitivity cardiac troponin I are associated with dynamic changes in sum absolute QRST integral on surface electrocardiogram in acute decompensated heart failure. *Ann Noninvasive Electrocardiol.* 2017;22(1):e12379. DOI:10.1111/anec.12379
36. Javed N, El-Far M, Vittorio TJ. Clinical markers in heart failure: A narrative review. *J Int Med Res.* 2024;52(5):3000605241254330. DOI:10.1177/03000605241254330
37. Perez-Alday EA, Bender A, German D, et al. Dynamic predictive accuracy of electrocardiographic biomarkers of sudden cardiac death within a survival framework: The Atherosclerosis Risk in Communities (ARIC) study. *BMC Cardiovasc Disord.* 2019;19(1):255. DOI:10.1186/s12872-019-1234-9
38. Fortune JD, Coppa NE, Haq KT, et al. Digitizing ECG image: A new method and open-source software code. *Comput Methods Programs Biomed.* 2022;221:106890. DOI:10.1016/j.cmpb.2022.106890
39. Haq KT, Lutz KJ, Peters KK, et al. Reproducibility of global electrical heterogeneity measurements on 12-lead ECG: The multi-ethnic study of atherosclerosis. *J Electrocardiol.* 2021;69:96-104. DOI:10.1016/j.jelectrocard.2021.09.014
40. Johnson JA, Haq KT, Lutz KJ, et al. Electrophysiological ventricular substrate of stroke: A prospective cohort study in the Atherosclerosis Risk in Communities (ARIC) study. *BMJ Open.* 2021;11(9):e048542. DOI:10.1136/bmjopen-2020-048542
41. Haq KT, Cao J, Tereshchenko LG. Characteristics of cardiac memory in patients with implanted cardioverter-defibrillators: The Cardiac Memory with Implantable Cardioverter-defibrillator (CAMI) study. *J Innov Card Rhythm Manag.* 2021;12(2):4395-408. DOI:10.19102/icrm.2021.120204
42. Stabenau HF, Shen C, Tereshchenko LG, et al. Changes in global electrical heterogeneity associated with dofetilide, quinidine, ranolazine, and verapamil. *Heart Rhythm.* 2020;17(3):460-7. DOI:10.1016/j.hrthm.2019.09.017
43. Peirlinck M, Sahli Costabal F, Kuhl E. Sex differences in drug-induced arrhythmogenesis. *Front Physiol.* 2021;12:708435. DOI:10.3389/fphys.2021.708435

44. Stabenau HF, Shen C, Zimetbaum P, et al. Global electrical heterogeneity associated with drug-induced torsades de pointes. *Heart Rhythm*. 2021;18(1):57-62. DOI:10.1016/j.hrthm.2020.07.038
45. Pollard JD, Haq KT, Lutz KJ, et al. Sex differences in vectorcardiogram of African-Americans with and without cardiovascular disease: A cross-sectional study in the Jackson Heart Study cohort. *BMJ Open*. 2021;11(1):e042899. DOI:10.1136/bmjopen-2020-042899
46. Howell SJ, German D, Bender A, et al. Does sex modify an association of electrophysiological substrate with sudden cardiac death? The Atherosclerosis Risk in Communities (ARIC) study. *Cardiovasc Digit Health J*. 2020;1(2):80-8. DOI:10.1016/j.cvdhj.2020.08.003
47. Jensen K, Howell SJ, Phan F, et al. Bringing critical race praxis into the study of electrophysiological substrate of sudden cardiac death: The ARIC study. *Am Heart Assoc*. 2020;9(3):e015012. DOI:10.1161/JAHA.119.015012
48. Jensen CJ, Zadeh B, Wambach JM, et al. Association of QRS-T angle and late gadolinium enhancement in patients with a clinical suspicion of myocarditis. *Int J Med Sci*. 2021;18(13):2905-9. DOI:10.7150/ijms.57010
49. Zadeh B, Wambach JM, Lambers M, et al. QRS-T-angle in patients with ST-segment Elevation Myocardial Infarction (STEMI) – A comparison with cardiac magnetic resonance imaging. *Int J Med Sci*. 2020;17(15):2264-8. DOI:10.7150/ijms.44312
50. Jensen CJ, Lambers M, Zadeh B, et al. QRS-T angle in patients with hypertrophic cardiomyopathy – A comparison with cardiac magnetic resonance imaging. *Int J Med Sci*. 2021;18(3):821-5. DOI:10.7150/ijms.52415
51. Stabenau HF, Marcus M, Matos JD, et al. The spatial ventricular gradient is associated with adverse outcomes in acute pulmonary embolism. *Ann Noninvasive Electrocardiol*. 2023;28(3):e13041. DOI:10.1111/anec.13041
52. Сахнова Т.А., Блинова Е.В., Белевская А.А., и др. Сопоставление интегральных показателей векторкардиограммы с данными эхокардиографического исследования у больных идиопатической и хронической тромбоэмболической легочной гипертензией. *Терапевтический архив*. 2019;91(3):11-6 [Sakhnova TA, Blinova EV, Belevskaya AA, et al. Comparison of the integral indices of the vectorcardiogram with the data of echocardiography in patients with idiopathic and chronic thromboembolic pulmonary hypertension. *Terapevticheskii Arkhiv (Ter. Arkh.)*. 2019;91(3):11-6 (in Russian)]. DOI:10.26442/00403660.2019.03.000043
53. Сахнова Т.А., Блинова Е.В., Юрасова Е.С., и др. Особенности векторкардиограмм у больных гипертонической болезнью, осложненной хронической сердечной недостаточностью со сниженной фракцией выброса левого желудочка. *Терапевтический архив*. 2022;94(9):1067-71 [Sakhnova TA, Blinova EV, Yurasova ES, et al. Features of vectorcardiograms in patients with hypertension complicated by chronic heart failure with reduced left ventricle ejection fraction. *Terapevticheskii Arkhiv (Ter. Arkh.)*. 2022;94(9):1067-71 (in Russian)]. DOI:10.26442/00403660.2022.09.201843
54. Сахнова Т.А., Блинова Е.В., Доценко Ю.В., и др. Выявление систолической дисфункции левого желудочка у пациентов с ишемической болезнью сердца с помощью пространственного и фронтального углов QRS-T электрокардиограммы. *Терапевтический архив*. 2024;96(4):337-41 [Sakhnova TA, Blinova EV, Dotsenko YV, et al. Detection of left ventricular systolic dysfunction in patients with ischemic heart disease using spatial and frontal QRS-T angles of the electrocardiogram. *Terapevticheskii Arkhiv (Ter. Arkh.)*. 2024;96(4):337-41 (in Russian)]. DOI:10.26442/00403660.2024.04.202695
55. Chen J, Lin Y, Yu J, et al. Changes of virtual planar QRS and T vectors derived from holter in the populations with and without diabetes mellitus. *Ann Noninvasive Electrocardiol*. 2016;21(1):69-81. DOI:10.1111/anec.12276

Статья поступила в редакцию / The article received: 15.09.2024



OMNIDOCTOR.RU