

Сравнительная оценка variability показателей традиционной и усредненной ЭКГ

Аннотация

Представлен способ компьютерной обработки электрокардиограмм, позволяющий производить усреднение электрокардио-сигнала в течение длительного времени. Приведены результаты сравнительной оценки variability амплитудных и временных показателей традиционной и усредненной электрокардиографии. Продемонстрировано преимущество усредненной электрокардиографии перед традиционным способом обработки электрокардиосигнала для персонализированного контроля электрокардиографических изменений.

Введение

Среди многообразия диагностических методик, используемых в кардиологии, наиболее востребованным и широко применяемым в практике остается метод электрокардиографии (ЭКГ). Наряду с диагностикой изменений сердца важной задачей ЭКГ также является оценка их динамики с целью контроля эффективности и безопасности терапевтических вмешательств.

Ограничение использования ЭКГ для динамического контроля конкретного признака связано с выраженной variability амплитудно-временных показателей, которая, согласно литературным данным, по отдельным отведениям может достигать 80 % [1]-[3]. Низкая воспроизводимость ЭКГ затрудняет интерпретацию результатов повторных исследований, так как динамика того или иного электрокардиографического показателя может быть связана не с реальными изменениями миокарда, а являться следствием случайных ошибок, обусловленных особенностями метода.

Таким образом, повышение надежности результатов ЭКГ представляется актуальной задачей. Улучшению диагностических возможностей метода может способствовать внедрение электронно-вычислительной техники, позволяющей путем математической обработки нивелировать недостатки традиционной ЭКГ. Существует метод усредненной ЭКГ или ЭКГ высокого разрешения, основной принцип которого сводится к математическому усреднению множества кардиоциклов, что позволяет «очистить» кардиосигнал от случайных отклонений, связанных с техническими особенностями регистрации [4]. Потенциально использование усреднения ЭКГ при регистрации в общепринятых системах отведений с последующим стандартным анализом позволит повысить качество диагностики как при одномоментном обследовании, так и в динамике.

Цель проведенного нами исследования заключалась в сравнительной оценке variability амплитудных и временных показателей традиционной и усредненной ЭКГ.

Материалы и методы

Исследование проводилось в группе из 20 практически здоровых добровольцев (мужчины и женщины) в возрасте от 35 до 65 лет. Протокол исследования включал в себя измерение антропометрических показателей, артериального давления и

регистрацию ЭКГ в 12 общепринятых отведениях дважды, с интервалом в 1 мин.

Для регистрации ЭКГ использовался 12-канальный компьютеризированный электрокардиограф ЭК9Ц-01-КАРД фирмы «МКС» (Россия, г. Зеленоград). Наложение электродов на конечности и грудную клетку выполнялось строго в соответствии с анатомическими ориентирами. Повторные исследования проводились без снятия электродов для исключения случайной ошибки, связанной с их возможным смещением относительно первоначального положения. Продолжительность записи при первом и повторном исследованиях составляла 5 мин. Регистрацию, архивирование, обработку и усреднение ЭКГ осуществляли с использованием оригинальной компьютерной программы «HR ECG» [5]. Блок регистрации и обработки сигнала программы позволяет осуществлять длительную регистрацию ЭКГ в выбранной системе отведений, сохранение ее на компьютере, усреднение множества кардиокомплексов, автоматическую расстановку меток отдельно выбранного и усредненного комплексов, а также их ручную коррекцию, вывод параметров реального и усредненного комплексов. В качестве параметров традиционной ЭКГ принимались данные обработки отдельного по каждому из 12 отведений комплекса произвольно выбранного кардиоцикла на 5-минутном отрезке записи. Параметрами усредненной ЭКГ считали данные анализа комплексов, полученных при усреднении записи продолжительностью 5 мин в каждом из 12 отведений.

В процессе усреднения ЭКГ выделение кардиокомплексов основывалось на алгоритме J. Pan и W.J. Tompkins (1985 г.), использующим цифровую фильтрацию рекурсивными (БИХ) фильтрами, дифференцирование и нелинейные преобразования сигнала [6]. Усреднение электрокардиографических комплексов осуществлялось путем совмещения по времени нескольких кардиоциклов и последующего вычисления арифметического среднего для каждого отсчета по всем циклам, что позволяло получить результирующий PQRST-комплекс, типичный для конкретного пациента в конкретный момент времени. Для устранения основных причин, препятствующих прямой реализации усреднения, были разработаны алгоритмы выделения изолинии и отбраковки нетипичных и ошибочно распознанных комплексов. Для решения проблемы дрейфа изолинии в каждом комплексе выделялись точки, отвечающие нулевому уровню сигнала, после чего интерполировали результаты не-

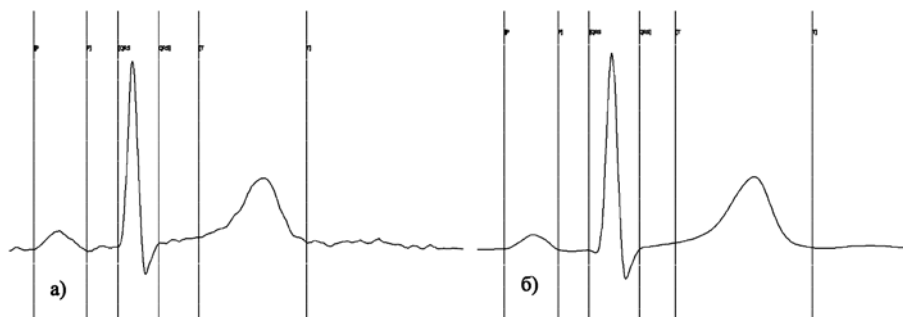


Рис. 1. Различия между традиционной (а) и усредненной (б) ЭКГ

кой гладкой кривой и вычитали ее из исходного сигнала. В качестве таких точек было предложено рассматривать границы всего PQRS-комплекса как точки нулевого уровня. В этом случае были получены две опорные точки для каждого комплекса. Для получения типичного усредненного комплекса из анализа исключали кардиоциклы, значительно отличающиеся по форме (например экстрасистолические). С этой целью каждый комплекс сравнивали с эталоном, полученным путем усреднения нескольких последовательных кардиоциклов, зарегистрированных на участке электрокардиограммы без аномальных комплексов.

Для устранения сетевой наводки использовали фильтр 50 Гц. Различия в качестве зарегистрированной электрокардиограммы до и после обработки с помощью компьютерной программы «HR ECG» представлены на рис. 1. Усредненный кардиокомплекс, благодаря отсутствию зашумленности, существенно облегчает идентификацию зубцов и интервалов.

При определении воспроизводимости методов оценивались сумма продолжительностей зубца P, интервала PQ, комплекса QRS и амплитуд зубцов P, Q, R, S и T в I стандартном отведении и в отведении V₅, а также традиционно используемые критерии гипертрофии левого желудочка (индекс Соколова-Лайона, Корнельский вольтаж, Корнельское произведение).

Обработка результатов исследования осуществлялась с помощью компьютерной программы «SPSS 13.00». Для оценки воспроизводимости результатов повторных исследований использовался метод Блэнда-Алтмана с расчетом систематического расхождения, его стандартного отклонения и коэффициента вариабельности [7]. Для определения значимости различий погрешностей повторных измерений традиционной и усредненной ЭКГ использовался t-тест Стьюдента для независимых выборок. Нулевая гипотеза отвергалась при значении *p* менее 0,05.

Результаты

Характеристики пациентов, включенных в исследование, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Исходные характеристики группы (n = 20)

Показатель	Значение
Возраст, лет	46,8 ± 8,3
ИМТ, кг/м ²	26,9 ± 3,9
САД, мм рт. ст.	123,8 ± 13,8
ДАД, мм рт. ст.	80,8 ± 9,0
ЧСС в минуту	69,7 ± 6,7

Примечание – ИМТ – индекс массы тела; САД – систолическое артериальное давление; ДАД – диастолическое артериальное давление; ЧСС – частота сердечных сокращений. Данные представлены как среднее и стандартное отклонения.

Вариабельность показателей в I стандартном отведении и отведении V₅ для традиционной и усредненной ЭКГ отражена в табл. 2. Коэффициент вариабельности временных показателей традиционной ЭКГ составил 8,9 и 11,8 % для I стандартного отведения и отведения V₅ соответственно. Для усредненной ЭКГ этот показатель был в 2...2,5 раза ниже и составил 3,3 и 5,3 % соответственно. По амплитудным характеристикам вариабельность усредненной ЭКГ также была ниже и составила 3,1 и 2,5 % против 7,4 и 8,0 % для I стандартного отведения и отведения V₅ традиционной ЭКГ соответственно. Различия по воспроизводимости между усредненной и традиционной ЭКГ как по временным, так и по амплитудным показателям были статистически значимыми.

В табл. 3 приведены результаты воспроизводимости оцениваемых в исследовании критериев гипертрофии левого желудочка сердца. Как и в случае отдельных показателей, коэффициенты вариабельности для индексов Соколова-Лайона, Корнельского вольтаж и Корнельского произведения при использовании усредненной ЭКГ были достоверно ниже и со-

ставили 1,2; 2,2 и 2,9 % против 12,2; 11,0 и 16,5 % соответственно.

Таблица 2

Воспроизводимость показателей традиционной и усредненной ЭКГ

Показатель	ЭКГ 1-2	σ	Коэффициент вариабельности, %
I стандартное отведение, неусредненная ЭКГ			
Продолжительность, с	0,341	0,030	8,9
Амплитуда, мВ	1,078	0,080	7,4
I стандартное отведение, усредненная ЭКГ			
Продолжительность, с	0,337	0,010	3,3*
Амплитуда, мВ	1,051	0,033	3,1**
Отведение V ₅ , неусредненная ЭКГ			
Продолжительность, с	0,343	0,040	11,8
Амплитуда, мВ	1,887	0,150	8,0
Отведение V ₅ , усредненная ЭКГ			
Продолжительность, с	0,343	0,018	5,3**
Амплитуда, мВ	1,871	0,047	2,5*

Примечание – * *p* < 0,01; ** *p* < 0,001 при сравнении вариабельности показателей традиционной и усредненной ЭКГ; ЭКГ 1-2 – среднее значение показателя при первом и повторном исследованиях; σ – стандартное отклонение систематического расхождения между первым и повторным исследованиями; продолжительность – сумма продолжительностей P, PQ, QRS; амплитуда – сумма амплитуд P, Q, R, S, T.

Таблица 3

Воспроизводимость индексов гипертрофии левого желудочка по данным традиционной и усредненной ЭКГ

Показатель	ЭКГ 1-2	σ	Коэффициент вариабельности, %
Неусредненная ЭКГ			
Индекс Соколова-Лайона, мВ	2,094	0,254	12,2
Корнельский вольтаж, мВ	1,169	0,129	11,0
Корнельское произведение, мВ·мс	170,9	28,178	16,5
Усредненная ЭКГ			
Индекс Соколова-Лайона, мВ	2,111	0,025	1,2*
Корнельский вольтаж, мВ	1,161	0,025	2,2*
Корнельское произведение, мВ·мс	163,1	4,773	2,9*

Примечание – * *p* < 0,01 при сравнении вариабельности показателей традиционной и усредненной ЭКГ; ЭКГ 1-2 – среднее значение показателя при первом и повторном исследованиях; σ – стандартное отклонение систематического расхождения между первым и повторным исследованиями.

Обсуждение

При использовании любого диагностического метода, в том числе и ЭКГ, неизбежны отклонения результата от истинного значения того или иного параметра. Методика регистрации электрокардиосигнала сопряжена с рядом технических особенностей, которые могут являться источником возникновения погрешностей измерения электрокардиографических показателей. Особенности калибровки аппаратуры, закрепленный определенным образом навык наложения электродов конкретным специалистом, электропроводные свойства электродов, используемых при регистрации электрических потенциа-

лов могут стать источниками систематической ошибки при проведении повторных исследований. Оценка динамики данных электрокардиографии осложняется также и влиянием случайных ошибок, способных изменять кардиосигнал. К наиболее важным факторам, приводящим к появлению случайных ошибок, можно отнести несоблюдение анатомических ориентиров при наложении электродов, внешние помехи, зашумленные сигналы, вызванное активностью скелетной мускулатуры, появление артефактов при взаимодействии электродов с кожей, изменения электропроводности тканей и положения сердца в грудной клетке, связанные с дыхательными движениями, колебания изоэлектрической линии.

Погрешности ЭКГ приводят к высокой вариабельности электрокардиографических показателей. В исследовании F. Angeli с соавт. при регистрации ЭКГ дважды, с интервалом 24 ч, продемонстрирована довольно низкая воспроизводимость отдельных показателей (коэффициент вариабельности составил от 30 % для зубца R в I стандартном отведении до 81 % для зубца R в отведении V₅) [2]. Высокая вариабельность электрокардиографических показателей была продемонстрирована и в ряде других исследований [1], [8].

Изменчивость кардиосигнала может стать источником ошибочного заключения в отношении изучаемого признака. Так, например, высокая вариабельность традиционно используемых критериев гипертрофии левого желудочка (ГЛЖ) в 4...19 % случаев может приводить к реклассификации ГЛЖ, когда при первом исследовании ЭКГ расценивается как нормальная, а при повторном – как характерная для ГЛЖ и наоборот [1]-[3], [9].

Существует точка зрения, что высокая вариабельность показателей ЭКГ при повторных исследованиях объясняется в основном неодинаковым позиционированием электродов в связи с несоблюдением анатомических ориентиров при их наложении. Так, в проведенном A. Farb с соавт. исследовании при оценке воспроизводимости амплитудных характеристик комплекса QRS ЭКГ в 12 отведениях при повторной регистрации, с интервалом между исследованиями 8 дней, были получены высокие коэффициенты вариабельности амплитуд отдельных зубцов и общепринятых критериев ГЛЖ [9]. Для зубца S в отведении V₁ коэффициент вариабельности составил 22 %, для зубца R в левых грудных отведениях и отведении AVL – 27 %, для зубца S в III стандартном отведении – 39 %, для индекса Соколова-Лайона и Корнельского вольтажа – 18,5 и 24,8 % соответственно. Повторная регистрация ЭКГ с небольшим промежутком времени без снятия электродов между первым и повторным исследованиями в этой же работе позволила снизить вариабельность амплитуд комплекса QRS при повторных исследованиях в 3...8 раз.

Однако разница в положении электродов между повторными исследованиями является не единственным источником погрешности. Несмотря на то что в ряде исследований повторная регистрация ЭКГ выполнялась с коротким интервалом без

смещения электродов либо с нанесением дермографических меток, вариабельность отдельных параметров достигала 43 % [1], [2]. Обращает на себя внимание и тот факт, что во всех проанализированных нами исследованиях, как и в рассматриваемой работе, наблюдается выраженная вариабельность амплитудно-временных параметров традиционной ЭКГ в отведениях от конечностей, хотя эти отведения следует отнести к оператор-независимым, так как небольшие смещения формирующих их электродов, исходя из физических основ ЭКГ, не должны существенно отражаться на количественных характеристиках комплексов. Эти данные свидетельствуют о том, что даже в случае тщательного соблюдения правил регистрации электрокардиограммы традиционный способ не может в полной мере устранить недостатки, способные влиять на характеристики зубцов и интервалов.

Роль иных факторов была продемонстрирована и в проведенном нами ранее исследовании [10]. В данном исследовании осуществлялась сравнительная оценка воспроизводимости вольтажных и временных характеристик традиционной и усредненной ЭКГ с использованием общепринятых отведений и системы ортогональных отведений Франка. Регистрация ЭКГ выполнялась с интервалом в 1 неделю, в связи с чем вероятность смещения электродов от первоначального положения была довольно высока. В соответствии с результатами, вариабельность суммы продолжительностей зубцов и интервалов в I стандартном отведении и отведении Y при регистрации в системе Франка при повторных исследованиях с интервалом в 1 неделю традиционной ЭКГ была 13,1 и 16,1 % соответственно. Вариабельность суммы амплитуд зубцов комплекса QRS для указанных отведений составила 12,2 и 10,3 % соответственно. Усреднение ЭКГ позволило снизить вариабельность временных и вольтажных показателей в 1,5...3 раза, при этом коэффициенты вариабельности для оцениваемых отведений составили 4,8...7,2 %. Аналогично воспроизводимость усредненной ЭКГ в сравнении с обработанной стандартным способом в настоящем исследовании, в котором повторная регистрация осуществлялась без снятия электродов, что полностью исключало ошибку, связанную с изменением положения электродов, оказалась в 2...2,5 раза выше для амплитудно-временных показателей. Для индексов ГЛЖ различия оказались еще более выраженными. Погрешность при повторных исследованиях для усредненной ЭКГ была в 5...10 раз ниже, чем для традиционной.

Приведенные данные подтверждают теоретические рассуждения, что под влиянием факторов, являющихся источником случайной ошибки, кардиографическая кривая с равной долей вероятности может отклоняться в ту или иную сторону от изолинии, а математическое усреднение ЭКГ на определенном отрезке времени позволяет сохранить преимущественно полезный сигнал, так как случайные колебания кривой при суммации будут стремиться к нулю. Таким образом, усреднение множества ЭКГ-циклов с формированием одного представитель-

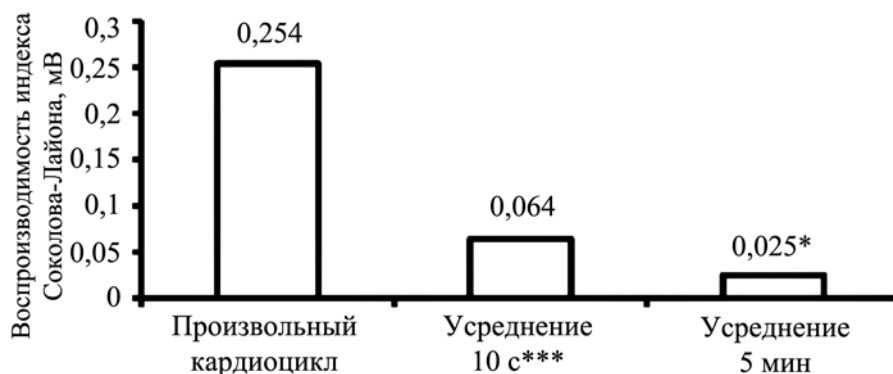


Рис. 2. Различие по воспроизводимости индекса Соколова-Лайона в зависимости от способа обработки ЭКГ: * $p < 0,01$ в сравнении с произвольно выбранным кардиоциклом; ** по данным A. Farb с соавт. [9]

ного комплекса способно минимизировать объективные недостатки, свойственные традиционной ЭКГ, и вероятность случайной ошибки, не связанной с методическими погрешностями проведения исследования, существенно повышая воспроизводимость амплитудных и временных показателей и, следовательно, надежность анализируемых данных.

В настоящем исследовании не оценивалась оптимальная/минимально необходимая продолжительность регистрации ЭКГ для получения максимально воспроизводимых результатов без существенного увеличения времени обследования пациента, так как усреднение ЭКГ-сигнала проводилось на 5-минутном отрезке электрокардиограммы у всех обследованных.

Программы усреднения ЭКГ по умолчанию используются в различных современных приборах. В одном из похожих исследований повторная регистрация ЭКГ с небольшим промежутком времени выполнялась без снятия электродов с помощью аппарата «Marquette Electronics, Inc.» MAC-2 с последующим анализом зарегистрированных комплексов с помощью системы «MUSE», позволяющей получить усредненный кардиоцикл, формируемый путем обработки сигнала на 10-секундном отрезке времени [9]. В итоге систематическое расхождение повторных исследований для индексов ГЛЖ Соколова-Лайона и Корнельского вольтажа составило 0,062 и 0,064 мВ соответственно против 0,025 мВ для каждого из указанных критериев в нашем исследовании, т. е. в 2,5 раза выше. Рис. 2 демонстрирует различие по воспроизводимости индекса Соколова-Лайона в зависимости от способа обработки ЭКГ: один произвольно выбранный комплекс, усреднение в течение 10 с (по данным А. Farb с соавт.), усреднение в течение 5 мин.

Таким образом, для повышения воспроизводимости метода ЭКГ при повторных исследованиях за счет минимизации вероятности случайной ошибки требуется более длительный период усреднения, чем тот, который заложен в стандартных протоколах регистрации в современных приборах.

Выводы

1. Длительное усреднение значительно снижает вероятность случайной ошибки и повышает воспроизводимость амплитудных и временных показателей ЭКГ как в сравнении с традиционным способом обработки электрокардиосигнала, так и с усреднением на коротком отрезке времени.

2. Учитывая более высокие показатели воспроизводимости, усредненная ЭКГ обладает преимуществом перед традиционным способом и может быть использована в клинической практике с целью повышения надежности данных и точности индивидуализированного контроля как при одномоментном исследовании, так и при динамической оценке электрокардиографических показателей.

3. Преимущества усредненной ЭКГ могут быть очевидны при таких состояниях, как гипертрофия миокарда, изменения интервала QT при каналопатиях и назначении медикаментозной терапии, метаболические, воспалительные и электролитные нарушения в миокарде.

Список литературы:

1. *McLaughlin S.C., Aitchison T.C., Macfarlane P.W.* The value of the coefficient of variation in assessing repeat variation in ECG measurements // *Eur. Heart J.* 1998. Vol. 19. № 2. PP. 342-351.
2. *Angeli F., Verdecchia P., Angeli E. et al.* Day-to-day variability of electrocardiographic diagnosis of left ventricular hypertrophy in hypertensive patients. Influence of electrode placement // *J. Cardiovasc. Med. (Hagerstown)*. 2006. Vol. 7. № 11. PP. 812-816.
3. *Van Den Hoogen J.P., Mol W.H., Kowsolea A., Van Ree J.W., Thien T., Van Weel C.* Reproducibility of electrocardiographic criteria for left ventricular hypertrophy in hypertensive patients in general practice // *Eur. Heart J.* 1992. Vol. 13. № 12. PP. 1606-1610.

4. *Бойцов С.А., Гришаев С.Л. и др.* Новый метод описания результатов спектрально-временного картирования ЭКГ-ВР и оценка его диагностической эффективности // *Вестник аритмологии*. 1999. № 14. С. 25-29.
5. *Семенкин А.А. и соавт.* Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 20111616724 HR ECG от 29.08.2011 г.
6. *Pan J., Tompkins W.J.* A real-time QRS detection algorithm // *IEEE Trans. Biomed. Eng.* 1985. Vol. 32. № 3. PP. 230-236.
7. *Bland J.M., Altman D.G.* Statistical methods for assessing agreement between two measures of clinical measurement // *Lancet*. 1986. № 1 (8476). PP. 307-310.
8. *Larkin H., Hunyor S.* Precordial voltage variation in the normal electrocardiogram // *J. Electrocardiol.* 1980. № 13. PP. 347-355.
9. *Farb A., Devereux R.B., Kligfield P.* Day-to-day variability of voltage measurements used in electrocardiographic criteria for left ventricular hypertrophy // *JACC*. 1990. Vol. 15. № 3. PP. 618-623.
10. *Семенкин А.А., Чиндарева О.И., Махрова Н.В. и др.* Сравнение воспроизводимости традиционной и усредненной электрокардиографии // *Артериальная гипертензия*. 2016. № 22 (3). С. 316-323.

*Александр Анатольевич Семенкин,
д-р мед. наук, доцент, профессор,
Наталья Валерьевна Махрова,
аспирант,*

*Олеся Игорьевна Чиндарева,
ассистент,*

*Галина Ивановна Нечаева,
д-р мед. наук, профессор, зав. кафедрой,
кафедра внутренних болезней и семейной
медицины дополнительного
последипломного образования,*

*ФГБОУ ВО «Омский государственный
медицинский университет» Министерства
здравоохранения Российской Федерации,
Илья Евгеньевич Сивков,
программист,*

*ООО «Информационные системы сервиса Арт»,
Елена Владимировна Семенова,
ординатор,*

*кафедра внутренних болезней и семейной
медицины дополнительного
последипломного образования,*

*ФГБОУ ВО «Омский государственный
медицинский университет» Министерства
здравоохранения Российской Федерации,
г. Омск,*

e-mail: asemyonkin@mail.ru