

Оценка определения положения электрической оси сердца различными методами: возможные причины расхождения результатов

И.А. Козловская¹, Ю.Э. Терегулов^{2,3}, И.Е. Карпова¹, А.Ю. Юровский⁴, Д.В. Дроздов¹

¹ ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр кардиологии им. акад. Е.И. Чазова» Минздрава России, Москва, Россия

² КГМА – филиал ФГБОУ ДПО РМАНПО Минздрава России, Казань, Россия

³ ФГБОУ ВО «Казанский государственный медицинский университет» Минздрава России, Казань, Россия

⁴ ООО «АТЕС МЕДИКА софт», Москва, Россия

РЕЗЮМЕ

Актуальность. Положение электрической оси сердца (ЭОС) может определяться разными способами, на практике наблюдаются расхождения между «врачебными» и автоматическими оценками положения ЭОС. **Цель исследования** – оценить значимость расхождений между оценками положения ЭОС разными методами у пациентов с сердечно-сосудистой патологией. **Материалы и методы.** Проанализированы 12323 ЭКГ 9794 пациентов клинко-диагностического отделения НМИЦ кардиологии им. акад. Е.И. Чазова. Для каждой ЭКГ положение ЭОС определено 5 способами: табличным по процедуре Миннесотского кода (aMC), по известным формулам по «чистому вольтажу» для I и III, I и II, I и aVF отведений (al, III, al, II, al, aVF); по среднему вектору комплекса QRS в I и II отведениях. Амплитудные измерения выполнялись автоматически и служили единым источником данных для всех оценок положения ЭОС. Согласованность между расчетами оценивалась методом Блэнда – Альтмана. Для случаев наибольшего расхождения проводился визуальный врачебный анализ ЭКГ. **Результаты.** Наилучшая согласованность наблюдалась между aMC и al, III. Расхождения оценок нарастали с увеличением угла между осью III отведения и осями отведений aVF и II. Наибольшие различия по числу и величине несогласованностей оценок ЭОС выявлена между aMC и am. Визуальный анализ формы векторной петли комплекса QRS во фронтальной плоскости объясняет причину несогласованности различным угловым положением суммарного электрического вектора сердца с максимальной величиной проекции на оси отведений. **Выводы.** Для сопоставимости с результатами врачебной оценки ЭОС автоматический расчет должен проводиться по I и III отведениям. Несовпадение между положением ЭОС по «чистому вольтажу» и среднему вектору может иметь самостоятельное диагностическое значение, поскольку косвенно характеризует форму петли QRS во фронтальной плоскости и, вероятно, несет информацию о деполяризации миокарда желудочков.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: электрокардиография, 12 общепринятых отведений, электрическая ось сердца, комплекс QRS.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Evaluation of heart electrical axis position determination by different methods: possible reasons for the discrepancy

I.I. Kozlovskaya¹, Yu.E. Teregulov^{2,3}, I.E. Karpova¹, A.Yu. Yurovsky⁴, D.V. Drozdov¹

¹ Federal State Budgetary Institution «E.I. Chazov National Medical Research Center of Cardiology» of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russia

² Kazan State Medical Academy – branch of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education, Russian Medical Academy of Postgraduate Education of the Ministry of Health of Russia, Kazan, Russia

³ FSBEI HE Kazan SMU MOH, Kazan, Russia

⁴ ООО «АТЕС МЕДИКА софт», Moscow, Russia

SUMMARY

Background. The position of the electrical heart axis (EHA) can be determined by various methods. In clinical practice, discrepancies often occur between physician-assessed and automated EHA estimates. **Objective.** To evaluate the significance of discrepancies between different EHA determination methods in patients with cardiovascular pathology. **Materials and methods.** We analyzed 12,323 ECGs from 9,794 patients. EHA position was determined using five methods: the Minnesota Code table (aMC), standard formulas using net voltage in leads I/III, I/II, and I/aVF (al, III, al, II, al, aVF), and the mean QRS vector in leads I/III (am). Amplitude measurements were automated and served as the single data source. Agreement was assessed using Bland – Altman analysis. Cases with maximal discrepancies underwent physician visual ECG review. **Results.** Best agreement was between aMC and al, III. Discrepancies increased with the angle between lead III and leads aVF, II. The largest differences in number and magnitude were between aMC and am. Visual analysis of frontal plane QRS loop morphology explained these discrepancies by differences in the angular position of the net cardiac electrical vector corresponding to maximal lead projection. **Conclusion.** Automated EHA calculation using leads I and III ensures comparability with physician assessment. Discrepancies between net voltage-based and mean vector-based EHA may have independent diagnostic value, as they characterize frontal plane QRS loop morphology and may provide information on ventricular myocardial depolarization.

KEYWORDS: electrocardiogram (ECG), standard 12-lead ECG, electrical axis of the heart, cardiac electrical axis, QRS complex.

CONFLICT OF INTEREST. The authors declare that they have no conflicts of interest.

Введение

Электрическая ось сердца (ЭОС) является проекцией на фронтальную плоскость суммарного (среднего) пространственного сердечного вектора в течении всего периода деполяризации желудочков и определяется углом альфа α , который отражает положение суммарного сердечного вектора относительно сагиттальной (переднезадней) оси. Альфа – угол между ЭОС и осью I отведения.

При врачебном и автоматическом анализе электрокардиограммы (ЭКГ) используются различные методы определения угла альфа ЭОС. К наиболее распространенным относятся:

- визуальный, мало стандартизированный, но широко используемый врачами в практике [1], поскольку не требует никаких вычислений;
- стандартизованный на основе измерения амплитуд зубцов QRS в I и III отведениях и опубликованных таблиц, и рекомендуемый к использованию при врачебном анализе [2];
- несколько вариантов расчета положения ЭОС по известным тригонометрическим соотношениям на основе автоматического измерения амплитуд зубцов QRS в разных парах отведений от конечностей [3–5];
- на основе оценок среднего вектора комплекса QRS, который может быть реализован при автоматическом анализе ЭКГ [6, 7], но который при врачебном анализе неоправданно трудоемок.

Цель данного исследования – проанализировать и сравнить результаты определения положения ЭОС, полученные с использованием различных методов, на широкой выборке ЭКГ пациентов кардиологического профиля, а в случае выявления расхождений в оценках – оценить вероятные причины таких расхождений.

Материал и методы

Для исследования был использован набор из 12 323 ЭКГ 9794 пациентов консультативно-диагностического отделения НМИЦ кардиологии им. ак. Е.И. Чазова, зарегистрированных в течение 5,5 лет. Условием включения в набор было наличие регистрации ЭКГ и проведения ультразвукового исследования сердца в интервале времени не более 3 суток.

Основные сведения о пациентах, ЭКГ которых оценивались в исследовании, представлены в табл. 1. Основные ЭКГ нарушения, выявленные при врачебном описании ЭКГ, использованных в исследовании, представлены в табл. 2.

Синхронная регистрация ЭКГ в 12 общепринятых отведениях проводилась во всех случаях с помощью «Модульной системы для регистрации и дистанционной передачи ЭКГ «EASY ECG» (ООО «АТЕС МЕДИКА софт», Россия) при помощи серебряно-хлоридсеребряных электродов для взрослых. Продолжительность каждой записи составляла 10 с или 30 с, частота дискретизации – 500 Гц, диапазон сигнала от минус 7,4 до 7,4 мВ по каждому отведению, разрядность – 16 бит, полоса пропускания сигнала от 0,05 до 150 Гц. Получение медианного кардиокомплек-

Таблица 1
Основные сведения о пациентах, включенных в исследование (n = 9793)

Мужчин	4834
Женщин	4959
Средний возраст, лет	56±16
Диапазон возрастов, лет	18–97
Клинические диагнозы	Число
Артериальная гипертензия	4142
Ишемическая болезнь сердца без инфаркта миокарда в анамнезе	1073
Перенесенный инфаркт миокарда	685
Реваскуляризация миокарда в анамнезе	627
Дилатационная кардиомиопатия	35
Аортальный стеноз	31
Постоянная форма фибрилляции предсердий	514
Пароксизмальная форма фибрилляции предсердий	222
ХСН ФК 1-2 по NYHA	1699
ХСН ФК 3-4 по NYHA	89
Ожирение	852
Сахарный диабет	635

Примечание: ХСН – хроническая сердечная недостаточность, ФК – функциональный класс, NYHA – Нью-Йоркская кардиологическая ассоциация.

Таблица 2
Основные электрокардиографические синдромы в исследованном наборе ЭКГ (n = 12 323)

ЭКГ признаки	n
Рубцовые изменения передней локализации	475
Рубцовые изменения нижней локализации	512
Гипертрофия левого желудочка	1191
Гипертрофия правого желудочка	313
Комбинированная гипертрофия желудочков	16
Блокада левой ножки пучка Гиса	126
Блокада правой ножки пучка Гиса	827
Фибрилляция предсердий	726
Трепетание предсердий	221

са доминирующей морфологии, его разметка, измерение амплитуд зубцов ЭКГ, расчет положения ЭОС реализованным в программе методом проводились в автоматическом режиме средствами системы регистрации ЭКГ. Затем измеренные амплитуды зубцов Q, R, S (и вторых фаз зубцов R и S при их наличии), а также рассчитанного программой положения ЭОС экспортировались штатными средствами программы EASY ECG в формат электронный таблицы. Эти данные использовались для дальнейшего анализа.

Для расчета положения ЭОС во фронтальной плоскости нами на языке Python были реализованы четыре вычислительные процедуры:

- оценки положения ЭОС табличным методом по процедуре, описанной в «Миннесотском коде» (МК) [2] – α_{MC} ;
- расчета положения ЭОС по соотношению амплитуд зубцов в I и III отведениях – $\alpha_{I, III}$ [5];
- расчета положения ЭОС по соотношению амплитуд зубцов в I и II отведениях – $\alpha_{I, II}$ [5];
- расчета положения ЭОС по соотношению амплитуд зубцов в I и aVF отведениях – $\alpha_{I, aVF}$ [5].

Вычислительная процедура определения угла α_{MC} основана на описанном в гл. 12 МК [2] «врачебном» алгоритме. В нем определяется разность амплитуд максимального

и минимального зубцов ЭКГ комплекса QRS в отведениях I и III, так называемый «чистый вольтаж» или «чистая амплитуда» (net voltage, net amplitude). Полученные значения чистого voltaжа используются для поиска α_{MC} по одной из четырех таблиц (табл. 12.2 на стр. 192, 193 [2]). Таким образом, созданная нами процедура программно реализует метод измерения, рекомендованный для применения при врачебном описании ЭКГ.

Вычислительные процедуры определения угла α по парам отведений I и III, I и II, I и aVF реализованы как определение угла между отведением I и концом отрезка, координаты которого задаются разностями амплитуд максимального и минимального зубцов комплекса QRS ЭКГ в соответствующих отведениях с учетом угловой разницы положения осей соответствующих отведений (120, 60 и 90° соответственно). При использовании пары отведений I и aVF для отведения aVF использовалась амплитудная поправка [5], обусловленная разным масштабом в этих отведениях. Пояснения по реализации вычислительных процедур и использованные нами формулы приведены в приложении и в таблице П.1.

В качестве входных данных все реализованные нами вычислительные процедуры использовали полученные при экспорте штатными средствами программы Easy ECG значения амплитуд зубцов медианного комплекса QRS доминирующей формы, т.е. использовали одни и те же данные. Величина угла α , полученная в результате вычислений, округлялась до 1°.

В программе EASY ECG угол α_m определяется по среднему вектору в I и II отведениях. С учетом того, что в цифровых электрокардиографах сигнал подвергается дискретизации, для получения значений среднего вектора производится алгебраическое суммирование всех

координат сигнала в отведениях I и II, попавших в диапазон времени от начала комплекса QRS до его окончания, полученные суммы обозначаются S_I и S_{II} . Заметим, что поскольку в дальнейших вычислениях используются отношения величин S_I и S_{II} , не возникает потребности нормировать их на число суммированных координат или учитывать интервал времени между дискретными измерениями сигнала. С учетом того, что оси отведений I и II расположены под углом 60°, на основании величин S_I и S_{II} получаются координаты конца среднего вектора в ортогональных координатах и его направление относительно горизонтальной оси (I отведения).

Далее полученные результаты измерений положения ЭОС пятью исследованными нами методами по всем 12 323 ЭКГ были подвергнуты статистической обработке с представлением результатов на графиках Блэнда – Альтмана [8]. Во всех случаях в качестве «эталонной» оценки положения ЭОС мы использовали α_{MC} , поскольку он рекомендован для получения угла α при врачебном анализе и может быть получен врачом для любой ЭКГ, кроме случая, когда чистый вольтаж в обоих отведениях I и III равен нулю. На графиках Блэнда – Альтмана величина α_{MC} приведена на оси абсцисс. По оси ординат приведено расхождение между исследуемым методом и «эталонным». Величина расхождения всегда приводилась к диапазону -180 ... 180°.

Общая схема проведенных сравнений приведена на рис. 1.

Результаты

Результаты оценок согласия между измерениями положения ЭОС разными методами представлены в табл. 3 и на рис. 2.

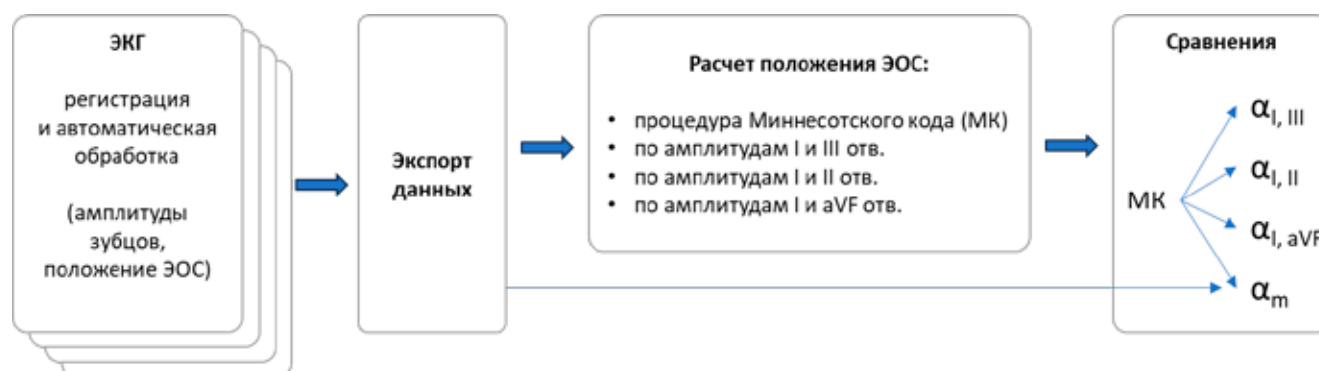
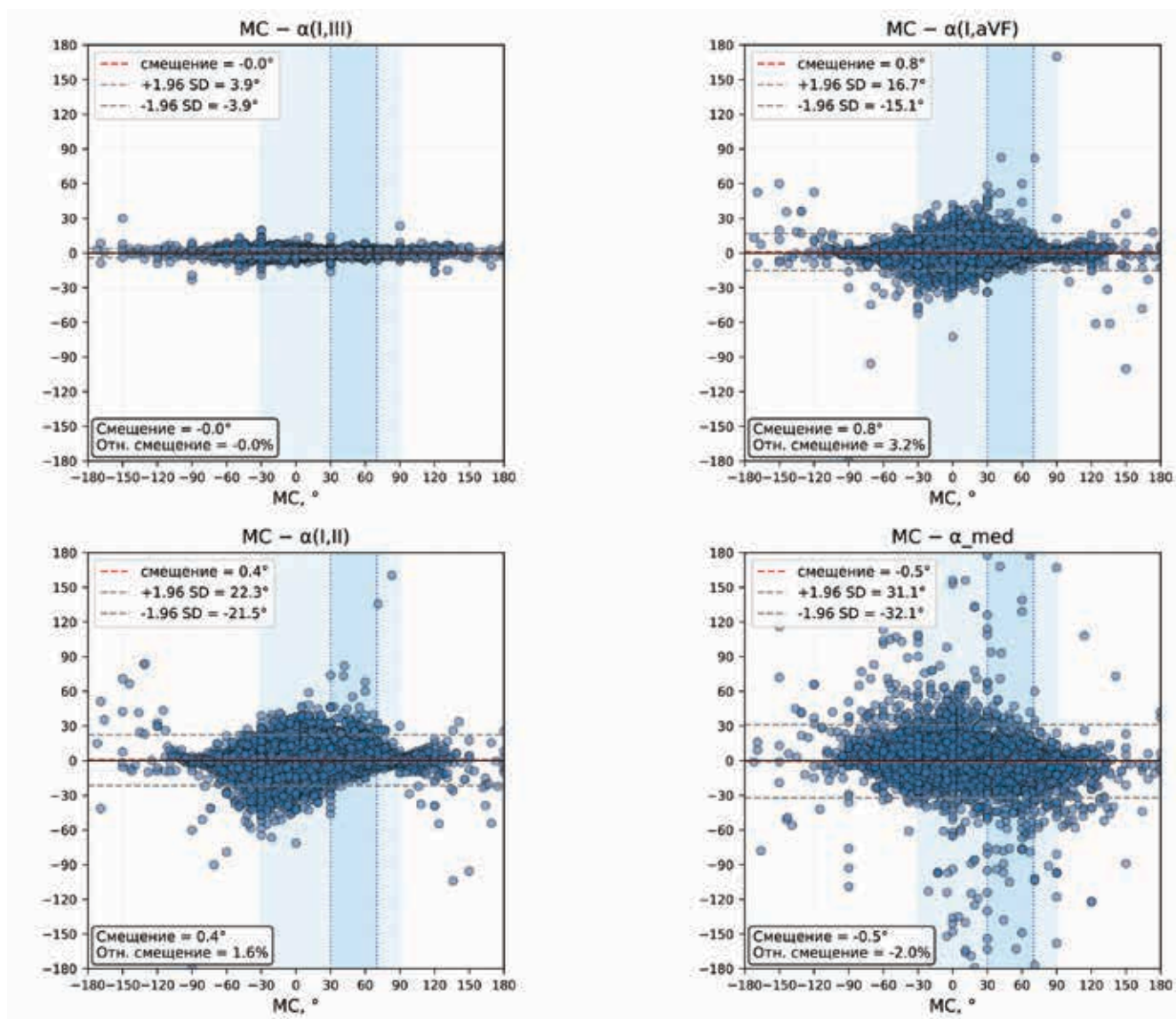


Рисунок 1. Схема получения значений оценок положения ЭОС разными методами и их сравнений

Таблица 3
Результаты сопоставления согласованности оценок положения ЭОС по миннесотской процедуре и исследованными методами

Параметр	$\alpha_{I, III}$	$\alpha_{I, aVF}$	$\alpha_{I, II}$	α_m
Средняя ошибка (смещение), градусов	0	0,8	0,4	-0,5
Нижний предел согласованности, градусов	-3,9	-15,1	-21,5	-32,1
Верхний предел согласованности, градусов	3,9	16,7	22,3	31,1
Доля значений в пределах границ согласованности, процентов	95	95,1	94,3	96,2
Максимальное расхождение оценок, градусов	-30...30	-180...175	-180...160	-180...180



Примечание: MC – миннесотский код, α – расчет положения ЭОС во фронтальной плоскости по разным парам отведений (I-III, I-aVF, I-II) и среднему вектору (med) медианного комплекса QRS. Вертикальной заливкой выделен диапазон «нормальных» значений положения ЭОС для взрослых.

Рисунок 2. Различия оценок положения ЭОС разными методами. По оси абсцисс – результат определения положения ЭОС по миннесотскому коду (MC), по оси ординат – величина отличия положения ЭОС сравниваемыми методами

Нами использован вариант метода Блэнда – Алтмана [9], при котором координатой по оси абсцисс является не средняя оценка величины, полученная сравниваемыми методами, а результат измерения методом, принятым за «эталонный». В качестве такого метода мы использовали процедуру определения положения ЭОС, изложенную в «Миннесотском коде» [2] и рекомендованную для проведения клинических и эпидемиологических исследований с применением ЭКГ. Эта процедура может быть верифицирована врачом. Однако для ее выполнения требуются тщательные измерения амплитуд и использование таблиц, что занимает известное время и затрудняет использование метода на практике, в результате чего практикующие врачи предпочитают упрощенный менее точный визуальный метод оценки положения ЭОС [1].

Как следует из рис. 2 и табл. 3, все методы показывают в целом по всему набору ЭКГ достаточно хорошую согласованность результатов оценки положения ЭОС, однако наилучшее согласование наблюдается между α_{MC} и α_I , III, что вполне очевидно и обусловлено использованием амплитуд одних и тех же зубцов в одних и тех же отведениях для проведения расчетов. Существенно, величина несогласованности оценок ЭОС в этой паре отведений не превышает 30° .

Несогласованность между определением положения ЭОС амплитудными методами нарастает с увеличением угла между осью III отведения и осями других отведений, используемых для оценки. При этом существенны не только закономерное расширение пределов согласованности значений, но и большие по величине расхождения для отдельных наблюдений, природу которых обсудим ниже.

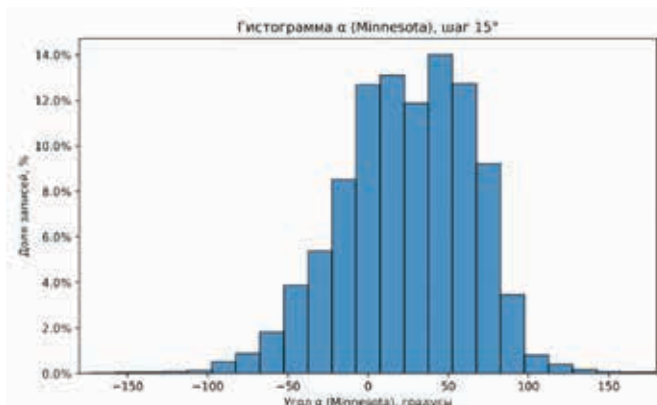


Рисунок 3. Распределение значений положения ЭОС по процедуре МК в наборе данных

Самая большая несогласованность отмечается при сопоставлении результатов по процедуре МК и α_m , как по ширине пределов согласованности, так и по значительному числу и величине несогласованных оценок. Данный факт также будет обсуждаться ниже.

Существенно, что в исследованном наборе ЭКГ встречались все возможные направления ЭОС (рис. 3), в том числе значительное число наблюдений с углом α_{MC} , лежащими за пределами нормативного диапазона для взрослых. Это важно для дальнейшего обсуждения полученных нами результатов.

Отдельно были идентифицированы случаи существенных расхождений оценок положения ЭОС разными методами, два характерных случая приведены в следующем разделе.

Обсуждение результатов

Переходя к обсуждению результатов, отметим, что оценка проекции на фронтальную плоскость суммарного пространственного сердечного вектора в течении всего периода деполяризации желудочков по амплитудам сигналов в парах отведений от конечностей не может полностью отражать положения вектора в трехмерном пространстве. Однако благодаря простоте и накопленному клиническому опыту именно оценка положения ЭОС по парам отведений от конечностей используется в диагностических целях и выработаны известные пороговые значения для принятия диагностических решений.

В данном исследовании использован набор из более 12 тыс. ЭКГ пациентов с различной сердечно-сосудистой патологией и относительно здоровых лиц; с широким разнообразием электрокардиографических нарушений; с диапазоном положения ЭОС фактически от -180° до $+180^\circ$. Это позволяет считать использованную нами методику и полученные результаты сравнений репрезентативными. Относительным недостатком для статистического анализа можно рассматривать использование нескольких ЭКГ одного пациента, но, поскольку они регистрировались со значительным интервалом времени, каждую ЭКГ мы считали отдельным случаем, полагая, что это не повлияет сколько-нибудь существенно на статистическое распределение результатов оценок положения ЭОС разными методами.

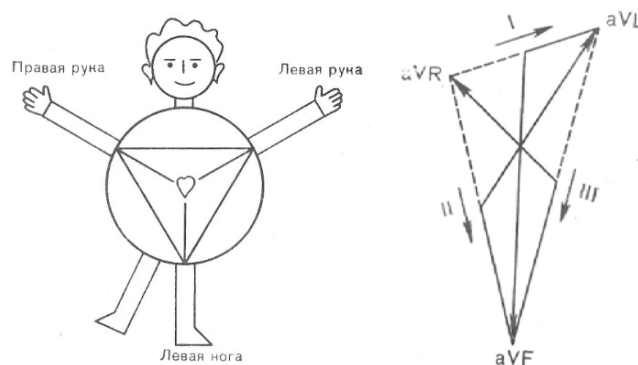


Рисунок 4. Равносторонний треугольник Эйнтховена и треугольник Бургера, цитируется по А.Б. де Луна «Руководство по клинической ЭКГ», 1993 г.

Ожидаемо, наилучшие согласие показывают величины α_{MC} и $\alpha_{I,III}$ для определения которых используются одни и те же отведения. Наблюдавшиеся несогласованности обусловлены, очевидно, разной точностью значений, получаемых по таблицам, и точностью вычислений (1°). Разность значений угла α для соседних ячеек таблиц МК [2] может превышать 10° . Также возможно накопление ошибок в результате округления значений амплитуд зубцов Q, R, S и возможных вторых фаз до 50 или 100 мкВ при использовании таблиц, в то время как тригонометрические вычисления выполняются с максимальной точностью, обусловленной точностью цифрового представления сигнала.

Полученные нами данные противоречат опубликованным результатам об эквивалентности использования разных пар отведений от конечностей для определения положения ЭОС [3–5, 10]. По-видимому, такое расхождение связано, во-первых, со значительным различием в объеме исследованной нами выборки (более 12 тыс. ЭКГ против нескольких сотен в публикациях) и, во-вторых, в том, что в нашей выборке были ЭКГ с максимальным разнообразием как положения ЭОС, так и с разными особенностями морфологии комплекса QRS.

Одной из причин выявленных различий оценок положения ЭОС может быть то, что равносторонний треугольник Эйнтховена, который, как предполагается, находится в центре гомогенной среды, является удобной абстракцией для иллюстрации взаимосвязи между скалярными величинами напряжений и токов в замкнутом электрическом контуре, устанавливая соотношения между амплитудами сигналов в отведениях от конечностей. Однако реальное соотношение длин сторон и углов в треугольнике осей отведений индивидуально варьируется, по-видимому, достаточно сильно, что делает такую модель и ее развитие — шестиосевую систему Бейли — не точной применительно к расчетам положения ЭОС и, по-видимому, и других векторных величин. Это подтверждает и Bayes de Luna [11], считая, что треугольник Бургера (рис. 4) более точно отражает электрическое поле в организме человека, чем треугольник Эйнтховена.

Кроме этого, необходимо учитывать негомогенность и большую индивидуальную вариабельность геометрических характеристик среды между электрическим гене-



Рисунок 5. ЭКГ пациента К.

ратором сердца и поверхностью тела, что также может влиять на величины амплитуд сигналов, регистрируемых на разных конечностях.

Вторая причина, более важная в клиническом отношении, может быть связана с особенностями траектории мгновенного суммарного электрического вектора сердца за период кардиоцикла. В подтверждение этого тезиса приведем и сопоставим два клинических наблюдения.

В качестве примера очень хорошего соответствия оценок положения ЭОС разными методами рассмотрим ЭКГ пациента К., 26 лет, направленного на амбулаторную консультацию. ЭКГ представлена на рис. 5. По результатам амбулаторного клинко-инструментального исследования, включая ультразвуковое исследование (УЗИ) сердца экспертного уровня, аномальных морфологических особенностей сердца не выявлено, показатели сократимости

и диастолической функции в пределах нормы, подозрение на легочную гипертензию исключено. На ЭКГ: синусовая аритмия, ЧСС 62–83 уд./мин., средняя за 30 с 71 уд./мин., вертикальное положение ЭОС.

Значения угла α , определенные различными методами, для этой ЭКГ:

- $\alpha_{MC} = 87^\circ$;
- $\alpha_{I, III} = 86^\circ$;
- $\alpha_{I, II} = 87^\circ$;
- $\alpha_{I, aVF} = 87^\circ$;
- $\alpha_m = 86^\circ$.

Наблюдается практически идеальное соответствие в оценках положения ЭОС разными методами, а различия, очевидно, обусловлены ошибками округления.

Диаметрально противоположным примером может быть ЭКГ (рис. 6) пациентки С., 47 лет, наблюдаемой амбулаторно по поводу врожденного порока сердца: открытого овального окна с минимальным гемодинамически незначимым шунтирующим током крови, аневризмы межпредсердной перегородки, пролапса митрального клапана I ст. По данным УЗИ сердца экспертного уровня, кроме описанных выше особенностей, нарушений со-

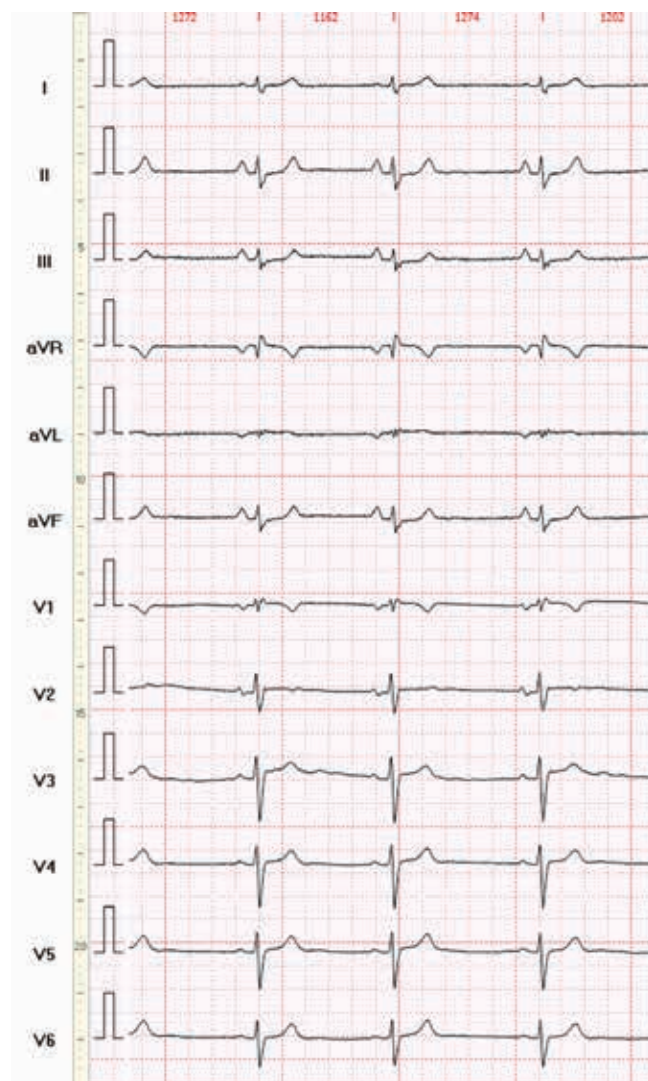


Рисунок 6. ЭКГ пациентки С.

кратимости и диастолической функции не выявлено, правое предсердие не расширено, признаков легочной гипертензии не выявлено (СДЛА = 28 мм рт. ст. [норма до 30 мм рт. ст.]). На ЭКГ: синусовый ритм, брадикардия, ЧСС = 51 уд./мин. Горизонтальное положение ЭОС, ротация сердца по часовой стрелке, неполная блокада правой ножки пучка Гиса (QRS = 108 мс).

Значения угла α , полученные всеми рассматриваемыми методами, для данной ЭКГ составили:

- $\alpha_{MC} = 45^\circ$;
- $\alpha_{I, III} = 43^\circ$;
- $\alpha_{I, II} = 31^\circ$;
- $\alpha_{I, aVF} = 25^\circ$;
- $\alpha_m = -113^\circ$.

Ошибка оценки положения ЭОС амплитудными методами по разным парам отведений составляет 20° , при этом программная оценка α_m отличается от всех амплитудных оценок на более, чем на 138° , что обуславливает принципиально иную формальную интерпретацию положения ЭОС.

Отметим, что при врачебном визуальном анализе ЭКГ данный случай может быть принят за вариант так называемого S-типа ЭКГ [12, 13]. Существенно, что амплитуды зубцов R в I, II, III отведениях больше амплитуд зубцов S. Таким образом, «чистый вольтаж» в I, II, III отведениях на обсуждаемой ЭКГ положительный, что не позволяет отнести ее к классическому S-типу. Дискуссионный вопрос критериев отнесения ЭКГ к S-типу [13] выходит за рамки нашей работы.

Для наглядной демонстрации возможной причины такого явления нами была построена петля электрического вектора сердца во фронтальной плоскости, соответствующая по времени комплексу QRS медианного кардиоцикла. На рис. 7 приведены соответствующие изображения для ЭКГ обоих пациентов.

Такой подход принят при графическом анализе вектор-электрокардиограмм [14]. Сопоставление форм петель показывает, что, кроме очевидного различия по размерам, в приведенных случаях петли существенно различаются по форме.

Для вытянутых петель без пересечений траектории проекция максимального отклонения (зубец R или зубцы Q, S) на оси отведений II, aVF, III происходят из близко расположенных точек контура петли. При расчете положения ЭОС по тригонометрическим соотношениям это означает, что исследуется практически один и тот же мгновенный сердечный вектор.

В случае петель сложной формы, особенно с пересечениями контуров, проекции максимальных отклонений петли на оси отведений II, aVF, III попадают на разные точки контура петли, обуславливая существенные различия при вычислении угла α для разных пар отведений, поскольку фактически оценивается положение разных мгновенных сердечных векторов.

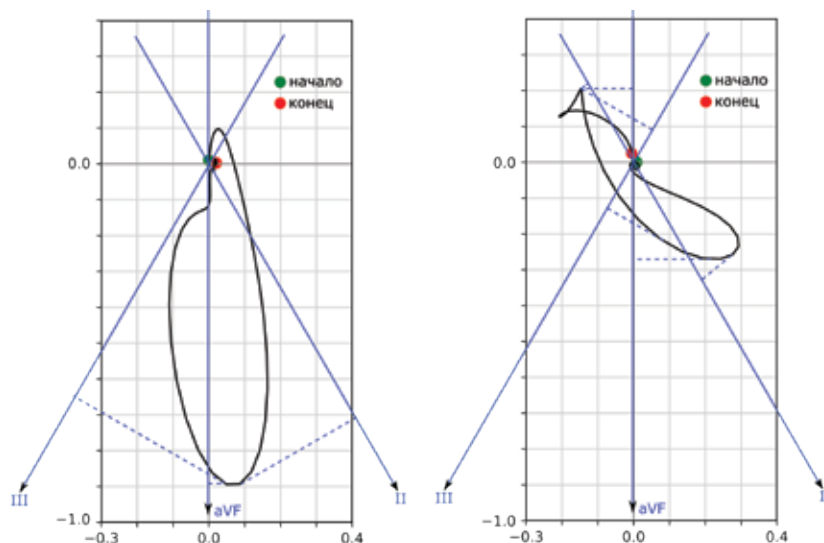


Рисунок 7. Петли комплекса QRS обоих пациентов, слева K, справа – С. Черный – петля комплекса QRS. Синим обозначены оси отведений I, II, aVF, III, пунктирные линии показывают проекции максимальных отклонений петли на эти оси. Шаг сетки 0,1 мВ

Также заметим, что на ЭКГ пациентки С (рис. 6) продолжительность зубцов R меньше, чем S. Это означает, что в расчете суммарного сердечного вектора участвует больше отрицательных значений, чем положительных, приводя к тому, что оценка «чистого вольтаж» и суммарного (среднего вектора) различается по знаку: чистый вольтаж положительны, а суммарный вектор – может быть положительным, отрицательным или нулевым.

Сложной формой петли QRS может объяснять и отличия между α_{MC} и определением положения ЭОС по среднему вектору α_m , которые могут быть весьма значительными, как в рассматриваемом клиническом примере. Обращает на себя внимание (рис. 7, справа), что значительная часть петли QRS находится в отрицательной части осей отведений II, aVF, III, обуславливая отрицательное значение полученного α_m при положительных оценках положения ЭОС всеми амплитудными методами.

Очевидным недостатком среднего (суммарного) сердечного вектора является невозможность простой врачебной проверки автоматических расчетов в случаях значительных расхождений. В то же время, цифровые методы обработки сигнала ЭКГ дают возможность одновременной оценки положения ЭОС разными методами, включая суммарные показатели, и нетрудоемкого их сопоставления. Данное положение относится также и к зубцам P и T, которые не исследовались в нашей работе.

Заключение

Наиболее существенный вывод проведенного исследования состоит в том, что разные методы оценки положения ЭОС могут давать разные результаты для одной и той же ЭКГ. Полученные нами данные, отличающиеся от опубликованных ранее утверждений об эквивалентности [3, 5, 10] результатов расчетов положения ЭОС по разным парам отведений от конечностей демонстрируют различия между результатами определения угла α по максимальным амплитудам зубцов комплекса QRS в разных отведениях и по сред-

нему вектору QRS. Таким образом, несмотря на небольшую частоту существенных расхождений оценок положения ЭОС разными методами, очевидна необходимость стандартизации как врачебных процедур оценки положения ЭОС, так и алгоритмов автоматического анализа, что необходимо отразить в соответствующих клинических и методических рекомендациях и технических стандартах.

Для сопоставимости с результатами врачебного анализа, который в большинстве случаев проводится оценочно и визуально [1], в автоматических системах расчет положения ЭОС следует производить по I и III отведениям, который показывает наилучшее соответствие с рекомендованной врачебной процедурой определения положения ЭОС, поскольку использует те же отведения, что и рекомендованные для врачебного анализа.

Алгоритмы расчета положения ЭОС с использованием амплитуд зубцов комплекса QRS в разных парах отведений

На первом этапе расчета положения ЭОС определяется «чистая» амплитуда комплекса QRS (A) в соответствующих отведениях (net QRS amplitude). В нашей работе, опираясь на иллюстрации в МК [2], использовался подход, при котором A вычисляется как алгебраическая сумма максимального положительного и отрицательного отклонений (зубцов) в данном отведении (аналогично, как в [3]). Заметим, что встречается подход, когда алгебраически суммируются не только максимальные отклонения, а амплитуды всех выделенных положительных и отрицательных зубцов комплекса QRS.

На следующем этапе расчета используются формулы, выводимые на основании свойств треугольников [3, 5, 10]. Формулы приведены в табл. П1. В использованной нами библиотеке для языка Python numpy имеется функция $\arctan2(y, x)$, возвращающая корректное значение угла в зависимости от квадранта ортогональной системы координат, в котором находится координаты интересующей

Несоответствие между положением ЭОС разными методами может иметь самостоятельное диагностическое значение, поскольку косвенно характеризует форму петли QRS во фронтальной плоскости и, вероятно, несет больше информации о распространении возбуждения в миокарде желудочков, чем единственная оценка. Данное положение, по-видимому, может быть основанием для дальнейших исследований, особенно с учетом современных данных о том, что положение ЭОС не описывает полностью процесс деполяризации миокарда желудочков [15]. Наши наблюдения могут стать основой для более глубокого понимания содержания и значения термина ЭОС в анализе ЭКГ и основой для дальнейших исследований в этой области.

Приложение

Таблица П1
Формулы расчета положения ЭОС
для использованных пар отведений

Пара отведений	Формула	Вызов функции $\arctan2()$
I, III	$\alpha_{III} = \arctg \frac{2A_{III} + A_I}{\sqrt{3}A_I}$	$\alpha_{III} = \arctan2((0.5A_I + A_{III})/0.866, A_I)$
I, aVF	$\alpha_{aVF} = \arctg \frac{2A_{aVF}}{\sqrt{3}A_I}$	$\alpha_{aVF} = \arctan2(1.1547A_{aVF}, A_I)$
I, II	$\alpha_{II} = \arctg \frac{2A_{II} - A_I}{\sqrt{3}A_I}$	$\alpha_{II} = \arctan2((A_{II} - 0.5A_I)/0.866, A_I)$

Список литературы / References

1. Дроздов Д.В., Терегулов Ю.Э., Шutow Д.В. Оценка положения электрической оси сердца: результаты анкетирования врачей в Российской Федерации. Анализ и обсуждение глазометрического метода оценки / Дроздов Д.В., Терегулов Ю.Э., Шutow Д.В. // Медицинский алфавит. – 2026. – № 6. – С. 40–46.
2. Drozdov D.V., Teregulov Yu.E., Shutow D.V. Heart electrical axis assessment: results of a survey of physicians in the Russian Federation. Analysis and discussion of the visual axis assessment method. Medical alphabet. 2026;(6):40–46. (In Russ.) <https://doi.org/10.33667/2078-5631-2026-6-40-46>
3. Prineas R.J. The Minnesota code manual of electrocardiographic findings, including measurement and comparison with the Novacode: standards and procedures for ECG measurement in epidemiologic and clinical trials. The Minnesota code manual of electrocardiographic findings, including measurement and comparison with the Novacode / R.J. Prineas, R.S. Crow, Z.-M. Zhang. – 2nd ed., new and enl. – London: Springer, 2010.
4. Athar M.S. Application of Einthoven's law in calculating mean QRS axis / M.S. Athar, P. Singh // Indian journal of physiology and pharmacology. – 2006. – Vol. 50. – № 1. – P. 90.
5. A physiological assessment of mean QRS axis in an Indian sub-population using two methods of axis calculation / A. Varghese [и др.] // International Journal of Clinical and Experimental Physiology. – 2015. – Vol. 2. – № 2. – P. 115–115.
6. Novosel D. Corrected formula for the calculation of the electrical heart axis / D. Novosel, G. Noll, T.F. Lüscher // Croatian Medical Journal. – 1999. – Vol. 40. – № 1. – P. 77–79.
7. Criteria for intraventricular conduction disturbances and pre-excitation / J.L. Willemis [и др.] // Journal of the American College of Cardiology. – 1985. – Vol. 5. – № 6. – P. 1261–1275.
8. Comprehensive electrocardiology / P.W. Macfarlane [et al.]. – Springer Science & Business Media, 2010.
9. Bland-Altman methods for comparing methods of measurement and response to criticisms / M.A. Mansournia [et al.] // Global Epidemiology. – 2021. – Vol. 3. – P. 100045.
10. Krouwer J.S. Why Bland-Altman plots should use X , not $(Y + X)/2$ when X is a reference method / J.S. Krouwer // Statistics in Medicine. – 2008. – Vol. 27. – № 5. – P. 778–780.
11. Determining the QRS axis: visual estimation is equal to calculation / J. Mueller-Leisse [et al.] // Herzschrittmachertherapie + Elektrophysiologie. – 2025. – Vol. 36. – Determining the QRS axis. – № 1. – P. 70–74.
12. де Луна А. Б. Руководство по клинической ЭКГ / де Луна А. Б. Пер. с англ. М.Р. Кравченко под ред. проф. Р.З. Амирова. – Москва: Медицина, 1993. – 704 с.
13. Bayés De Luna A. Textbook of clinical electrocardiography / Dordrecht: Martinus Nijhoff Publishers, 1987.
14. Electrophysiological mechanisms of the SI SII SIII electrocardiographic morphology / A. Bayés De Luna [et al.] // Journal of Electrocardiology. – 1987. – Vol. 20. – № 1. – P. 38–44.
15. The S1S2S3 electrocardiographic pattern – Prevalence and relation to cardiovascular and pulmonary diseases in the general population / J. Nurminen [et al.] // Journal of Electrocardiology. – 2022. – Vol. 73. – P. 113–119.
16. Основы вычислительной векторэлектрокардиографии и ее практическое применение: учебно-методическое пособие / Д.В. Дроздов [и др.]. – Москва: ГЭОТАР-Медиа, 2026. – 176 с. DOI: 10.33029/9704-9705-0-FCV-2026-1-176
17. Fundamentals of Computational Vector Electrocardiography and its Application: A Practical Guide / Drozdov D.V. et al. Moscow, GEOTAR-Media, 2026. – 176 p. DOI: 10.33029/9704-9705-0-FCV-2026-1-176
18. Alencar J.N.D. The limits of the frontal QRS axis in modern electrocardiology / J.N.D. Alencar // Journal of Electrocardiology. – 2026. – Vol. 95. – P. 154205.

Статья поступила / Received 8.05.2026
Получена после рецензирования / Revised 15.05.2026
Принята в печать / Accepted 15.05.2026

Информация об авторах

Козловская И.Л.¹ – к.м.н., науч. сотр. лаборатории ЭКГ ФГБУ
E-mail: ilkozlovskaya@yandex.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7458-4315>
Терегулов Ю.Э.^{2,3} – д.м.н., проф., зав. кафедрой функциональной диагностики
E-mail: tereg2@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9120-142X>
Карпова И.Е.¹ – к.м.н., зав. отделением функциональной диагностики
E-mail: irina_kp@inbox.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5650-5655>
Юровский А.Ю.⁴ – к.ф.-м.н., президент
E-mail: alexey@atesmedica.ru
Дроздов Д.В.¹ – к.м.н., в.н.с., руководитель лаборатории ЭКГ ФГБУ
E-mail: cardioexp@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7374-3604>

¹ ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр кардиологии им. акад. Е.И. Чазова» Минздрава России, Москва, Россия
² КГМА – филиал ФГБОУ ДПО РМАНПО Минздрава России, Казань, Россия
³ ФГБОУ ВО «Казанский государственный медицинский университет» Минздрава России, г. Казань, Россия
⁴ ООО «АТЕС МЕДИКА софт», Москва, Россия

Контактная информация:

Козловская Ирина Леонидовна. E-mail: ilkozlovskaya@yandex.ru

Для цитирования: Козловская И.Л., Терегулов Ю.Э., Карпова И.Е., Юровский А.Ю., Дроздов Д.В. Оценка определения положения электрической оси сердца различными методами: возможные причины расхождения результатов. Медицинский алфавит. 2026;(13):35–43. <https://doi.org/10.33667/2078-5631-2026-13-35-43>

Author information

Kozlovskaya I.L.¹ – PhD, research associate of the ECG laboratory
E-mail: ilkozlovskaya@yandex.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7458-4315>
Teregulov Yu.E.^{2,3} – Doctor of Medical Sciences, Professor, Head of the Department of Functional Diagnostics
E-mail: tereg2@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9120-142X>
Karpova I.E.¹ – PhD, Head of the Department of Functional Diagnostics
E-mail: irina_kp@inbox.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5650-5655>
Yurovsky A.Yu.⁴ – PhD, President
E-mail: alexey@atesmedica.ru
Drozdov D.V.¹ – MD, PhD, Head of the ECG Laboratory
E-mail: cardioexp@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7374-3604>

¹ Federal State Budgetary Institution «E.I. Chazov National Medical Research Center of Cardiology» of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russia
² Kazan State Medical Academy – branch of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education, Russian Medical Academy of Postgraduate Education of the Ministry of Health of Russia, Kazan, Russia
³ FSBEI HE Kazan SMU MOH, Kazan, Russia
⁴ ООО «ATES MEDICA soft», Moscow, Russia

Contact information

Kozlovskaya I.L. E-mail: ilkozlovskaya@yandex.ru

For citation: Kozlovskaya I.L., Teregulov Yu.E., Karpova I.E., Yurovsky A.Yu., Drozdov D.V. Evaluation of heart electrical axis position determination by different methods: possible reasons for the discrepancy. Medical alphabet. 2026;(13):35–43. <https://doi.org/10.33667/2078-5631-2026-13-35-43>

