

ISSN 2311-4495
ISSN 2410-5155 (Online)
УДК 616.12-008.318-073.97
<https://doi.org/10.18705/2311-4495-2025-12-6-518-526>

Электрокардиографические маркеры дисперсии желудочковой реполяризации

Н. В. Артеева¹, О. Г. Берникова¹, Я. Э. Азаров¹, Е. В. Пармон²

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Федеральный исследовательский центр «Коми научный центр Уральского отделения Российской академии наук», Институт физиологии, Сыктывкар, Россия

² Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный медицинский исследовательский центр имени В. А. Алмазова» Министерства здравоохранения Российской Федерации, Санкт-Петербург, Россия

Контактная информация:

Артеева Наталия Викторовна,
Институт физиологии ФИЦ Коми НЦ
УрО РАН,
ул. Первомайская, д. 50, Сыктывкар,
Россия, 167982.
E-mail: natalia.arteyeva@gmail.com

Резюме

Нарушения процесса реполяризации миокарда, приводящие к увеличению дисперсии реполяризации (ДР) в желудочках сердца, сопряжены с развитием жизнеугрожающих желудочковых аритмий. Основным инструментом для оценки электрической функции сердца и диагностики нарушений реполяризации служит электрокардиография (ЭКГ). Цель данного обзора — ознакомить читателя с последними достижениями отечественной и мировой фундаментальной науки относительно физиологического и клинического значения ДР и ее отображения на ЭКГ. Поиск научной литературы осуществляли в базах e-LIBRARY, КиберЛенинка и Pubmed, используя ключевые слова (дисперсия желудочковой реполяризации, дисперсия интервала QT, интервал Тре, дисперсия интервала Тре, отношение Тре/QT) в разных вариантах написания на русском и английском языках. Анализ результатов экспериментальных и клинических исследований, а также математического моделирования показал, что интервал между пиком и окончанием Т-волны (Тре) и его производные (относительно новые, еще не нашедшие широкого применения в практической диагностике ЭКГ-индексы — дисперсия интервала Тре и соотношение Тре/QT) содержат информацию о величине как глобальной, так и локальной ДР в желудочках сердца и являются доказанными полезными предикторами жизнеугрожающих аритмий, связанных с повышенной гетерогенностью реполяризации, и общей смертности, в то время как дисперсия интервала QT (наиболее «традиционный» индекс ДР) дает наименее точную оценку величины ДР и аритмического риска. Приведены пороговые значения ЭКГ-индексов ДР и данные об их зависимости от пола и возраста. Рассмотрены особенности измерения параметров Т-волны, а также проблемы и перспективы поиска новых аритмогенных ЭКГ-индексов.

Ключевые слова: глобальная и локальная дисперсия желудочковой реполяризации, ЭКГ, дисперсия интервала QT, интервал Тре, дисперсия интервала Тре, Тре/QT, аритмогенез

Для цитирования: Артеева Н.В., Берникова О.Г., Азаров Я.Э., Пармон Е.В. Электрокардиографические маркеры дисперсии желудочковой реполяризации. *Трансляционная медицина*. 2025;12(6):518-526. <https://doi.org/10.18705/2311-4495-2025-12-6-518-526>; <https://elibrary.ru/PNQOWH>

Electrocardiographic markers of ventricular repolarization dispersion

Natalia V. Artyeva¹, Olesya G. Bernikova¹, Jan E. Azarov¹,
Elena V. Parmon²

Corresponding author:

Natalia V. Artyeva,
Institute of Physiology FRC Komi SC UB
RAS,
50 Pervomayskaya str., Syktyvkar, Russia,
167982.
E-mail: natalia.arteyeva@gmail.com

¹ Federal Research Centre “Komi Science Centre” of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Syktyvkar, Russia

² Federal State Budgetary Institution "V.A. Almazov National Medical Research Centre" of the Ministry of Health of the Russian Federation, St. Petersburg, Russia

Abstract

Myocardial repolarization disturbances resulting in an increased value of dispersion of ventricular repolarization (DR) are associated with the development of life-threatening ventricular arrhythmias. The main tool for detection of repolarization disorders is electrocardiography (ECG). This review is devoted to the new knowledge regarding the physiological and clinical significance of DR and its ECG-reflection. The search for scientific literature was performed using e-LIBRARY, CyberLeninka and Pubmed data bases and the keywords (dispersion of repolarization, QT interval dispersion, Tpe interval, Tpe interval dispersion, Tpe/QT ratio) in different Russian and English spellings. The analysis of experimental, clinical and in silico studies demonstrated that the interval between the peak and the end of T-wave (Tpe) and its derivatives (relatively new ECG-indices, not yet widely used in clinical practice — Tpe interval dispersion and Tpe/QT ratio) provide information of both global and local dispersion of ventricular repolarization, being the proven useful predictors of life-threatening arrhythmias associated with the increased repolarization heterogeneity and the total mortality, while the dispersion of QT interval (the most “traditional” index of DR) is the least accurate measure of DR and arrhythmic risk. The threshold values of the considered ECG-indices of DR are given, and the age- and sex-dependence of them is discussed. The peculiarities of T-wave parameters measuring as well as the problems and the prospects of searching for the new arrhythmogenic ECG-indices are discussed.

Keywords: global and local ventricular repolarization dispersion, ECG, QT dispersion, Tpe, Tpe dispersion, Tpe/QT, arrhythmogenesis

For citation: Artyeva NV, Bernikova OG, Azarov JE, Parmon EV. Electrocardiographic markers of ventricular repolarization dispersion. *Translational Medicine*. 2025;12(6):518-526. (In Russ.) <https://doi.org/10.18705/2311-4495-2025-12-6-518-526>; <https://elibrary.ru/PNQOWH>

Список сокращений: ПД — потенциал действия, ДР — дисперсия реполяризации, Тре — интервал между пиком и окончанием Т-волны, ЭКГ — электрокардиография, ЧСС — частота сердечных сокращений.

Введение

Кардиоэлектрическое поле в период ST-сегмента и Т-волны — результат гетерогенности желудочковой реполяризации, которая складывается из разного времени активации и неоднородного распределения форм и длительностей потенциалов действия (ПД) кардиомиоцитов в разных слоях и отделах желудоч-

ков, вследствие пространственной неоднородности реполяризующих токов [1–3]. Количественный показатель этой гетерогенности — дисперсия реполяризации (ДР), отрезок времени между наиболее ранним и наиболее поздним окончанием реполяризации.

Наряду с неоднородностью структуры миокарда и его механической активности, ДР имеет важное значение для нормального, эффективного функционирования сердца — она позволяет миокарду оптимизировать его сократительную функцию [4]. Однако величина ДР, выходящая за рамки физиологически обоснованного уровня (причем как в большую, так и меньшую сторону) — один из компонентов субстрата

для возникновения жизнеугрожающих желудочковых аритмий [3, 5–6]. Успешное предсказание аритмических событий, связанных с повышенной дисперсией реполяризации, требует надежных, научно-обоснованных индексов величины ДР.

Цель данного обзора — ознакомить читателя с последними достижениями отечественной и мировой фундаментальной науки относительно физиологического и клинического значения ДР и ее отображения на ЭКГ. Поиск научной литературы осуществляли в базах e-LIBRARY, КиберЛенинка и Pubmed, используя ключевые слова (дисперсия желудочковой реполяризации, дисперсия интервала QT, интервал Тре, дисперсия интервала Тре, отношение Тре/QT) в разных вариантах написания на русском и английском языках.

Дисперсия интервала QT

Гипотеза о том, что дисперсия QT (разница между максимальным и минимальным значениями интервала в 12 стандартных отведениях) отражает пространственные различия во времени реполяризации миокарда и может быть полезна при оценке риска аритмии, возникла более 30 лет назад в связи с тем, что при синдроме удлиненного QT дисперсия этого интервала была выше у пациентов с желудочковыми аритмиями [7].

Клиническая значимость дисперсии QT как предиктора аритмического риска неоднозначна: в одних исследованиях она была подтверждена, а в других — нет [8]. Ввиду низкой воспроизводимости клинических данных, еще более двух десятков лет назад был сделан вывод о том, что дисперсия QT дает плохую оценку ДР, и этот индекс не рекомендовалось включать в стандартное описание ЭКГ [8, 9]. Тем не менее, по сей день многие исследователи ставят знак равенства между дисперсией QT и величиной ДР.

Согласно большинству исследований, нормальная величина дисперсии интервала QT не должна превышать 50–70 мс. Помимо дисперсии QT, как разности между самым длинным и самым коротким интервалом QT, было предложено также использовать «относительную дисперсию QT» — математическую дисперсию величины QT в 12 стандартных ЭКГ-отведениях [10]; данный показатель хорошо себя показал в качестве предиктора аритмий как сам по себе, так и при включении его в комплексную модель для прогнозирования аритмического риска [10].

С теоретической точки зрения, дисперсия QT отображает величину ДР лишь частично: в ее основе — различия в отображении окончания Т-волны в разных отведениях (то есть различия во времени наиболее позднего окончания реполяризации), но она не содержит информации о времени наиболее ранней реполяризации, между тем как ДР — это разница во

времени между наиболее ранним и наиболее поздним окончанием реполяризации в желудочках сердца. Соответственно, дисперсия QT всегда меньше величины интервала между пиком и окончанием Т-волны (Тре) — более точного индекса ДР, и хуже, чем Тре, коррелирует с величиной глобальной ДР, измеренной непосредственно на поверхности сердца [11].

Интервал Тре

Первоначально интервал Тре был предложен в качестве индекса трансмуральной ДР: исследования *in vitro* на сегменте свободной стенки желудочка сердца собаки показали, что на трансмуральной псевдоЭКГ пик Т-волны совпал с самым ранним окончанием реполяризации, которая имела место на эпикарде, а конец Т-волны соответствовал самому позднему окончанию реполяризации — в М-клетках, расположенных в глубоких слоях стенки желудочка (рис. А) [12].

Исследования *in vivo* (синхронное многоканальное измерение потенциалов от эпикардиальных и интрамуральных электродов, распределенных по всему объему желудочков) не выявили М-клеток с наиболее длинными ПД на целом сердце, но показали, что, помимо трансмурального, в желудочках сердца имеют место также апикобазальный, переднезадний и межжелудочковый градиенты реполяризации, величина которых часто превышает величину трансмурального градиента [13, 14]. Эксперименты в сочетании с математическим моделированием показали, что величина Тре отображает глобальную, а не трансмуральную ДР [14–16].

Особенности измерения. Величина Тре зависит от метода определения окончания Т-волны (рис. Б). Метод изолинии (окончание Т-волны определяется как начало изоэлектрического сегмента) включает терминальную фазу реполяризации и, соответственно, дает величину Тре до 10 мс больше, чем тангенциальный метод (окончание Т-волны определяется как пересечение касательной к ее нисходящему склону, в самом крутом его месте, с изоэлектрической линией). Результаты автоматической и ручной обработки ЭКГ могут сильно различаться. Новые автоматические алгоритмы уменьшают эти различия, однако в случаях, когда морфология Т-волны является сложной, автоматические результаты измерения окончания Т-волны требуют ручного подтверждения [17].

Величина Тре неодинакова в разных отведениях. Наибольшие значения чаще всего наблюдаются в отведении V3, наименьшие — в отведениях III и V1 [18]. Наиболее точную оценку глобальной ДР можно получить на основе максимального Тре из всех измеренных либо на основе глобального Тре, рассчитанного по самому раннему пику и самому позднему окончанию Т-волны по всем измеренным

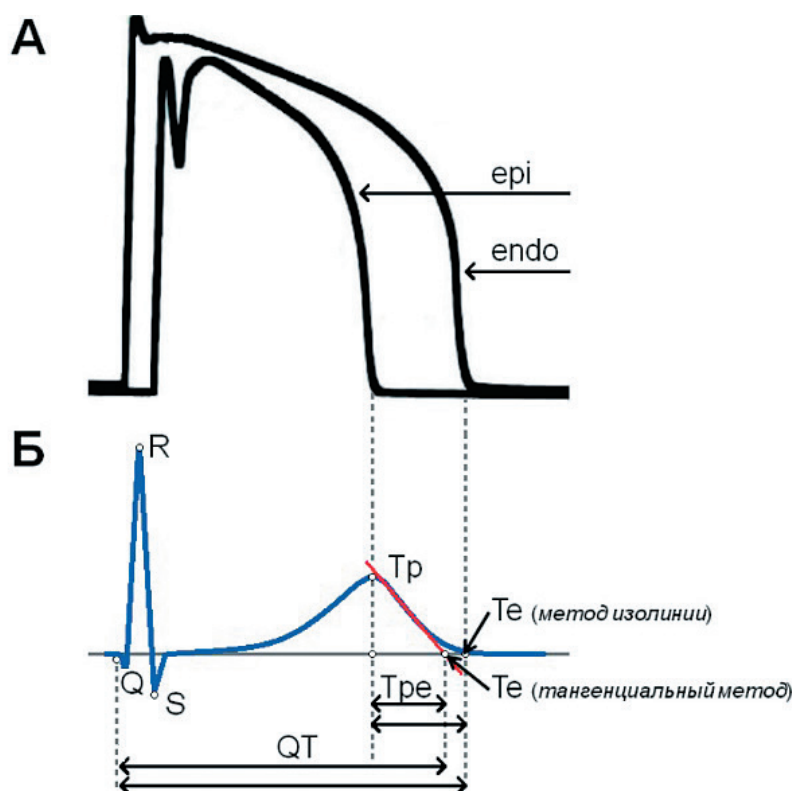
отведениям, но не по среднему интервалу T_{re} и не по одному отведению.

Зависимость T_{re} от возраста и пола. С возрастом интервал T_{re} последовательно увеличивается: по данным исследования 606 здоровых людей, он составил $70,5 \pm 12,0$ мс у детей до 12 лет и $87,1 \pm 9,5$ у взрослых [19]. В каждом возрасте у женщин величина T_{re} (как скорректированная, так и некорректированная) была на 2–10 мс короче по сравнению с тем же показателем у мужчин [19, 20].

Зависимость T_{re} от частоты сердечных сокращений (ЧСС) и дыхания. Интервал T_{re} , как и интервал QT, изменяется при изменении ЧСС. Коррекция T_{re} с использованием формул Bazett или Fridericia улучшает его независимую прогностическую ценность для оценки риска внезапной сердечной смерти [21].

Дыхание вызывает изменение положения сердца по отношению к поверхностным электродам, а также циклические изменения длительности ПД [22]. В связи с этим, желательно использовать значения T_{re} , усредненные по нескольким сердечным циклам.

Клиническая значимость T_{re} . За последние два десятилетия T_{re} показал себя как полезный предиктор внезапной сердечной смерти и аритмического риска при многих патофизиологических состояниях, например, при сердечной недостаточности, миокардитах, при морбидном ожирении [23], в случае кардиомиопатий и каналопатий, включая синдром удлиненного QT [10, 24, 25], синдром укороченного QT [26, 27], синдром Бругада [21, 28], у пациентов с вазоспастической стенокардией [29], гипертрофической кардиомиопатией [30]. При инфаркте



Соотношение между формой и фазами потенциалов действия в желудочках сердца (А) и морфологией Т-волны на ЭКГ (Б)

Примечания: Epi — эпикардиальный ПД, endo — эндокардиальный ПД. Tp, пик Т-волны, соответствует по времени окончанию реполяризации наиболее коротких ПД; Te, окончание Т-волны, соответствует по времени окончанию реполяризации наиболее длинных ПД [12]. При определении Te тангенциальным методом интервалы QT и T_{re} короче, чем при использовании метода изолинии.

The relationship between the shape and the phase of action potentials (AP) in the heart ventricles (A) and the T-wave morphology on ECG (B)

Notes: Epi — epicardial AP, endo — endocardial AP. Tp, the peak of the T-wave, corresponds to the end of repolarization of the most short APs; Te, the end of the T-wave, corresponds to the end of repolarization of the most long APs [12]. T_{re} and QT intervals determined by the tangent method are shorter than those determined by the baseline method.

миокарда увеличенный Тре отражает повышенный риск реперфузионных аритмий [31].

В качестве пороговых разные исследователи приводят значения Тре от 85 до 110 мс. Подобный разброс данных можно объяснить разной методикой измерения интервала (корректировали его величину или нет, использовали метод изолинии или тангенциальный) и тем, что одни исследователи оперировали величиной Тре, взятой по одному отведению, а другие — максимальной или глобальной, которая по определению всегда больше; вышесказанное необходимо учитывать при использовании данных литературы. Поскольку на сегодняшний день общепринятые нормы для пороговых значений Тре отсутствуют, при интерпретации величины этого интервала желательно брать в расчет вышеперечисленные закономерности: Тре, измеренный тангенциальным методом, приблизительно на 10 мс короче измеренного методом изолинии; у женщин Тре на 2–10 мс короче, чем у мужчин; величина Тре увеличивается с возрастом; наибольшие значения Тре чаще всего наблюдаются в отведении V3, наименьшие — в отведениях III и V1. В качестве ориентира относительно нормальной величины Тре можно использовать данные, полученные на 414 взрослых здоровых людей трудоспособного возраста: 95 % доверительный интервал для Тре составил 50–90 мс, для скорректированного Тре — 53–100 мс [32]. Относительно пороговой величины Тре, метаанализ 33 обсервационных исследований с участием 155 856 пациентов дал значение отсечки $103,3 \pm 17,4$ мс для прогнозирования аритмических исходов или смертности [33].

Важно отметить, что повышенная (и пониженная) величина Тре связана не только с сердечной смертью, но и со смертностью от всех причин [6, 34, 35]. Помимо того, что интервал Тре является мерой ДР, он также коррелирует со степенью и тяжестью артериального стеноза и структурного ремоделирования желудочков; кроме того, после реваскуляризации его величина уменьшается, и он может быть использован в качестве суррогатного показателя успеха лечения [25, 36].

Дисперсия интервала Тре

Величина интервала Тре отличается от отведения к отведению, и была выдвинута гипотеза, что разница между максимальной и минимальной величиной интервала в грудных отведениях — дисперсия Тре — отражает изменение трансмуральной ДР среди различных областей миокарда желудочков, то есть является мерой локальных различий в величине ДР [28]. Между тем, именно увеличение локальной неоднородности реполяризации наиболее критично в плане возникновения аритмий, так как в данном случае на коротком расстоянии возникает крутой градиент реполяризации и рефрактерности [3, 37]. Подобный

крутой локальный градиент может возникнуть в области, разделяющей нормальные и укороченные ПД (например, в пограничной зоне ишемии) или в зоне, разделяющей нормальные и удлиненные ПД (например, в случае аритмогенной дисплазии правого желудочка). Эксперименты на животных и математическое моделирование подтвердили связь между дисперсией Тре и локальным увеличением желудочковой ДР [38].

Вопрос о том, в какой мере дисперсия Тре отражает локальные различия в ДР, требует дальнейшего изучения. Интервал Тре, как это было показано в предыдущем разделе, отражает общую величину ДР, но в каждом конкретном отведении в первую очередь отображаются события в области желудочка, ближайшей к данному отведению. Локальные изменения длительности ПД и времени окончания реполяризации в этой области вызывают сдвиги моментов пика и/или окончания Т-волны в данном отведении. Если в результате этих сдвигов укорачивается самый короткий или удлиняется самый длинный интервал Тре, то дисперсия Тре, действительно, возрастает. Однако, если эти сдвиги затрагивают отведения со «средней» величиной Тре, дисперсия Тре не изменится, как это было показано в рамках компьютерной модели формирования ЭКГ [39], и в данном случае более прямым показателем величины локальной ДР могут быть различия в моментах пика и окончания Т-волны между анатомически смежными отведениями.

В клинических исследованиях дисперсия интервала Тре показала себя как лучший независимый предиктор аритмического риска по сравнению с самим интервалом Тре [28], что косвенно подтверждает ее связь именно с локальной ДР. Так, у некоторых пациентов с синдромом Бругада, имевших рецидивы фибрилляции желудочков, величина интервала Тре не выходила за пределы нормы, в то время как дисперсия Тре была увеличена [28].

Величина дисперсии Тре в меньшей степени зависит от способа измерения окончания Т-волны, чем величина интервала Тре, однако значения, приводимые разными авторами, существенно различаются: у здоровых людей — от 18 [28] до 27 мс [19], верхний предел нормы для всех возрастных категорий может достигать 40 мс [18, 19].

Отношение Тре/QT

Поскольку величина Тре, как и величина QT, зависит от ЧСС, было предложено корректировать Тре путем деления на QT [40]. Уникальность этого индекса в том, что у здоровых людей отношение Тре/QT имеет постоянное среднее значение в грудных отведениях 0,21–0,22 мс в широком диапазоне ЧСС — от 60 до 100 уд/мин, и не зависит от возраста и пола [40]. У пациентов с высоким риском аритмических

событий, таких как синдром удлиненного интервала QT, синдром укороченного интервала QT, синдром Бругада, синдром Такоцубо, а также у лиц с органическими заболеваниями сердца (такими как перенесенный острый инфаркт миокарда или хроническая ишемическая болезнь сердца), соотношение Tre/QT повышено и представляет предсказательную ценность для прогнозирования аритмий и смертности [41–44].

Предположительно, постоянное значение данного индекса при изменении ЧСС обеспечивается разной скоростью удлинения/укорочения самых коротких (эпикардиальных) и самых длинных (эндокардиальных) ПД [45]. Увеличение Tre/QT у пациентов с риском аритмических событий может означать нарушение динамической (зависящей от ЧСС) пропорции между длительностью эпикардиальных и эндокардиальных ПД. Следует учитывать, что величина Tre/QT очень чувствительна к методу определения момента окончания Т-волны и различается в разных отведениях.

Ограничения интервала Тре, дисперсии Тре и отношения Тре/QT как предикторов аритмий

На сегодняшний день интервал Тре и его производные не включены в какие-либо национальные или международные клинические рекомендации, однако клинические данные накапливаются, и есть все основания полагать, что в будущем эти индексы станут частью стандарта анализа ЭКГ.

Есть исследования, в которых Тре не подтвердил свою репутацию независимого аритмогенного индекса [46]. Однако это не умаляет его клиническую значимость, поскольку механизмы запуска аритмий могут быть связаны не только с нарушениями реполяризации, но также и с нарушениями деполяризации или другими факторами [47].

Прогностическая ценность Тре и его производных может быть увеличена при использовании этих индексов в комплексе с другими показателями реполяризации. В частности, предсказательная точность модели, включающей Тре и QT, была в два раза выше, чем у Тре в отдельности [48]. В последнее время для дальнейшего улучшения стратификации аритмического риска были предложены комплексные ЭКГ-индексы, сочетающие интервал Тре и отношение Tre/QT с показателями деполяризации (Tre/QRS , $Tre/(QT \times QRS)$, $QRS \times Tre/QRSD$ и $(QRS \times Tre)/(QRSD \times QT)$, где $QRSD$ — дисперсия длительности комплекса QRS [47, 49].

Заключение

Анализ результатов клинических, экспериментальных и модельных исследований показал, что интервал между пиком и окончанием Т-волны (Тре) и его производные (дисперсия Тре и отношение

Tre/QT) содержат информацию о величине глобальной и локальной ДР в желудочках сердца, в то время как дисперсия интервала QT является наименее точной мерой ДР. Тре и его производные являются доказанными полезными предикторами жизнеугрожающих аритмий, связанных с повышенной гетерогенностью реполяризации, и общей смертности. Несмотря на то, что интервал Тре, дисперсия Тре и отношение Tre/QT на сегодняшний день не включены в текущие российские или зарубежные клинические рекомендации, использование этих ЭКГ-индексов может существенно улучшить качество стратификации аритмического риска и оценки успеха лечения у разных категорий пациентов.

Конфликт интересов / Conflict of interest

Авторы заявили об отсутствии потенциального конфликта интересов. / The authors declare no conflict of interest.

Финансирование / Funding

Работа выполнена в рамках ГЗ «Механизм формирования электрической неоднородности на разных уровнях организации сердца» FUUU-2022-0025 (2022-2026гг, № 1021052404529-3) / FUUU-2022-0025-1021052404529-3". / The work was carried out within the framework of the State Assignment "Mechanism of the formation of electrical heterogeneity at different levels of heart organization" FUUU-2022-0025 (2022-2026, Registration No. 1021052404529-3) / FUUU-2022-0025-1021052404529-3.

Соответствие нормам этики / Compliance with ethical principles

Исследование одобрено локальным этическим комитетом. Пациентами подписано информированное согласие на публикацию данных, полученных в результате исследований. / The study was approved by the Local Ethics Committee. All patients signed informed consent for the publication of the research data.

Авторы заявляют об отсутствии использования генеративного искусственного интеллекта. / The authors declare no use of Generative AI in the preparation of this manuscript.

Список литературы / Reference

1. Миронов Н. Ю., Голицын С. П. Калиевые каналы клеток проводящей системы сердца и рабочего миокарда: структурно-функциональные особенности, патофизиологическое и клиническое значение. *Кардиология*. 2013;53(11):66–73. <https://elibrary.ru/ROFEZJ>
- Mironov NY, Golitsyn SP. Potassium channels of the cardiac conduction system and myocardium cells: structural and function-

al features, pathophysiological and clinical significance. *Kardiologiya*. 2013;53(11):66–73. (In Russ.) <https://elibrary.ru/ROFEZJ>

2. Johnson EK, Springer SJ, Wang W, et al. Differential expression and remodeling of transient outward potassium currents in human left ventricles. *Circ Arrhythm Electrophysiol*. 2018;11(1):e005914. <https://doi.org/10.1161/CIRCEP.117.005914>

3. Osadchii OE. Role of abnormal repolarization in the mechanism of cardiac arrhythmia. *Acta Physiol*. 2017;220(Suppl 712):1–71. <https://doi.org/10.1111/apha.12902>

4. Khokhlova A, Balakina-Vikulova N, Katsnelson L, et al. Transmural cellular heterogeneity in myocardial electromechanics. *J Physiol Sci*. 2018;68(4):387–413. <https://doi.org/10.1007/s12576-017-0541-0>

5. Жданов А. М., Шестаков В. А., Пономаренко В. Б. Неоднородность процессов реполяризации в прогнозе жизнеопасных желудочковых нарушений ритма сердца у больных с полной атриовентрикулярной блокадой. *Вестник аритмологии*. 2002;30:12–21. <https://elibrary.ru/HSQGTD>

Zhdanov AM, Shestakov VA, Ponomarenko VB. Heterogeneity of repolarization processes in the prognosis of life-threatening ventricular cardiac arrhythmias in patients with complete atrioventricular block. *Vestnik aritmologii*. 2002;30:12–21. (In Russ.) <https://elibrary.ru/HSQGTD>

6. Bachmann TN, Skov MW, Rasmussen PV, et al. Electrocardiographic tpeak-tend interval and risk of cardiovascular morbidity and mortality: results from the copenhagen ECG study. *Heart Rhythm*. 2016;13(4):915–924. <https://doi.org/10.1016/j.hrthm.2015.12.027>

7. Day CP, McComb JM, Campbell RW. QT dispersion: an indication of arrhythmia risk in patients with long QT intervals. *British heart journal*. 1990;63(6):342–344. <https://doi.org/10.1136/hrt.63.6.342>

8. Malik M, Batchvarov VN. Measurement, interpretation, and clinical potential of QT dispersion. *J Am Coll Cardiol*. 2000;36:1749–66. [https://doi.org/10.1016/s0735-1097\(00\)00962-1](https://doi.org/10.1016/s0735-1097(00)00962-1)

9. Rautaharju PM, Surawicz B, Gettes LS, et al. AHA/ACCF/HRS recommendations for the standardization and interpretation of the electrocardiogram: part IV: the ST segment, T and U waves, and the QT interval: a scientific statement from the American Heart Association Electrocardiography and Arrhythmias Committee, Council on Clinical Cardiology; the American College of Cardiology Foundation; and the Heart Rhythm Society. Endorsed by the International Society for Computerized Electrocardiology. *J Am Coll Cardiol*. 2009;53(11):982–991. <https://doi.org/10.1161/CIRCULATIONAHA.108.191096>

10. Колоцей Л. В., Снежицкий В. А. Многофакторная модель прогнозирования развития полиморфной желудочковой тахикардии у пациентов с лекарственно-индуцированным удлинением интервала QT при применении антиаритмических препаратов III класса. *Вестник аритмологии*. 2023;30:49–60. <https://elibrary.ru/QCDQUH>

Kolotzei LV, Snezhitsky V. A. Multifactorial model for predicting the development of polymorphic ventricular tachycardia in patients with drug-induced prolongation of the QT interval

when using class III antiarrhythmic drugs. *Vestnik aritmologii*. 2023;30:49–60. (In Russ.) <https://elibrary.ru/QCDQUH>

11. Zabel M, Portnoy S, Franz MR. Electrocardiographic indexes of dispersion of ventricular repolarization: an isolated heart validation study. *J Am Coll Cardiol*. 1995;25(3):746–52. [https://doi.org/10.1016/0735-1097\(94\)00446-W](https://doi.org/10.1016/0735-1097(94)00446-W)

12. Yan GX, Antzelevitch C. Cellular basis for the normal T wave and the electrocardiographic manifestations of the long-QT syndrome. *Circulation*. 1998;98(18):1928–1936. <https://doi.org/10.1161/01.cir.98.18.1928>

13. Xia Y, Liang Y, Kongstad O, et al. Tpeak-Tend interval as an index of global dispersion of ventricular repolarization: evaluations using monophasic action potential mapping of the epi- and endocardium in swine. *J Interv Card Electrophysiol*. 2005;14:79–87. <https://doi.org/10.1007/s10840-005-4592-4>

14. Opthof T, Janse MJ, Meijborg VM, et al. Dispersion in ventricular repolarization in the human, canine and porcine heart. *Prog Biophys Mol Biol*. 2016;120(1–3):222–235. <https://doi.org/10.1016/j.phiomolbio.2016.01.007>

15. Kors JA, Ritsema van Eck HJ, van Herpen G. The meaning of the Tp-Te interval and its diagnostic value. *J Electrocardiol*. 2008;41(6):575–80. <https://doi.org/10.1016/j.jelectrocard.2008.07.030>

16. Arteyeva NV, Goshka SL, Sedova KA, et al. What does the T(peak)-T(end) interval reflect? An experimental and model study. *J Electrocardiol*. 2013;46(4):296.e1–8. <https://doi.org/10.1016/j.jelectrocard.2013.02.001>

17. Neumann B, Vink AS, Hermans BJM, et al. Manual vs. automatic assessment of the QT-interval and corrected QT. *Europace*. 2023;25(9). <https://doi.org/10.1093/europace/euad213>

18. Bieganowska K, Sawicka-Parobczyk M, Bieganowski M, et al. Tpeak-tend interval in 12-lead electrocardiogram of healthy children and adolescents Tpeak-tend interval in childhood. *Ann Noninvasive Electrocardiol*. 2013;18(4):344–351. <https://doi.org/10.1111/anec.12035>

19. Braschi A, Abrignani MG, Francavilla VC, et al. Age- and sex-based reference ranges for non-invasive ventricular repolarisation parameters. *Int J Clin Pract*. 2017;71(5). <https://doi.org/10.1111/ijcp.12949>

20. Hnatkova K, Toman O, Šišáková M, et al. Sex and race differences in J-Tend, J-Tpeak, and Tpeak-Tend intervals. *Sci Rep*. 2019;9(1):19880. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-56328-8>

21. Tse G, Gong M, Li CKH, et al. $T_{peak}-T_{end}$, $T_{peak}-T_{end}/QT$ ratio and $T_{peak}-T_{end}$ dispersion for risk stratification in Brugada Syndrome: A systematic review and meta-analysis. *J Arrhythm*. 2018;34(6):587–597. <https://doi.org/10.1002/joa3.12118>

22. Hanson B, Gill J, Western D, et al. Cyclical modulation of human ventricular repolarization by respiration. *Front Physiol*. 2012;3:379. <https://doi.org/10.3389/fphys.2012.00379>

23. Inanir M, Sincer I, Erdal E, et al. Evaluation of electrocardiographic ventricular repolarization parameters in extreme obesity. *J Electrocardiol*. 2019;53:36–39. <https://doi.org/10.1016/j.jelectrocard.2018.12.003>

24. Tse G, Gong M, Meng L, et al. Meta-analysis of $T_{peak} - T_{end}$ and $T_{peak} - T_{end} / QT$ ratio for risk stratification in congenital long QT syndrome. *J Electrocardiol.* 2018;51(3):396–401. <https://doi.org/10.1016/j.jelectrocard.2018.03.001>
25. Tse G, Gong M, Meng L, et al. Predictive value of $T_{peak} - T_{end}$ indices for adverse outcomes in acquired qt prolongation: a meta-analysis. *Front Physiol.* 2018;9:1226. <https://doi.org/10.3389/fphys.2018.01226>
26. Zhang H, Kharche S, Holden AV, et al. Repolarisation and vulnerability to re-entry in the human heart with short QT syndrome arising from KCNQ1 mutation-a simulation study. *Prog Biophys Mol Biol.* 2008;96(1–3):112–131. <https://doi.org/10.1016/j.pbiomolbio.2007.07.020>
27. Anttonen O, Junttila MJ, Maury P, et al. Differences in twelve-lead electrocardiogram between symptomatic and asymptomatic subjects with short QT interval. *Heart Rhythm.* 2009;6(2):267–271. <https://doi.org/10.1016/j.hrthm.2008.10.033>
28. Castro Hevia J, Antzelevitch C, Tornés Bázquez F, et al. Tpeak-Tend and Tpeak-Tend dispersion as risk factors for ventricular tachycardia/ventricular fibrillation in patients with the Brugada syndrome. *J Am Coll Cardiol.* 2006;47(9):1828–34. <https://doi.org/10.1016/j.jacc.2005.12.049>
29. Wang X, Zhang L, Gao C, et al. ST-segment elevation and the Tpeak-Tend/QT ratio predict the occurrence of malignant arrhythmia events in patients with vasospastic angina. *J Electrocardiol.* 2019;53:52–56. <https://doi.org/10.1016/j.jelectrocard.2019.01.001>
30. Chiotis S, Doundoulakis I, Zgouridou A, et al. Predictors of arrhythmic events in hypertrophic cardiomyopathy patients with an implantable cardioverter defibrillator: a systematic review and meta-analysis. *Eur Heart J Qual Care Clin Outcomes.* 2025;11(7):1004–1014. <https://doi.org/10.1093/ehjqcco/qcaf021>
31. Demidova MM, Carlson J, Erlinge D, et al. Tpeak-Tend interval is associated with ventricular fibrillation during reperfusion in ST-elevation myocardial infarction. *Int J Cardiol.* 2019;280:80–83. <https://doi.org/10.1016/j.ijcard.2019.01.008>
32. Koca H, Koç M. What is the Normal Value of Tpe Interval and Corrected Tpe Interval? *Acta Medica.* 2020;51(4):10–5. <https://doi.org/10.32552/2020.ActaMedica.493>
33. Tse G, Gong M, Wong WT, et al. The $T_{peak} - T_{end}$ interval as an electrocardiographic risk marker of arrhythmic and mortality outcomes: A systematic review and meta-analysis. *Heart Rhythm.* 2017;14(8):1131–1137. <https://doi.org/10.1016/j.hrthm.2017.05.031>
34. Braun CC, Zink MD, Gozdowsky S, et al. A longer Tpeak-Tend interval is associated with a higher risk of death: a meta-analysis. *J Clin Med.* 2023;12(3):992. <https://doi.org/10.3390/jcm12030992>
35. Piccirillo G, Moscucci F, Carnovale M, et al. QT and Tpeak-Tend interval variability: Predictive electrical markers of hospital stay length and mortality in acute decompensated heart failure. Preliminary data. *Clin Cardiol.* 2022;45(12):1192–1198. <https://doi.org/10.1002/clc.23888>
36. MozafaryBazargany M, Samimisedeh P, Gholami N, et al. Diagnostic Indicators of ECG for Coronary Slow Flow Phenomenon; a Systematic Review and Meta-Analysis. *Arch Acad Emerg Med.* 2024;12(1):e34. <https://doi.org/10.22037/aaem.v12i1.2202>
37. Antzelevitch C, Fish J. Electrical heterogeneity within the ventricular wall. *Basic Res Cardiol.* 2001;96(6):517–527. <https://doi.org/10.1007/s003950170002>
38. Sedova K, Galinyte V, Arteyeva N, et al. Multi-lead vs single-lead $T_{peak} - T_{end}$ interval measurements for prediction of reperfusion ventricular tachyarrhythmias. *J Cardiovasc Electrophysiol.* 2019;30(10):2090–2097. <https://doi.org/10.1111/jce.14105>
39. Arteyeva NV, Azarov JE. ECG markers of local but not global increase in dispersion of ventricular repolarization (simulation study). *J Electrocardiol.* 2020;60:54–59. <https://doi.org/10.1016/j.jelectrocard.2020.03.009>
40. Gupta P, Patel C, Patel H, et al. T(p-e)/QT ratio as an index of arrhythmogenesis. *J Electrocardiol.* 2008;41(6):567–574. <https://doi.org/10.1016/j.jelectrocard.2008.07.016>
41. Braschi A, Frasheri A, Lombardo RM, et al. Association between Tpeak-Tend/QT and major adverse cardiovascular events in patients with Takotsubo syndrome. *Acta Cardiol.* 2021;76(7):732–738. <https://doi.org/10.1080/00015385.2020.1776012>
42. Wu YE, Ma L, Hu ZP. Prognostic value of infarct-related-lead Tpeak-Tend/QT ratio in patients with ST-segment elevation myocardial infarction. *Heart Vessels.* 2022;37(4):539–548. <https://doi.org/10.1007/s00380-021-01950-8>
43. Erdem K, Duman I, Ergün R, et al. The correlation between electrocardiographic parameters and mortality in non-cardiac ICU patients. *Eur Rev Med Pharmacol Sci.* 2023;27(14):6662–6670. https://doi.org/10.26355/eurev_202307_33136
44. Bekler Ö, Kazan SD, Harbalioglu H, et al. Predictive value of electrocardiographic markers versus echocardiographic and clinical measures for appropriate ICD shocks in heart failure patients. *J Clin Med.* 2025;14(15):5506. <https://doi.org/10.3390/jcm14155506>
45. Arteyeva NV, Azarov JE. Scenarios for increasing, decreasing and stability of Tpe/QT ratio (Simulation Study). *International Journal of Biomedicine.* 2022;12(4):535–38
46. Malik M, Huikuri H, Lombardi F, et al. Conundrum of the Tpeak-Tend interval. *J Cardiovasc Electrophysiol.* 2018;29(5):767–770. <https://doi.org/10.1111/jce.13474>
47. Reynard JT, Oshodi OM, Lai JC, et al. Electrocardiographic conduction and repolarization markers associated with sudden cardiac death: moving along the electrocardiography waveform. *Minerva Cardioangiol.* 2019;67(2):131–144. <https://doi.org/10.23736/S0026-4725.18.04775-8>
48. Truyen TTTT, Uy-Evanado A, Nakamura K, et al. Markers of sudden cardiac death associated with the ventricular-paced 12-lead ECG. *Eur Heart J Open.* 2025;5(6). <https://doi.org/10.1093/ehjopen/oeaf131>
49. Ertas L, Gul O, Yildirim R, et al. Evaluation of cardiac electrophysiological balance index in children diagnosed with

type 1 diabetes mellitus. *Cardiol Young*. 2025;1–7. <https://doi.org/10.1017/S1047951125000150>

and analysis, editing; Parmon E. V. — literature search and analysis, editing.

Информация об авторах:

Артеева Наталия Викторовна — доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории физиологии сердца, Институт физиологии Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, Россия, natalia.arteyeva@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3421-9452>;

Берникова Олеся Геннадьевна — кандидат медицинских наук, ведущий научный сотрудник лаборатории физиологии сердца, Институт физиологии Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, Россия, bernikovaog@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-9780-1503>;

Азаров Ян Эрнестович — доктор биологических наук, доцент, главный научный сотрудник лаборатории физиологии сердца, Институт физиологии Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, Россия, j.azarov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-1779-273X>;

Пармон Елена Валерьевна — кандидат медицинских наук, доцент кафедры факультетской терапии с клиникой, ФГБУ «НМИЦ им. В. А. Алмазова» Минздрава России, Санкт-Петербург, Россия, parmon@almazovcentre.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0852-631X>.

Вклад авторов:

Артеева Н. В. — концепция, сбор и анализ литературы, написание текста, редактирование; Берникова О. Г. — сбор и анализ литературы, редактирование; Азаров Я. Э. — сбор и анализ литературы, редактирование; Пармон Е. В. — сбор и анализ литературы, редактирование.

Authors information:

Natalia V. Arteyeva, DSc of Biology, Leading Resercher of the laboratory of heart physiology, FRC Komi SC UB RAS, Syktyvkar, Russia, natalia.arteyeva@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3421-9452>;

Olesya G. Bernikova, MD, Leading Researcher of the laboratory of heart physiology, FRC Komi SC UB RAS, Syktyvkar, Russia, bernikovaog@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-9780-1503>;

Jan E. Azarov, DSc of Biology, Associate Professor, Chief Researcher of the laboratory of heart physiology, FRC Komi SC UB RAS, Syktyvkar, Russia, j.azarov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-1779-273X>;

Elena V. Parmon, MD, Associate Professor of the Department of Faculty Therapy with the Clinic, V.A. Almazov NMRC, St. Petersburg, Russia, parmon@almazovcentre.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0852-631X>.

Contribution of the authors:

Arteeva N. V. — conceptualization, literature search and analysis, text writing, editing; Bernikova O. G. — literature search and analysis, editing; Azarov Ya. E. — literature search

Поступила в редакцию / Received: 17.10.2025

Принята к публикации / Accepted: 19.01.2026