

7. Reta C., Altamirano L, Gonzalez J.A., Diaz-Hernandez R., Peregrina H., Olmos I., Alonso J.E., Lobato R. Segmentation and classification of bone marrow cells images using contextual information for medical diagnosis of acute leukemias // PLoS ONE. 2015. Vol. 10. № 6. PP. 1-18.
8. Никитаев В.Г., Проничев А.Н., Поляков Е.В., Чернышева О.А., Серебрякова И.Н., Тупицын Н.Н. Формирование выборок клеток в системе компьютерной микроскопии для проведения исследований методов диагностики острых лимфобластных лейкозов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2019. Т. 9. № 2. С. 91-101.
9. Nikitaev V.G., Pronichev A.N., Polyakov E.V., Mozhenkova A.V., Tupitsin N.N., Frenkel M.A. Textural characteristics of bone marrow blast nucleus images with different variants of acute lymphoblastic leukemia // Journal of Physics: Conference Series. 2018. № 945. P. 012008.
10. Никитаев В.Г., Нагорнов О.В., Проничев А.Н., Поляков Е.В., Дмитриева В.В., Зайцев С.М., Сельчук В.Ю., Тупицын Н.Н., Френкель М.А., Моженкова А.В., Безнос О.А. Способ распознавания структуры ядер бластов крови и костного мозга с применением световой микроскопии в сочетании с компьютерной обработкой данных для определения В- и Т-линейных острых лимфобластных лейкозов / Патент на изобретение RU 2659217 С1. 28.06.2018.
11. Никитаев В.Г., Нагорнов О.В., Проничев А.Н., Поляков Е.В., Сельчук В.Ю., Чистов К.С., Блиндарь В.Н., Дмитриева В.В., Гордеев В.В. Устройство анализа клеток крови на основе оценки характеристик структурных элементов ядер / Патент на полезную модель RU 159002 U1. 20.01.2016.
12. Денисюк С.С., Тупицын Н.Н., Поляков Е.В., Простаков С.Н. Система поддержки принятия решений при диагностике острых лейкозов / XIV Международная научная конференция «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии – ФРЭМЭ'2020». Владимир-Суздаль, Россия. Доклады. Кн. 2. С. 71-75.

Валентин Григорьевич Никитаев,
 д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой,
 кафедра компьютерных медицинских систем,
 ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский
 ядерный университет «МИФИ»,
 Николай Николаевич Тупицын,
 д-р мед. наук, профессор,
 зав. лабораторией гемопоза,
 ФГБУ «Национальный медицинский
 исследовательский центр онкологии
 им. Н.Н. Блохина» Минздрава России,
 Александр Николаевич Проничев,
 канд. техн. наук, доцент,
 Евгений Валерьевич Поляков,
 ассистент,
 отделение биотехнологий офиса
 образовательных программ (М),
 Валентина Викторовна Дмитриева,
 канд. техн. наук, доцент,
 кафедра электрофизических установок,
 ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский
 ядерный университет «МИФИ»,
 Ольга Алексеевна Чернышева,
 канд. мед. наук, ст. научный сотрудник,
 лаборатория иммунологии гемопоза,
 Ирина Николаевна Серебрякова,
 канд. мед. наук, врач,
 клиничко-диагностическая лаборатория,
 Александра Дмитриевна Палладина,
 врач,
 лаборатория иммунологии гемопоза,
 ФГБУ «Национальный медицинский
 исследовательский центр онкологии
 им. Н.Н. Блохина» Минздрава России,
 г. Москва,
 e-mail: vgnikitayev@mephi.ru

П.Ю. Тимофеева, Б.Э. Алексеев, Л.А. Манило, А.П. Немирко

Алгоритм автоматического представления динамики корреляционных ритмограмм на длинных записях сигналов

Аннотация

В клинической практике для исследования сердечного ритма часто используется суточный мониторинг записей ЭКГ. Один из методов анализа долгосрочных записей сигнала ЭКГ – представление сигнала в виде корреляционной ритмограммы. Путем анализа скаттерограммы получают статическую информацию, обработка которой дает малоинформативные и примитивные показатели. Эти показатели не могут описать динамическое изменение RR-интервалов, которое содержит дополнительную информацию о характере сердцебиения. В нашем исследовании мы разработали систему, позволяющую представить сигналы длительной записи ЭКГ в виде динамической корреляционной ритмограммы. Алгоритм позволяет просмотреть изменение динамики сердцебиения в течение 24 ч (и более) за менее чем 1 мин. Используя нашу разработку как инструмент визуализации динамической информации RR-интервалов, специалисты могут извлекать уникальную информацию о характере сердцебиения и классифицировать сердечные нарушения с высокой точностью.

Введение

Популярным инструментом для классификации сердечных патологий, в частности сердечных аритмий, является анализ variability сердечного ритма (ВСР). В последнее время большой интерес представляет анализ графического отображения ВСР в виде скаттерограмм, ритмограмм, гистограмм [1]. Одним из эффективных методов анализа ВСР является исследование графика Пуанкаре (ГП). В исследовании [2] описыва-

ется связь форм графика Пуанкаре с различными типами ритма. К примеру, форма ГП «торпеда» связана с синусовым ритмом, более сложные шаблоны ГП описывают различные сердечные тахикардии: форма «веер» – мерцательная аритмия, «двусторонний цветок» – преждевременная деполяризация предсердий, а шаблон «трехсторонний цветок» связан с преждевременной деполяризацией желудочков.

Описанные в [3] связи шаблонов и сердечных ритмов используются в работе [4] для классификации четырех типов

аритмий: синусового ритма, фибрилляции предсердий, трепетания предсердий, предсердной тахикардии. Распознавание аритмий основано на модели нейронной сети, на вход которой подаются статистические показатели ГП, такие как частотное распределение точек гистограмм и нелинейный показатель комплексной корреляционной меры (ККМ). В результате данного исследования удалось классифицировать пять видов отображений Пуанкаре, связанных с различными типами ритма, с точностью более 94,2 %.

В работе [5] анализ корреляционной ритмограммы осуществляется с использованием набора следующих признаков: угол, направление линий, положение временных отрезков (УНП). Здесь так же, как и в предыдущей работе, дескрипторы извлекаются из геометрических характеристик ГП. В отличие от предыдущих исследований извлеченные признаки УНП позволяют более подробно описать особенности отображения Пуанкаре и решить задачу распознавания четырех сердечных состояний: нормальный синусовый ритм (НСР), инфаркт миокарда (ИМ), застойная сердечная недостаточность (ЗСН) и фибрилляция предсердий (ФП). Благодаря использованию признаков УНП точность классификации для четырех групп ритма составила 94,8 и 95,58 % для обучающей и контрольной выборок, извлеченных из базы данных Physionet.

Анализ графического отображения корреляционной ритмограммы

Наиболее популярными методами анализа ВСР являются линейные методы, однако в последние годы наблюдается повышенный интерес к нелинейным методам, таким как анализ отображения Пуанкаре. ГП является одной из форм представления фазового пространства и отображает нелинейные характеристики вариабельности сердечного ритма. Отображение Пуанкаре позволяет визуализировать изменчивость временных рядов [6]. Существует два вида отображения графика Пуанкаре: ГП первого порядка представляет собой графическое отображение распределения кардиоинтервалов в двухмерной координатной плоскости (x_i, x_{i+1}), где x_i – значение i -го кардиоинтервала, и дает информацию об изменении распределения ВСР. ГП второго порядка представляет собой график зависимости $[x_{(i+1)} - x_i]$ от $[x_i - x_{(i-1)}]$ и описывает скорость изменения ВСР.

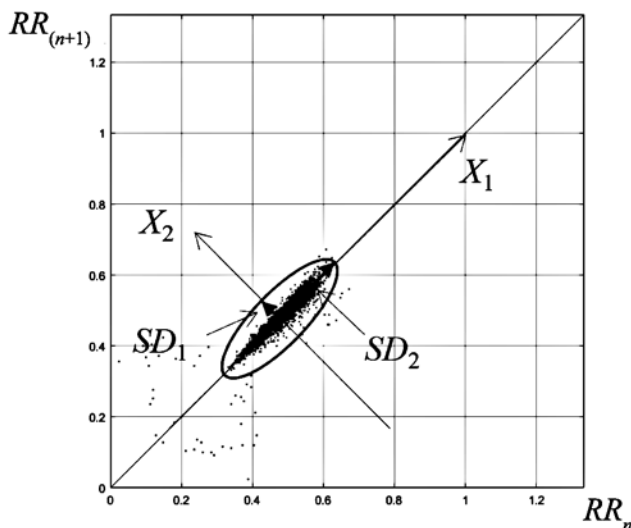


Рис. 1. Стандартный график Пуанкаре с временной задержкой временного ряда $m = -1$

Для анализа ВСР необходимо количественно оценить особенности различных участков графического отображения Пуанкаре. С этой целью в работе [7] описываются стандартные дескрипторы, используемые для количественной оценки геометрии графика Пуанкаре, а именно $SD1$ и $SD2$. Показатели $SD1$ и $SD2$ представляют собой дисперсию множества точек вдоль малой и большой осей эллипса – геометрической фигуры, расположенной по периметру распределения Пуанкаре

(рис. 1). Однако показатели $SD1$ и $SD2$ оценивают только пространственную информацию и могут быть одинаковыми при разных временных параметрах. С целью оценки временной динамики ГП в работе [4] предлагается использовать ККМ. Функция ККМ дает количественную оценку корреляции ритмограммы. Эта оценка вычисляется для разных временных задержек в последовательности RR-интервалов. Именно за счет различного временного сдвига удается вычислить временную динамику кардиоинтервалов. Индекс комплексной корреляционной меры извлекается из ГП как первого, так и второго порядка, что позволяет более широко исследовать динамику распределения ВСР. С использованием нелинейного индекса ККМ, а также частотных распределений точек в разных областях графика Пуанкаре авторам удалось классифицировать такие группы сердечбиений, как синусовый ритм, фибрилляция предсердий, трепетание предсердий, предсердная тахикардия. Полученные результаты показывают, что показатель ККМ можно использовать для непосредственной классификации аритмий, однако этот метод не позволяет визуально отобразить нелинейность временной динамики распределения ВСР.

Помимо анализа ГП посредством известных дескрипторов, в последнее время все чаще предлагаются новые функции, описывающие нелинейность распределения ВСР. В работе [5] авторы использовали новый метод «Угол, направление, положение» (УНП) для классификации четырех сердечных состояний: нормальный синусовый ритм (НСР), инфаркт миокарда (ИМ), застойная сердечная недостаточность (ЗСН) и фибрилляция предсердий (ФП). Выделяются три основные функции: угол, направление траектории и местоположение средней точки. В совокупности они описывают временную динамику корреляционных ритмограмм. Оценка динамической информации осуществляется для каждой последовательности, состоящей из трех точек на отображении Пуанкаре. В этой работе также удалось выделить преимущество нового метода УНП перед стандартными линейными статистическими показателями $SD1$ и $SD2$. По извлеченным функциям строится карта УНП, которая применяется для визуального представления нелинейных характеристик ГП. Она связывает параметры угол и направление, где угол измеряется между двумя векторами, состоящими из трех последовательных точек, а направление Dir_i определяется как ориентация последовательности трех точек. Классификация с использованием метода УНП позволила с точностью 100 % распознать такие сердечные патологии, как застойная сердечная недостаточность и фибрилляция предсердий. Однако описанные в работе [5] результаты отражают также невысокую надежность данного метода. Хотя метод и позволяет визуально оценить временную динамику корреляционной ритмограммы, карта УНП не позволяет извлечь достаточно информации для надежной постановки диагноза.

Система для динамического отображения корреляционной ритмограммы

Результаты описанных выше исследований показывают успешное решение задачи классификации групп сердечных патологий по анализу отображения Пуанкаре. С целью извлечения дополнительной временной и морфологической информации из ГП мы разработали динамическую систему визуализации корреляционной ритмограммы [8].

Принципиально важным в этой системе является представление долгосрочных записей ЭКГ, так как при анализе сигналов длительностью от 24 ч возможно достоверно и точно распознать различные виды сердечных патологий. Так, на рис. 2 показаны фрагменты динамической системы представления графика Пуанкаре одной долгосрочной записи ЭКГ в случае двух разных типов сердечбиения. С этой целью из баз данных «MIT-BIH Long Term Database» и «BIDMC Congestive Heart Failure Database» были отобраны долгосрочные записи ЭКГ.

В пространстве привычного статичного отображения графика Пуанкаре для исследователя остаются неясными характер и последовательность построения данного отображения. Предлагаемая система представления дала возможность визу-

ализации динамики распределения RR-интервалов. Здесь уже можно видеть зависимость последовательности распределений от времени. Появляется возможность провести анализ таких морфологических особенностей, как смещение центра или среднего по распределению на графике Пуанкаре, изменение его структуры и формы, изменение частоты распределения точек вдоль малой и большой осей эллипса.

При необходимости анализа сегмента ГП разработанная система позволяет быстро «прокрутить» последовательность распределения во времени и выбрать интересующий временной интервал. Эта функция важна, если необходимо, например, оценить ВСП в промежуток времени, когда у пациента наблюдался приступ апноэ. Данная функция дает неограниченные возможности для специалиста в исследовании ГП в требуемый момент времени.

Для лучшего динамического представления распределения добавлена функция ускоренного просмотра отображения RR-интервалов. Так, запись сигнала длиной в 24 ч может быть просмотрена за 1 мин. Функция ускорения позволяет отобразить ВСП в пределах от 1 до 50 кадр/с, причем пользователь сам может ее настроить. На практике больше 50 кадр/с получить не удалось. Однако мы считаем, что скорость 50 кадр/с слишком велика для визуальной оценки распределения кардиоинтервалов.

Система позволяет выбрать величину окна захвата корреляционной ритмограммы. Изменение размера окна ведет к изменению количества точек на графике в момент времени. Таким образом, с увеличением размера окна увеличивается количество точек распределения на корреляционной ритмограмме. Важной функцией в системе визуализации является возможность изменения размера шага получаемого графического представления. Он показывает, на сколько точек сдвигается окно на каждом шаге отрисовки программой графика. С увеличением размера шага появляется возможность просмотреть ключевые изменения в структуре ритмограммы.

Для дальнейшего анализа и использования специалистами динамической корреляционной ритмограммы мы создали возможность записи всего графического представления либо интересующего сегмента системы с дальнейшим сохранением записи в формате «.gif».

Заключение

Рассмотрены методы классификации сердечных аритмий по анализу отображений Пуанкаре. Данные методы позволяют с высокой точностью классифицировать такие патологии, как застойная сердечная недостаточность, а также диагностировать синусовый ритм, фибрилляцию предсердий, трепетание предсердий. Выявлены возможности количественной оцен-

ки нелинейности сигналов ЭКГ и ее реализации с использованием новых функций. Проведенный аналитический обзор показывает, что анализ отображений Пуанкаре решает задачу распознавания сердечных заболеваний с выраженной хаотической составляющей в ЭКГ-сигналах. Использование новых функций, которые описывают геометрию ГП, дает возможность усовершенствовать существующие методы классификации аритмий и повысить точность диагностики патологий.

Представлена новая система автоматического отображения динамики корреляционной ритмограммы на долгосрочных записях ЭКГ-сигнала. Данная система позволяет извлечь дополнительную временную и морфологическую информацию о графике Пуанкаре с целью дальнейшего ее анализа. Разработанная система отображает распределение ВСП в форме динамически изменяющегося во времени ГП, причем пользователи могут настраивать необходимые частоту и скорость динамики отображения. Эта система послужит уникальным инструментом визуализации распределения ВСП для специалистов и позволит более тщательно изучить временную динамику ритмограммы. При помощи разработанной программы можно анализировать такие типы сердечных патологий, как застойная сердечная недостаточность, различные типы предсердных и желудочковых аритмий, трепетание предсердий, нормальный синусовый ритм.

До настоящего момента представление сигнала ЭКГ в системах холтеровского мониторирования было доступно в ускоренном режиме только в форме анализа непосредственно самого сигнала ЭКГ либо ритмограммы. Разработанная система решает задачу просмотра корреляционной ритмограммы в ускоренном режиме, что ранее не было доступно для систем длительного мониторирования. Предлагаемая система с длительным и ускоренным отображением ГП могла бы существенно улучшить качество работы холтеровских мониторинговых систем.

Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ), исследовательских проектов 18-07-00264, 19-07-00475 и 19-29-01009.

Список литературы:

1. Березный Е.А., Рубин А.М., Утехина Г.А. Практическая кардиоритмография / 3-е изд., перераб. и доп. – Озерск: НПП «Нео», 2005. С. 11-57.
2. Esperer H.D., Esperer C., Cohen R.J. Cardiac arrhythmias imprint specific signatures on Lorenz plots // Ann. Noninvasive Electrocardiol. 2008. № 13. PP. 44-60.

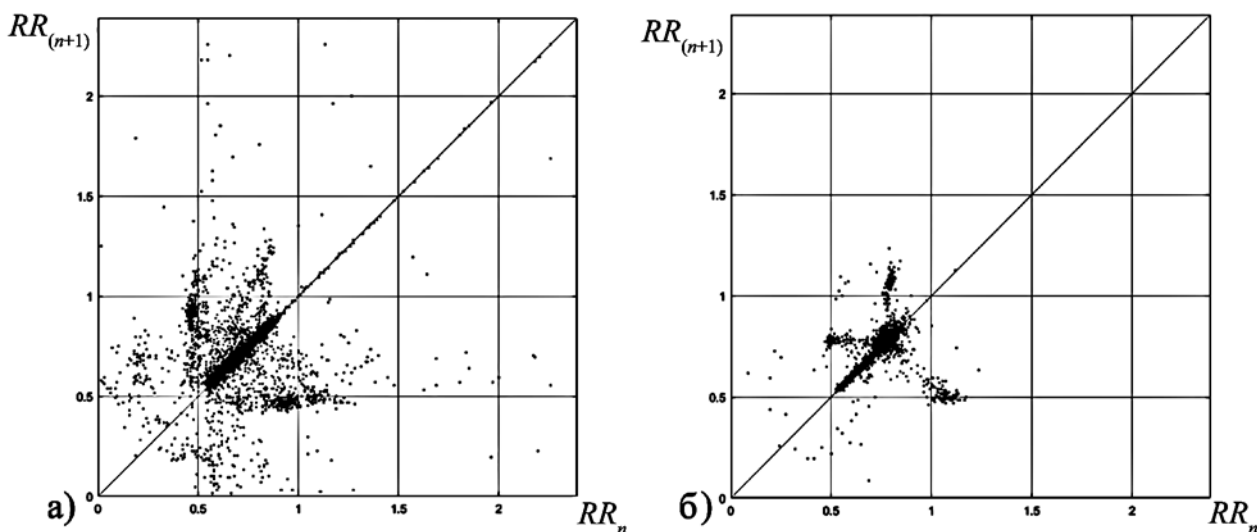


Рис. 2. Фрагменты динамической системы представления графика Пуанкаре в случаях двух разных типов сердечбиения на одном долгосрочном сигнале ЭКГ: а) застойная сердечная недостаточность; б) нормальный синусовый ритм с фрагментами аритмических сокращений

3. *Karmakar C.K., Khandoker A.H., Gubbi J., Palaniswami M.* Complex correlation measure: A novel descriptor for Poincaré plot // *BioMedical Engineering OnLine*. 2009. № 8, 17.
4. *Zhang L., Guo T., Xi B., Fan Y., Wang K., Bi J., Wang Y.* Automatic recognition of cardiac arrhythmias based on the geometric patterns of Poincaré plots // *Physiological Measurements*. 2015. № 36. PP. 283-301.
5. *Mohareri S., Dabanloo N.J., Rezaei S., Parvaneh S.* New feature set for better representation of dynamic of RR intervals in Poincaré plot // *Computing in Cardiology*. 2017. № 44. PP. 321-395.
6. *Golinska A.K.* Poincaré Plots in Analysis of Selected Biomedical Signals // *Studies in Logic, Grammar and Rhetoric*. 2013. № 35. PP. 117-127.
7. *Brennan M., Palaniswami M., Kamen P.* Do Existing Measures of Poincaré Plot Geometry Reflect Nonlinear Features of Heart Rate Variability? // *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*. 2001. Vol. 48. № 11. PP. 1342-1347.
8. *Тимофеева П.Ю., Алексеев Б.Э., Манило Л.А., Немирко А.П.* Алгоритм автоматического представления динамики корреляционных ритмограмм на длинных записях сигналов / XIV Международная научная конференция «Физика и ра-

диоэлектроника в медицине и экологии» ФРЭМЭ'2020, секция 2 «Биокибернетика и математическое моделирование», Владимир – Суздаль 1-3 июля 2020 г., Россия. Доклады. С. 121-123.

Полина Юрьевна Тимофеева,
магистрант,
Борис Эдуардович Алексеев,
магистрант,
Людмила Алексеевна Манило,
д-р техн. наук, профессор,
Анатолий Павлович Немирко,
д-р техн. наук, профессор,
кафедра биотехнических систем,
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский
государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ»
им. В.И. Ульянова (Ленина),
г. С.-Петербург,
e-mail: timofeyeva@live.com

С.М. Яцун, А.С. Яцун, А.Н. Рукавицын

Создание биомехатронного ортопедического устройства для лечения плоскостопия

Аннотация

Рассматривается механизм развития одного из часто встречающихся нарушений опорно-двигательного аппарата – плоскостопия. Представлены новые методы оценки функционального состояния и лечения стопы при помощи разработанного биомехатронного устройства. Описаны основные подходы, применяемые при создании устройства, и приведены результаты динамического исследования состояния свода стопы на фоне ортопедической коррекции.

Введение

Среди ключевых проблем современной ортопедии лидирующие позиции занимает плоскостопие – изменение формы стопы, характеризующееся опущением ее продольного и поперечного сводов, от которого страдают от 25 до 40 % всего населения. Такое патологическое уплощение стопы приводит к нарушению ее амортизационной функции, к деструктивным изменениям в позвоночном столбе и организме в целом. Деформация стопы влечет за собой нарушение распределения нагрузки на все элементы опорно-двигательной системы. Это прогрессирующая патология, которая при отсутствии лечения приводит к серьезным осложнениям [1], [2]. Лечение плоскостопия обычно осуществляется пассивными методами (массаж, тепловые ванны, ионогальванизация и т. п.), которые направлены прежде всего на улучшение кровоснабжения тканей стопы и снижение таких патологических явлений, как боль и высокая утомляемость при ходьбе. Поскольку данные методы направлены на улучшение трофики стопы, они малоэффективны для усиления сократительной способности мышц, удерживающих своды стоп, что крайне необходимо для лечения плоскостопия [1].

Устранение функциональной недостаточности стоп путем тренировки мышечных групп, которые обеспечивают поддержку их нормальной рессорной функции, становится возможным за счет совместного применения методов лечебной физкультуры и специальных средств физической реабилитации связочно-мышечного аппарата нижних конечностей, позволяющих постепенно увеличивать мышечное сопротивление и нагрузку на стопы. Подобные средства реабилитации должны осуществлять постоянную тренировку мышц-сгибателей и су-

пинаторов стопы как в ортостатических, так и в статокинетических условиях. Именно недостаток подобных адаптивных устройств на рынке медицинских реабилитационных аппаратов требует разработки и создания новейших механотерапевтических аппаратов для диагностики и лечения патологий стопы, связанных с функциональными нарушениями ее опорно-рессорных свойств.

Материалы и методы

Биомеханика стопы предопределяет ее многофункциональность, и в первую очередь выполнение опорной функции. Дополнительно стопа выполняет рессорную, аккомодационную и толчковую функции. Стопа является важнейшим компонентом системы компенсации механической нагрузки человеческого организма. Поэтому нарушение ее биомеханики напрямую воздействует на все лежащие выше структуры. По сути, находясь на границе между опорной поверхностью и телом человека, стопа является начальным звеном сложной кинематической цепи, в роли которой выступает опорно-двигательный аппарат (ОДА). При ходьбе плоскостопие способствует усилению влияния на человеческий организм ударной нагрузки, кумулятивный характер которой способствует развитию патологий ОДА [3]. Функциональная выносливость стоп определяется статико-динамическими условиями, связанными с их строением и функцией.

При нагрузке на нижнюю конечность стопа расширяется (уплощается) и приобретает более развернутые формы, а затем, благодаря эластичности связочного аппарата, под влиянием тяги мышц возвращается к начальным формам. Ключевой сустав стопы, подтаранный, позволяет осуществлять движение в трех плоскостях, т. е. пронацию и супинацию. При