

ВИБРОАРТРОГРАФИЯ, АРТРОФОНОГРАФИЯ — МЕТОДЫ НЕИНВАЗИВНОГО ВЫЯВЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ ХРЯЦА КОЛЕННОГО СУСТАВА

А.А. Ахпашев^{1,2}, Г.В. Фурсенко³, Д.В. Скворцов^{1,4}, С.Н. Кауркин¹

¹ Федеральный научно-клинический центр специализированных видов медицинской помощи и медицинских технологий Федерального медико-биологического агентства России, Москва, Российская Федерация

² Российский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация

³ Европейский медицинский центр, Москва, Российская Федерация

⁴ Российский национальный исследовательский медицинский университет имени Н.И. Пирогова, Москва, Российская Федерация

Артрофонография, виброартрография — неинвазивные методы оценки состояния хряща и коленного сустава в целом с помощью анализа звуков, возникающих во время движений (акустические датчики — акселерометры, микрофоны — помещаются на коленный сустав для измерения в нем шума). Предлагаются технически разнообразные методики фиксации датчиков, документирования и анализа суставных звуков. Выявленные особенности позволяют определить звуковые различия в коленных суставах с/без симптомов остеоартропатии. В исследованиях звуковые сигналы записывались, и после их обработки определялись и классифицировались частотные характеристики. Эффективность классификации коррелировала с существующими диагностическими тестами и, следовательно, может квалифицировать артрофонографию и виброартрографию как инструмент дополнительной диагностики.

Ключевые слова: артрофонография, виброартрография, коленный сустав, гонартроз, остеоартропатия.

(Для цитирования: Ахпашев А. А., Фурсенко Г. В., Скворцов Д. В., Кауркин С.Н. Виброартрография, артрофонография — методы неинвазивного выявления повреждений хряща коленного сустава. *Клиническая практика.* 2019;10(3):72–76. doi: 10.17816/clinpract10372–76)

VIBROARTHROGRAPHY, ARTHROPHONOGRAPHY — METHODS FOR NON-INVASIVE DETECTION OF THE KNEE CARTILAGE DAMAGE

A.A. Akhpashev^{1,2}, G.V. Fursenko³, D.V. Skvortsov^{1,4}, S.N. Kaurkin¹

¹ Federal Scientific and Clinical Center of Specialized Types of Medical Care and Medical Technologies of the Federal Medical and Biological Agency of Russia, Moscow, Russian Federation

² Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, Russian Federation

³ European Medical Center, Moscow, Russian Federation

⁴ Pirogov Russian National Research Medical University, Moscow, Russian Federation

Phonoarthrography, vibration arthrography are non-invasive methods for assessing the condition of cartilage and the knee joint as a whole based on the sounds made by the joint movement. Acoustic sensors (accelerometers, microphones) are attached to the knee to measure the knee joint noise both in control groups (young adults and elderly subjects) and in patients with knee osteoarthropathies. Different authors propose different methods for attaching sensors, documenting and analyzing the joint sounds. The identified specific features allowed distinguishing between asymptomatic knee joints and those with osteoarthropathies. Acoustic signals were recorded and processed, and their frequency characteristics were determined and classified. The classification effectiveness correlated with the existing diagnostic tests and hence phonoarthrography and vibration arthrography can be qualified as a useful diagnostic aid.

Keywords: phonoarthrography, vibration arthrography, knee joint, gonarthrosis, osteoarthropathy.

(For citation: Akhpashev AA, Fursenko GV, Skvortsov DV, Kaurkin SN. Vibroarthrography, arthrophonography — methods for non-invasive detection of the knee cartilage damage. *Journal of Clinical Practice.* 2019;10(3):72–76. doi: 10.17816/clinpract10372–76)

ВВЕДЕНИЕ

Согласно теории трения, суставные хрящи, взаимодействуя, испытывают трение с образованием звуковых волн, распространяющихся по костной ткани [1]. Прошедшие от кости к мягким тканям звуковые волны могут быть восприняты органами чувств человека. Коленный сустав является наиболее простым для исследований суставных звуков, так как окружен малым количеством мягких тканей, что становится важным при прохождении через них звуковых волн, испытывающих изменения на границах сред различной плотности. Как правило, движения в коленных суставах происходят в пределах одной плоскости, что облегчает интерпретацию полученных звуков, снижает количество движений, необходимых для эксперимента, сокращая время исследования [1–3].

Обнаружение дефектов хряща на ранней стадии остается предметом исследований. Так, рентгеновское изображение коленного сустава позволяет лишь приблизительно оценить состояние суставного хряща, так как мягкие ткани не визуализируются, а видимое сужение суставной щели и остеофиты обычно проявляются на более поздних стадиях остеоартрита. Артроскопия коленного сустава как метод обнаружения дегенеративных изменений суставного хряща для диагностики остеоартрита применяется редко из-за инвазивности процедуры [4, 5]. Магнитно-резонансная томография, безусловно, обеспечивает высокую специфичность диагностики повреждения хряща, но, во-первых, является дорогостоящим методом, а во-вторых, имеет ограничения вследствие определенных противопоказаний и доступности [6]. Вышеперечисленные методы лучевой диагностики показывают анатомическое состояние сустава, но не могут характеризовать его функцию [7–9].

Таким образом, анализ звуковой картины движений является еще одной составляющей, которая потенциально дает возможность получить информацию о патологии суставных поверхностей исходя из анализа звуковой картины [10, 11].

ВАРИАНТЫ РЕАЛИЗАЦИИ МЕТОДА И РЕЗУЛЬТАТЫ

Известны два основных пути реализации метода — артрофонография (АФГ; регистрация и анализ звуковых колебаний) [1, 2] и виброартрография (ВАГ; регистрация вибраций, передающихся мягким тканям, окружающим сустав) [8, 11, 12].

Предполагается, что такое патологическое состояние в коленном суставе, как дегенерация суставного хряща, будет соответствовать изменениям акустических или вибрационных сигналов коленного сустава во время активного движения [12–14]. Вибрации, возникающие в коленном суставе при активных движениях, могут дать понимание состояния суставного хряща [9]. Анализ акустической информации даже с помощью обычного стетоскопа помогал в диагностике суставной патологии [15–17]. Позже с помощью микрофонов стали анализировать не только интенсивность звука, но и звуковые частоты, длину волны и качество звука [18, 19]. К. Kim и соавт. для записи сигналов использовали электростетоскоп Hanbyul Meditec (Корея), который фиксировали в проекции суставной щели при помощи руки исследователя, при этом одновременно осуществлялась запись угла сгибания коленного сустава [20].

В 1980–1990-х гг. были обнаружены соответствующие движениям акустические феномены, характерные для дегенерации суставов, в частности физиологическая пателло-фemorальная крепитация — проявление трения скольжения надколенником, производимое при скорости движения сгибания коленного сустава меньше чем 5° в сек [21]. Амплитуда пателло-фemorальной крепитации и распределение в цикле движения может быть полезным индикатором состояния хряща: так, при ухудшении состояния появляются более высокие амплитуды с большей частотой [13, 21]. В исследовании G. McCoу и соавт. [13] у пациентов с травмой мениска были выявлены сигналы, которые характеризовались большим смещением пиков, будучи самыми крупными на пострадавшей стороне, и появлялись приблизительно одинаково в каждом цикле сгибания-разгибания [10].

В 2000-х годах S. Krishnan и соавт. предложили несколько методов анализа сигналов [12] с использованием адаптивного временного анализа для отражения патологии хряща коленного сустава. Другие методы анализа включали вероятность плотности сигналов [22], радиальных базисных функций [14], спектрального анализа мощности [23], а также высокочастотные акустические феномены [24], использование мер энтропии или огибающей амплитуды [25]. Разрабатывались методы линейного прогнозирования [26, 27], исключения помех при сокращении мышц [28], анализ временной частоты [12], анализ по Фурье и статистические параметры [11, 14]. Методы анализа сигналов

позволяют дифференцировать нормальные и аномальные суставы с точностью классификации от 77,5 [12] до 91,4% [20].

Анализ сигналов ВАГ дает картину изменений хрящевой структуры сустава и синовиальной среды [11]. Обнаружение патологии коленного сустава при помощи ВАГ поможет уточнить показания к артроскопии, а также дополнить общую картину состояния коленного сустава. Метод ВАГ применяют при мониторинге функции сустава и хряща.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Для записи ВАГ акселерометры фиксируются на разных костных выступах вокруг колена [10], либо устанавливаются на поверхности кожи наружного мыщелка большеберцовой кости, а потенциометр, регистрирующий движения, — на медиальной стороне коленного сустава либо по центру надколенника [11]. В качестве варианта АФГ используют систему измерения, состоящую из 4 стетоскопов и микрофонов, фиксируемых на медиальной и латеральной частях коленного сустава, в центре надколенника на большеберцовой кости [29].

В одном из исследований пациенты находились на жестком стуле или столе, выполняя цикл сгибательно-разгибательных движений со скоростью 4 повторения за 2 сек [10, 11, 29], либо вставали и садились с временным циклом 2 сек. Анализировались звуки от 100 до 2000 Гц. Звуки от 0 до 100 Гц, издаваемые мышцами, подвергались исключению методом фильтрации [29]. Обнаружено, что изменение процедуры исследования может влиять на величину некоторых параметров вибрационного сигнала. Существенный момент — синхронная регистрация изменения угла коленного сустава, что позволяет связать определенные ВАГ-феномены с фазой движения сустава. Известно, что энергия вибрации сильно зависит от скорости движения в суставе. Однако характерная форма вибрации, отраженная пиковой частотой в гармоническом спектре сигнала, остается схожей для диапазона скорости в суставе в исследовании [10].

На сегодняшний день методы АФГ и ВАГ еще не достигли необходимой «зрелости» для повседневного клинического использования. На базе кафедры травматологии и ортопедии Академии постдипломного образования ФБГУ «ФНКЦ» ФМБА России произведено исследование звуковых явлений 338 коленных суставов, из них 16 включены в группу сравнения, 138 — в группу с хондромалицией, 138 — с гонартрозом, 46 — с пластикой

передней крестообразной связки. Дальнейшие исследования сравнительной диагностики результатов лечения остеоартроза коленного сустава показали, что изменение алгофункциональных шкал и индексов (визуальная аналоговая шкала, индекс Лекена, WOMAC) коррелирует с изменениями данных артрофонограмм: уменьшение болевого синдрома — с уменьшением эффекта крепитации при высоких значениях интегрального показателя мощности сигнала и увеличением крепитации при низких значениях (при наличии синовита). Уменьшение болевого синдрома в больном коленном суставе изменяет данные артрофонограмм контралатерального сустава: уменьшается эффект крепитации, что, вероятно, связано с функциональными изменениями — уменьшением нагрузки на здоровый сустав.

Одной из проблем является учет вариабельности в записанных сигналах, вызванных переменной характеристик сил и трущихся поверхностей во время движения [30].

ОТЕЧЕСТВЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

В России впервые анализ звуковых явлений, возникающих в коленных суставах, осуществил проф. М. Ясиновский (1954). Регистрацию сигналов проводили при помощи трех последовательно соединенных микрофонов, расположенных вокруг коленного сустава, фиксированных манжетой. Микрофоны через усилитель подключались к записывающему устройству. Визуальную оценку данных проводили при помощи монитора электронно-лучевой трубки; хранение информации осуществляли на фотобумаге. С помощью изготовленного проф. М. Ясиновским устройства определили отличия воспалительных и дегенеративно-дистрофических заболеваний от нормы.

АФГ-исследования были продолжены в Алтайском государственном медицинском университете [1, 3]. Визуализацию звуковых данных осуществляют путем отображения линейной звуковой кривой в пространстве координат времени и мощности звука, а также в виде спектра интенсивностей на различных частотах методом преобразования Фурье. Достаточно высока степень корреляции с магнитно-резонансной томографией и рентгеновским методом диагностики: артрофонография позволяет дифференцировать наличие и выраженность хондромалиции, остеоартроза, синовита коленного сустава, повреждения мениска.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методы ВАГ и АФГ являются неинвазивными и потенциально могут использоваться для получения информации о функциональных патологических изменениях в коленном суставе, а также их динамике. При этом необходимо учитывать ограничения данных методов: в ряде случаев трудно дифференцировать, какие патологические изменения хряща или других тканей коленного сустава отвечают за те или иные звуковые или вибрационные феномены. Связь между сигналами АФГ и ВАГ и субъективными симптомами должны быть уточнены в дальнейших исследованиях. Именно поэтому одной из важных частей исследования является синхронная с ВАГ или АФГ регистрация гониограмм движения в коленном суставе. Функциональные пробы с нагрузкой и без нее являются другим источником информации о состоянии сустава.

Запись звуковых сигналов в сочетании с вышеописанными техниками как с нагрузкой, так без нагрузки массой тела и записью во время движения может дать необходимую информацию, однако для этого метод должен быть стандартизирован.

Потенциально методы АФГ и ВАГ могут получить определенные преимущества перед другими, более сложными и дорогими диагностическими методами в скорости, стоимости и удобстве. В литературе выявлены определенные препятствия для успешной реализации данных методов. Кроме того, определенный скептицизм относительно надежности методов АФГ и ВАГ представляет собой значительный барьер. Будущие исследования должны определить клинические возможности данного метода.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование проведено без спонсорской поддержки.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы подтвердили отсутствие конфликта интересов, о котором необходимо сообщить.

УЧАСТИЕ АВТОРОВ

А.А. Ахпашев — проведение исследований, рецензирование статьи; Г.В. Фурсенко — проведение исследований, анализ данных и написание статьи; Д.В. Скворцов — проведение исследований, рецензирование статьи; С.Н. Кауркин — проведение исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рахмилевич А.Б., Чанцев А.В., Распопова Е.А., Коломиец А.А. Диагностическая ценность трибологического исследования коленного сустава // *Гений ортопедии*. — 2012. — №2. — С. 102–105. [Rakhmievich AB, Chantsev AV, Raspopova EA, Kolomiets AA. Diagnostic value of the knee tribologic study. *Geniy ortopedii*. 2012;(2):102–105. (In Russ).]
2. Рахмилевич А.Б., Чанцев А.В., Распопова Е.А. Возможности артрофонографии в диагностике и контроле лечения ранних стадий остеоартроза // *Врач-аспирант*. — 2010. — Т.43. — №6. — С. 45–49. [Rakhmievich AB, Chantsev AV, Raspopova EA. Possibilities arthrophonography in diagnostics and control of treatment of early stages of the osteoarthritis. *Vrach-aspirant*. 2010;43(6):45–49. (In Russ).]
3. Рахмилевич А.Б., Чанцев А.В., Распопова Е.А. и др. Роль артрофонографии коленного сустава в дифференциальной диагностике ревматоидного артрита и деформирующего остеоартроза при ранних поражениях // *Врач-аспирант*. — 2010. — Т.43. — №6.4. — С. 549–553. [Rakhmievich AB, Chantsev AV, Raspopova EA, et al. Knee joint arthrophonography in differential diagnostics of rheumatoid arthritis and the deforming osteoarthritis at early lesions. *Vrach-aspirant*. 2010;43(6.4):549–553. (In Russ).]
4. Brooks S, Morgan M. Accuracy of clinical diagnosis in knee arthroscopy. *Ann R Coll Surg Engl*. 2002;84(4):265–268. doi: 10.1308/003588402320439711.
5. Jackson RW, Abe I. The role of arthroscopy in the management of disorders of the knee. An analysis of 200 consecutive examinations. *J Bone Joint Surg Br*. 1972;54(2):310–322. doi: 10.1302/0301-620x.54b2.310.
6. Menashe L, Hirko K, Losina E, et al. The diagnostic performance of MRI in osteoarthritis: a systematic review and meta-analysis. *Osteoarthritis Cartilage*. 2012;20(1):13–21. doi: 10.1016/j.joca.2011.10.003.
7. Frank CB, Rangayyan RM, Bell GD. Analysis of knee joint sound signals for non-invasive diagnosis of cartilage pathology. *IEEE Eng Med Biol Mag*. 1990;9(1):65–68. doi: 10.1109/51.62910.
8. Krishnan S, Rangayyan RM, Bell GD, Frank CB. Auditory display of knee-joint vibration signals. *J Acoust Soc Am*. 2001;110(6):3292–3304. doi: 10.1121/1.1413995.
9. Peylan A. Direct auscultation of the joints; preliminary clinical observations. *Rheumatism*. 1953;9(4):77–81.
10. Kernohan WG, Barr DA, McCoy GF, Mollan RA. Vibration arthrometry in assessment of knee disorders: the problem of angular velocity. *J Biomed Eng*. 1991;13(1):35–38. doi: 10.1016/0141-5425(91)90041-5.
11. Rangayyan RM, Wu Y. Analysis of vibroarthrographic signals with features related to signal variability and radial-basis functions. *Ann Biomed Eng*. 2009;37(1):156–163. doi: 10.1007/s10439-008-9601-1.
12. Krishnan S, Rangayyan RM, Bell GD, Frank CB. Adaptive time-frequency analysis of knee joint vibroarthrographic signals for noninvasive screening of articular cartilage pathology. *EEE Trans Biomed Eng*. 2000;47(6):773–783. doi: 10.1109/10.844228.
13. McCoy GF, McCrea JD, Beverland DE, et al. Vibration arthrography as a diagnostic aid in diseases of the knee. A preliminary report. *J Bone Joint Surg Br*. 1987;69(2):288–293. doi: 10.1302/0301-620x.69b2.3818762.
14. Rangayyan RM, Wu YF. Screening of knee-joint vibroarthrographic signals using statistical parameters and radial basis functions. *Med Biol Eng Comput*. 2008;46(3):223–232. doi: 10.1007/s11517-007-0278-7.
15. Blodgett WE. Auscultation of the knee joint. *The Boston Medical and Surgical Journal*. 1902;146(3):63–66. doi: 10.1056/nejm190201161460304.
16. Bircher E. Zur diagnose der meniscusluxation und des meniscusabrisses. *Zentralbl Chir*. 1913;(40):1852–1857.
17. Walters CF. The value of joint auscultation. *The Lancet*. 1929;213(5514):920–921. doi: 10.1016/s0140-6736(00)79189-6.

18. Erb KH. Über die möglichkeit der registrierung von gelenkgeräuschen. *Langenbeck's Archives of Surgery*. 1933;241(11):237–245. doi: 10.1007/bf02797216.
19. Fischer H, Johnson EW. Analysis of sounds from normal and pathologic knee joints. *Arch Phys Med Rehabil*. 1961;42:233–240.
20. Kim KS, Seo JH, Kang JU, Song CG. An enhanced algorithm for knee joint sound classification using feature extraction based on time-frequency analysis. *Comput Methods Programs Biomed*. 2009;94(2):198–206. doi: 10.1016/j.cmpb.2008.12.012.
21. Jiang CC, Liu YJ, Yip KM, Wu E. Physiological patellofemoral crepitus in knee joint disorders. *Bull Hosp Jt Dis*. 1993–1995;53(4):22–26.
22. Rangayyan RM, Wu Y. Modeling and classification of knee-joint vibroarthrographic signals using probability density functions estimated with Parzen windows. *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc*. 2008;2008:2099–2102. doi: 10.1109/IEMBS.2008.4649607.
23. Rangayyan RM, Oloumi F, Wu Y, Cai S. Fractal analysis of knee-joint vibroarthrographic signals via power spectral analysis. *Biomed Signal Processing Control*. 2013;8(1):23–29. doi: 10.1016/j.bspc.2012.05.004.
24. Prior J, Mascaro B, Shark LK, et al. Analysis of high frequency acoustic emission signals as a new approach for assessing knee osteoarthritis. *Ann Rheum Dis*. 2010;69(5):929–930. doi: 10.1136/ard.2009.112599.
25. Wu Y, Chen P, Luo X, et al. Quantification of knee vibroarthrographic signal irregularity associated with patellofemoral joint cartilage pathology based on entropy and envelope amplitude measures. *Comput Methods Programs Biomed*. 2016;130:1–12. doi: 10.1016/j.cmpb.2016.03.021.
26. Moussavi ZM, Rangayyan RM, Bell GD, et al. Screening of vibroarthrographic signals via adaptive segmentation and linear prediction modeling. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*. 1996;43(1):15–23. doi: 10.1109/10.477697.
27. Tavathia S, Rangayyan RM, Frank CB, et al. Analysis of knee vibration signals using linear prediction. *IEEE Trans Biomed Eng*. 1992;39(9):959–970. doi: 10.1109/10.256430.
28. Zhang YT, Rangayyan RM, Frank CB, Bell GD. Adaptive cancellation of muscle contraction interference in vibroarthrographic signals. *IEEE Trans Biomed Eng*. 1994;41(2):181–191. doi: 10.1109/10.284929.
29. Ota S, Ando A, Tozawa Y, et al. Preliminary study of optimal measurement location on vibroarthrography for classification of patients with knee osteoarthritis. *J Phys Ther Sci*. 2016;28(10):2904–2908. doi: 10.1589/jpts.28.2904.
30. Abbott SC, Cole MD. Vibration arthrometry: a critical review. *Crit Rev Biomed Eng*. 2013;41(3):223–242. doi: 10.1615/critrevbiomedeng.2014010061.

КОНТАКТНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Ахпашев Александр Анатольевич

канд. мед. наук, зав. кафедрой травматологии и ортопедии Академии постдипломного образования ФГБУ «Федеральный научно-клинический центр специализированных видов медицинской помощи и медицинских технологий России»; доцент кафедры травматологии и ортопедии Медицинского института ФGAOY BO «Российский университет дружбы народов»;

адрес: 115682, Москва, Ореховый бульвар, д. 28, **e-mail:** akhpashev@gmail.com, **SPIN-код:** 9965-1828

Фурсенко Глеб Владиславович

травматолог-ортопед центра медицинской реабилитации АО «Европейский медицинский центр»; **e-mail:** dr.fursenko@gmail.com

Скворцов Дмитрий Владимирович

д-р мед. наук, профессор кафедры реабилитации, спортивной медицины и физической культуры педиатрического факультета ФГБОУ ВО «Российский национальный исследовательский медицинский университет им. Н.И. Пирогова» Минздрава России; руководитель центра спортивной медицины и реабилитации ФГБУ «Федеральный научно-клинический центр специализированных видов медицинской помощи и медицинских технологий» ФМБА России;

e-mail: skvortsov.biom@gmail.com

Кауркин Сергей Николаевич

научный сотрудник центра спортивной медицины и реабилитации ФГБУ «Федеральный научно-клинический центр специализированных видов медицинской помощи и медицинских технологий» ФМБА России