

УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ЭЛАСТОГРАФИЯ СДВИГОВОЙ ВОЛНЫ В ОЦЕНКЕ ЖЁСТКОСТИ КОСТНОЙ МОЗОЛИ

Кормилина А.Р., Тухбатуллин М.Г.

Цель исследования. Изучение возможностей ультразвуковой эластографии сдвиговой волны (УЭСВ) в контроле за формированием костной мозоли на разных сроках ее развития.

Материалы и методы. Проведено исследование 51 пациентов (29 мужчин, 22 женщины от 17 до 65 лет) с переломами длинных трубчатых костей верхних и нижних конечностей. Ультразвуковые исследования выполнялись на аппарате SuperSonic Aixplorer (Франция) с оценкой жёсткости тканей в кПа и использованием мультиточечных датчиков 2-15 МГц. В зоне перелома сканировали костную мозоль, окружающие мягкие ткани и сосуды, исключали интерпозицию. Формирование жёсткости костной мозоли изучали на разных сроках ее развития: от 0-7 дней до 6 месяцев.

Результаты. По данным УЭСВ наиболее интенсивное нарастание жёсткости костной мозоли происходит в первые 1,5 месяца после перелома, далее нарастание жёсткости костной мозоли происходит более медленными темпами. Для каждой стадии формирования костной мозоли определяли чувствительность, специфичность метода УЭСВ.

Обсуждение. Использование метода УЭСВ для контроля формирования костной мозоли возможно с первых дней после перелома костей. Жесткость костной мозоли при УЭСВ определяется в кПа. УЗИ также позволяет изучать состояние костных отломков, окружающих тканей и сосудов. Проведение УЗИ с применением УЭСВ, доплерографии позволяет в динамике проследить образование костной мозоли во всех трех стадиях ее развития.

Заключение. УЭСВ позволяет определить жесткость костной мозоли в динамике, начиная с первых дней после перелома и до полного ее формирования. УЭСВ реализует новый подход оценки жесткости костной мозоли, что позволяет получить точные количественные результаты в режиме реального времени. Чувствительность и специфичность УЭСВ в определении жесткости костной мозоли наиболее высока в первой – соединительнотканной стадии ее формирования (94% и 90% соответственно).

Ключевые слова: ультразвуковая эластография сдвиговой волны, костная мозоль, жесткость костной мозоли.

Контактный автор: Кормилина А.Р., e-mail: kormilinaalsu@gmail.com

Для цитирования: Кормилина А.Р., Тухбатуллин М.Г. Ультразвуковая эластография сдвиговой волны в оценке жёсткости костной мозоли. REJR 2020; 10(2):122-128. DOI:10.21569/2222-7415-2020-10-2-122-128.

Статья получена: 13.05.20

Статья принята: 19.06.20

ULTRASONIC SHEAR WAVE ELASTOGRAPHY IN THE ASSESSMENT OF BONE CALLUS STIFFNESS

Kormilina A.R., Tuxhatullin M.G.

Purpose. Exploring the possibilities of Ultrasonic Shear Wave Elastography (SWE) in controlling the formation of bone calluses at different stages of its development.

Material and methods. A study of 51 patients (29 men, 22 women from 17 to 65 years) with fractures of long tubular bones of the upper and lower limbs was conducted. Ultrasound tests were performed on the SuperSonic Aixplorer (France) device with an assess-

Казанская государственная медицинская академия – филиал ФГБОУ ДПО «Российская медицинская академия непрерывного профессионального образования» Минздрава России. г. Казань, Россия.

Kazan State Medical Academy, Branch Campus of Russian Medical Academy of Continuing Professional Education. Kazan, Russia.

ment of tissue stiffness in the kPa and the use of multifrequency probes 2-15 MHz. In the area of the fracture scanned bone corn, surrounding soft tissues and vessels, excluded interposition. The formation of bone calluses was studied at different stages of its development, from 0-7 days to 6 months.

Results. According to the SWE, the most intensive increase in bone calluses is in the first 1.5 months after the fracture, followed by the build-up of bone calluses. For each stage of bone callus formation determined sensitivity, specificity of the method of SWE.

Discussion. The use of the SWE method to control the formation of bone calluses is possible from the first days after bone fracture. The stiffness of bone calluses at SWE is determined in the kPa. Ultrasound also allows you to study the condition of bone fragments, surrounding tissues and vessels. Conducting ultrasound with the use of SWE, dopplerography allows in dynamics to trace the formation of bone calluses in all three stages of its development.

Conclusion. SWE wave allows to determine the stiffness of the bone calluses in the dynamics, starting from the first days after the fracture and to its complete formation. SWE implements a new approach to assess the stiffness of bone calluses, which allows to get accurate quantitative results in real time. The sensitivity and specificity of the SWE in determining the stiffness of bone calluses is highest in the first – connective tissue stage of its formation (94% and 90% respectively).

Keywords: Ultrasonic Shear Wave Elastography (SWE), Bone Callus, Callus Stiffness.

Corresponding author: Kormilina A.R., e-mail: kormilinaalsu@gmail.com

For citation: Kormilina A.R., Tukhbatullin M.G. Ultrasonic shear wave elastography in the assessment of bone callus stiffness. REJR 2020; 10(2):122-128. DOI:10.21569/2222-7415-2020-10-2-122-128.

Received: 13.05.20

Accepted: 19.06.20

При переломах костей актуальным является своевременное и правильное формирование костной мозоли. Контроль за состоянием костных отломков и костной мозоли осуществляется рентгенологическими методами (рентгенография, рентгеновская денситометрия, РКТ), которые выявляют минеральную плотность костей и костной мозоли [1, 2]. Выделяют три стадии формирования костной мозоли: 1. соединительнотканная – формируется в течение 7-12 дней после перелома; 2. остеоидная – которая формируется в течение 12-20 дней после перелома; 3. костная – которая начинает формироваться с 20-22 дня после перелома и может продолжаться до 6 месяцев и более. Рентгенологически четкие признаки костной мозоли проявляются лишь с началом обызвествления мозоли. Таким образом, в течение 2-3 недель после перелома не всегда удается детально контролировать формирование костной мозоли и, соответственно, корректировать тактику ведения пациента. Нормальной жесткости костная мозоль достигает в течение 2-6 месяцев, в зависимости какая кость, какой возраст пациента и характер перелома. [3, 4]. Ультразвуковая эластография сдвиговой волны (УЭСВ) метод, который позволяет определить жесткость тканей. Данный ме-

тод широко применяется в клинике для исследования внутренних и поверхностно расположенных органов [5, 6, 7]. УЭСВ не имеет лучевую нагрузку, что очень важно при необходимости многократных исследований. В доступных источниках литературы нет данных об исследованиях жесткости костной мозоли методом УЭСВ на разных сроках ее формирования после перелома длинных трубчатых костей, в том числе и на ранних сроках, начиная с 0-7 дня после перелома.

Цель исследования.

Изучение возможностей ультразвуковой эластографии сдвиговой волны (УЭСВ) в контроле за формированием костной мозоли на разных сроках ее развития.

Материалы и методы.

С 1 февраля 2019 г. по 28 марта 2020 г. в ГАУЗ РКБ МЗ РТ (Казань) было проведено исследование 51 пациентов (29 мужчин, 22 женщины от 17 до 65 лет) с переломами длинных трубчатых костей верхних и нижних конечностей на разных сроках: от 0-7 дней, 7-12 дней, 3-4 недели, от 1-го до 6 месяцев. Исследования проводили на ультразвуковом сканере SuperSonic Aixplorer (Франция) способного создавать сдвиговые волны, оценивать жесткость тканей в килопаскалях (кПа) и измерять скорость их распространения (м/с) с использова-

нием мультисекундных датчиков частотой 2-15 МГц. Режимы сканирования: В-режим, доплерография, ультразвуковая эластография сдвиговой волны. В зоне перелома последовательно сканировали: позицию костных отломков, мягкие ткани, сосуды, исключали интерпозицию между отломками и формирование «ложного» сустава, определяли жесткость костной мозоли. Методика УЭСВ зоны перелома заключается в следующем. Вначале проводится активное полипозиционное сканирование, затем, после определения границ костных отломков и мозоли, а также состояния окружающих тканей в разных режимах (серая шкала и доплерография), включается режим УЭСВ и далее программа «мышечно-скелетная система», чтобы изучить жесткость костной мозоли. Участки различной жесткости будут картироваться разными цветами, что отражается на цветной шкале в мониторе. Жесткие ткани («Hard» – жесткий) на мониторе данного ультразвукового аппарата окрашиваются в красные тона, мягко-эластичные участки («Soft» – мягкий) – в синие тона. Таким образом можно определить участки различной жесткости костной мозоли качественно. Для количественной оценки жесткости костной мозоли в зону интереса подводится один или несколько контрольных объемов, свободно перемещаемых и изменяемых по размерам, после чего на мониторе будут отображены количественные показатели жесткости в кПа. На рисунках 1 - 3 представлена зона перелома правой плечевой кости пациента М., 53 лет, на 7-й день после операции фиксации костных отломков. Жесткость костной мозоли определяли в трех точках: по двум краям и в середине, с выведением средней величины. Измерения проводились трехкратно, после чего определяли среднюю величину жесткости костной мозоли из трех измерений в кПа. Периодичность УЭСВ зоны перелома была еженедельной.

Результаты.

Исследования показали, что в зависимости от вида кости и степени нагрузки на нее, а также в зависимости от возраста, в норме жесткость трубчатых костей составляет 300-550 кПа. Например, большеберцовая кость имеет жесткость до 480-520 кПа, малоберцовая кость – до 400-450 кПа, лучевая кость – до 300-360 кПа. Результаты ультразвуковых исследований, включая УЭСВ, проведенные для определения жесткости костной мозоли на ранних сроках после перелома, были представлены на клиническом примере пациента М., 53 лет, после операции по поводу перелома правой плечевой кости (рис. 1 - 3). Соединительнотканная мозоль начинает формироваться в виде «облачка» с 7-12 дня после перелома (на данном примере 7-й день после перелома). Разные стандартные ре-

жимы ультразвукового исследования позволяют четко определить границы костных отломков, формирующуюся мозоль и состояние окружающих тканей. В режиме доплерографии визуализируются единичные сосуды вокруг мозоли. УЭСВ показывает, что жесткость мозоли на данном сроке составляет 56,3 кПа.

Дальнейшее формирование жесткости костной мозоли представлено на клиническом примере пациентки Н., 60 лет, после закрытого перелома обеих костей левой голени и операции интрамедуллярного блокируемого остеосинтеза. УЗИ в динамике показывает, что по мере формирования костной мозоли большеберцовой кости васкуляризация в данном участке интенсивно увеличивается и достигает максимума по количеству сосудов на единицу площади к 2 месяцам после перелома (рис. 4, 5).

Спустя 4 месяца после перелома количество сосудов в зоне перелома большеберцовой кости уменьшилось более чем в 2 раза на единицу площади. Костная мозоль приобрела более четкие контуры и жесткость ее достигла до 491,2 кПа, что близко к норме (рис. 6, 7).

На рисунке 10 представлено графическое изображение нарастания жесткости костной мозоли большеберцовой кости в динамике после перелома у пациентки Н., 60 лет.

Наиболее интенсивное нарастание жесткости костной мозоли наблюдалось в первые 1,5 месяца после перелома, далее нарастание жесткости костной мозоли происходит более медленными темпами.

Для каждой стадии формирования костной мозоли определяли чувствительность, специфичность метода УЭСВ путем использования четырехпольной таблицы. За основной критерий взят динамический признак – нарастание жесткости костной мозоли (табл. №1, №2).

Обсуждение.

Созревание костной мозоли трубчатых костей начинается формироваться с 7-12 дня после перелома. Рентгенологически костная мозоль начинает четко визуализироваться с началом ее обызвествления, спустя 2,5-3 недели после перелома, то есть определяется минеральная плотность мозоли. УЭСВ предусматривает использование другого физического явления – применение поперечных ультразвуковых волн, которые, путем использования датчиков ультразвуковых аппаратов, работающих в режиме ультразвуковой эластографии сдвиговой волны, возникают в определенной – заданной глубине тканей. Чем жестче ткань, тем выше скорость распространения ультразвуковых волн. Скорость, с которой происходит распространение поперечных сдвиговых волн, является физической основой для метода УЭСВ. В основе метода лежит уравнение: $E = 3 \cdot \rho \cdot C^2$; где E – модуль упругости Юнга (кПа), C – скорость сдви-

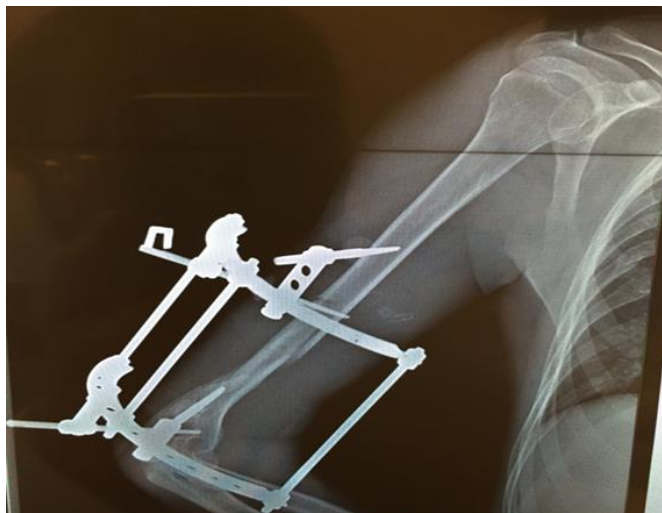


Рис. 1 (Fig. 1)

Рис. 1. Рентгенограмма.

Пациент М., 53 лет, после фиксации костных отломков правой плечевой кости. 7-й день после операции, костная мозоль не визуализируется.

Fig. 1. X-ray.

Patient M., 53 years old, after fixing bone fragments of the right humerus. On the 7th day after surgery, the bone callus is not visualized.



Рис. 2 (Fig. 2)

Рис. 2. Эхограмма, режим доплерографии.

Пациент М., 53 лет, 7-й день после операции фиксации костных отломков правой плечевой кости. Четко визуализируется соединительнотканная костная мозоль в виде «облачка» с единичными сосудами.

Fig. 2. Echogram, dopplerography mode.

Patient M., 53 years. 7th day after surgery fixing bone fragments of the right humerus. The connective bone callus in the form of "cloud" with single vessels is clearly visualized.



Рис. 3 (Fig. 3)

Рис. 3. Эластограмма.

Пациент М., 53 лет, после фиксации костных отломков правой плечевой кости. 7-й день после операции, костная мозоль не визуализируется.

Fig. 3. Elastogram.

Patient M., 53 years old. 7th day after surgery fixing bone fragments of the right humerus. The stiffness of the connective callus is 56.3 kPa.

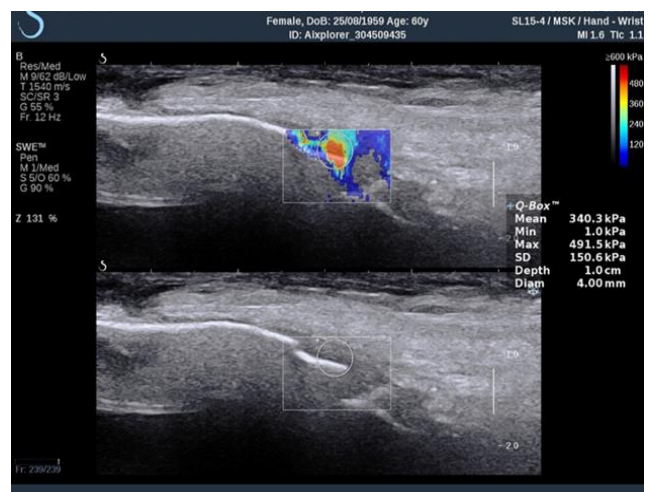


Рис. 4 (Fig. 4)

Рис. 4. Эластограмма.

Пациентка Н., 60 лет. Зона перелома левой большеберцовой кости через 2 месяца в режиме УЭСВ. Жёсткость костной мозоли 340,3 кПа.

Fig. 4. Elastogram.

Patient N., 60 years old. The fracture zone of the left tibia after 2 months in the mode of SWE. Bone callus stiffness is 340.3 kPa.

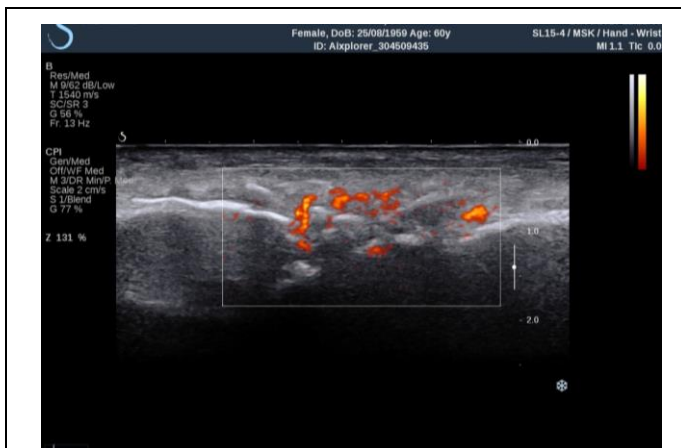


Рис. 5 (Fig. 5)

Рис. 5. Эхограмма, режим энергодопплерографии.

Пациентка Н., 60 лет. Зона перелома левой большеберцовой кости через 2 месяца. Хорошая васкуляризация в зоне костной мозоли.

Fig. 5. Echogram, energy dopplerography mode.

Patient N., 60 years old. The fracture zone of the left tibia after 2 months in the mode of energy dopplerography. Good vascularization in the bone callus area.



Рис. 6 (Fig. 6)

Рис. 6. Эхограмма, режим энергодопплерографии.

Пациентка Н., 60 лет. Зона перелома левой большеберцовой кости через 4 месяца. Количество сосудов в зоне костной мозоли значительно уменьшилось на фоне увеличения жесткости костной мозоли.

Fig. 6. Echogram, energy dopplerography mode.

Patient N., 60 years old. The fracture zone of the left tibia after 4 months in the mode of energy dopplerography. The number of vessels in the bone calluses area has significantly decreased against the background of increased bone calluses stiffness.

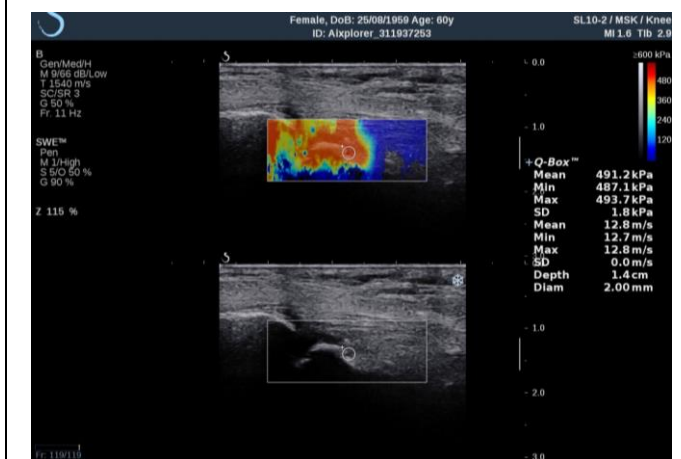


Рис. 7 (Fig. 7)

Рис. 7. Эластограмма, режим УЭСВ.

Пациентка Н., 60 лет. Зона перелома левой большеберцовой кости через 4 месяца. Жесткость костной мозоли 491,2 кПа.

Fig. 7. Elastogram, SWE mode.

Patient N., 60 years old. The fracture zone of the left tibia after 4 months in the mode of SWE. Bone callus stiffness is 491.2 kPa.

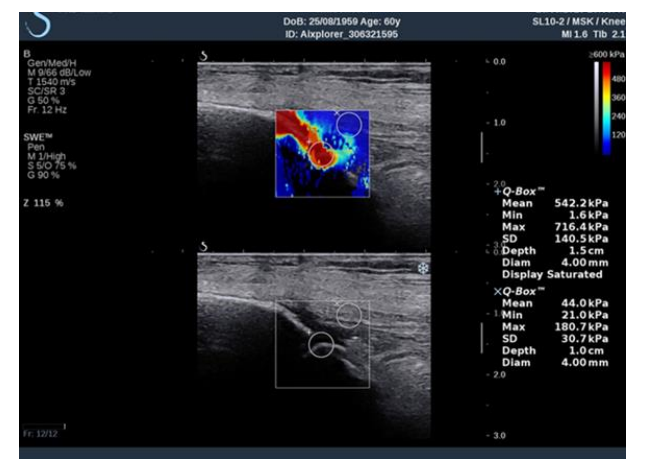


Рис. 8 (Fig. 8)

Рис. 8. Эластограмма, режим УЭСВ.

Пациентка Н., 60 лет. Зона перелома левой большеберцовой кости через 5 месяцев. Жесткость костной мозоли 542,2 кПа (норма), жесткость мягких тканей 44 кПа (норма).

Fig. 8. Elastogram, SWE mode.

Patient N., 60 years old. The fracture zone of the left tibia after 5 months in the mode of SWE. Bone callus stiffness is 542.2 kPa (normal), soft tissue stiffness is 44 kPa (normal).

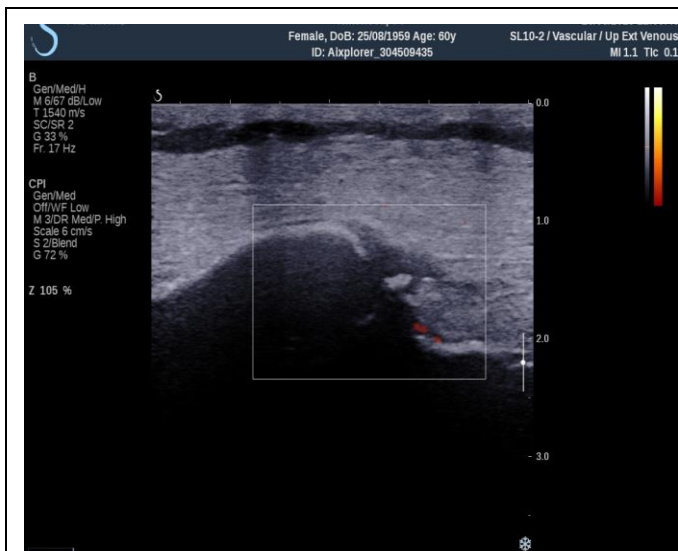


Рис. 9 (Fig. 9)

Рис. 9. Эхограмма, режим энергодопплерографии.

Пациентка Н., 60 лет. Зона перелома левой большеберцовой кости через 5 месяцев. Единичные сосуды в зоне костной мозоли.

Fig. 9. Echogram, energy dopplerography mode.

Patient N., 60 years old. The fracture zone of the left tibia after 5 months in the mode of energy dopplerography. Single vessels in the bone calluses area.

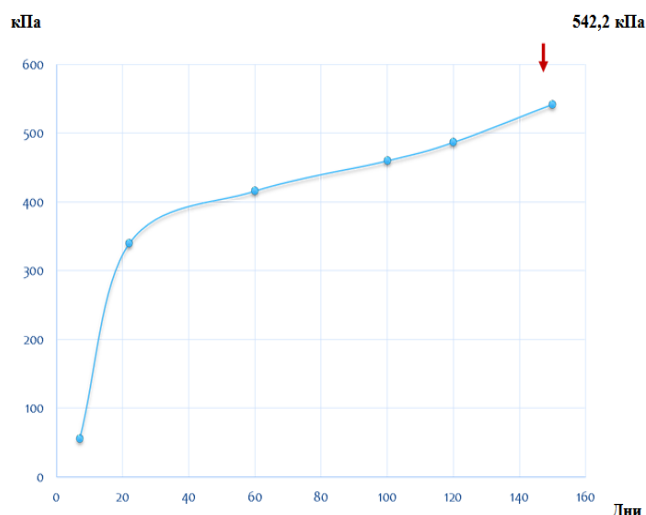


Рис. 10 (Fig. 10)

Рис. 10. График.

Изображение повышения жесткости костной мозоли левой большеберцовой кости у пациентки Н., 60 лет, на разных сроках ее формирования. По вертикальной оси представлена жёсткость костной мозоли в кПа, по горизонтальной оси – дни после перелома.

Fig. 10. Diagram.

Schedule of increasing the stiffness of bone calluses of the left tibia in patient N., 60 years, at different terms of its formation. On the vertical axis is the rigidity of bone calluses in the kPa, on the horizontal axis – days after the fracture.

Таблица №1. Четырехполюсная таблица диагностической значимости УЭСВ при определении жесткости костной мозоли.

	Есть нарастание жесткости костной мозоли	Нет нарастания жесткости костной мозоли	Всего
УЭСВ +	ИП	ЛП	
УЭСВ -	ЛО	ИО	
Всего			

ИП – истинно положительные; ЛО – ложно-отрицательные; ЛП – ложно-положительные; ИО – истинно отрицательные.

Чувствительность = $\text{ИП} / (\text{ИП} + \text{ЛО})$; Специфичность = $\text{ИО} / (\text{ИО} + \text{ЛП})$.

Таблица №2. Чувствительность и специфичность УЭСВ для стадий костной мозоли.

	Соединительнотканная стадия	Остеоидная стадия	Костная стадия
Чувствительность	94%	88%	84%
Специфичность	90%	86%	92%

говой волны (м/с), ρ – плотность вещества (кг/м³). Использование метода УЭСВ для контроля формирования костной мозоли возможно с первых дней после перелома костей, исследования можно проводить многократно, в амбулаторных и стационарных условиях. Жесткость костной мозоли при УЭСВ определяется в кПа. УЗИ также позволяет изучать состояние костных отломков, окружающих тканей и сосудов. Наличие металлической конструкции и гипсовой повязки не является препятствием для проведения УЗИ зоны перелома. Проведение УЗИ с применением УЭСВ, доплерографии позволяет в динамике проследить образование костной мозоли во всех трех стадиях ее развития.

Заключение.

Ультразвуковая эластография сдвиговой волны позволяет определить жесткость костной мозоли в динамике, начиная с первых дней после перелома трубчатых костей и до полного ее

формирования. УЭСВ реализует новый подход оценки жесткости костной мозоли, что позволяет получить точные количественные результаты в режиме реального времени. Чувствительность и специфичность УЭСВ в определении жесткости костной мозоли наиболее высоки в первой – соединительнотканной стадии ее формирования (94% и 90% соответственно). В третьей – костной стадии формирования мозоли – чувствительность составляет 84%. Как дополнительный метод, УЭСВ может применяться в амбулаторных и стационарных условиях для контроля за формированием костной мозоли.

Источник финансирования и конфликт интересов.

Авторы данной статьи подтвердили отсутствие финансовой поддержки исследования и конфликта интересов, о которых необходимо сообщить.

Список Литературы:

1. Дьячкова Г.В., Степанов Р.В., Суходолова Л.В., Бойчук С.П., Хубаев Н.Д., Обанина Н.Ф. Анализ репаративного остеобразования при лечении больных с переломами длинных костей по данным компьютерной томографии и двухэнергетической рентгеновской абсорбциометрии. Вестник новых медицинских технологий. 2007; (10). 1: 127-132.
2. Дуглас С. Катц, Кевин Р. Мас, Стюарт А. Гроскин. Секреты рентгенологии. Пер. с англ. Под ред. И.И.Семенова. М., Бином. СПб., Диалект, 2003. 704 с.
3. Рожковская В.В., Алешкевич А.И., Сергеева И.И., Тихомирова Т.Ф., Алесина Г.А. Лучевое исследование костно-суставного аппарата. Минск, 2015. 80 с.

4. Труфанов Г.Е. Лучевая диагностика. М., ГЭОТАР-Медиа, 2007. 412 с.
5. Хилл К. Применение ультразвука в медицине: Физические основы. 1989. 568 с.
6. Зыкин Б.И., Постнова Н.А., Медведев М.Е. Эластография: анатомия метода. Променевадиагностика, променеватерапия. 2012; 2-3: 107-113.
7. Тухбатуллин М.Г., Янгуразова А.Е., Галеева З.М. Ультразвуковая эластография сдвиговой волной и лабораторные показатели в диагностике и оценке эффективности лечения неалкогольной жировой болезни печени. Практическая медицина. 2018; (112) 1: 105-111.

References:

1. D'yachkova G.V., Stepanov R.V., Sukhodolova L.V., Bo'chuk S.P., Khubaev N.D., Obanina N.F. Reparative osteogenesis at the treatment in patients with long bone fracture by means of computer tomography and double energetic X-Ray absorptionmetry analysis. New Medical Technologies. 2007; (10) 1: 127-132 (in Russian).
2. Douglas S. Katz, Kevin R. Mas, Stuart A. Groskin. Radiology Secrets. Trans. from English. M., BINOM. SPb., Dialect, 2003. 704 p.
3. Rozhkovskaya V.V., Aleskevich A.I., Sergeyeva I.I., Tikhomirov A.F., Alesina G.A. Radiation study of bone and joint apparatus. Minsk, 2015. 80 p. (in Russian).

4. Trufanov G.E. Radiation diagnostics. GEOTAR-Media, 2007. 412 p. (in Russian).
5. Hill K. The use of ultrasound in medicine: Physical basis. Mir, 1989. 568 p.
6. Zykin B.I., Postnova N.A., Medvedev M.E. Elastography: anatomy of the method. Promenevadiagnostics, promenevatherapy. 2012; 2-3: 107-113 (in Russian).
7. Tukhbatullin M.G., Yangurazova A.E., Galeeva Z.M. Ultrasonic shear wave elastography and laboratory indicators in diagnosing and evaluating the effectiveness of nonalcoholic fatty liver disease treatment. Practical Medicine. 2018; (112) 1: 105-111 (in Russian).