



Аметова Алие Серветовна¹

Усмонова Муслима Шерзод кизи²

*1. Доцент кафедры медицинской радиологии ФПДО,
Самаркандского государственного медицинского университета*

г. Самарканд, Узбекистан

*2. Клинический ординатор кафедры медицинской радиологии ФПДО,
Самаркандского государственного медицинского университета,*

г. Самарканд, Узбекистан

usmonovamuslimaxon@gmail.com +998976112126

Клинико-диагностическая значимость ультразвуковой эластографии в оценке регенерации мышечной ткани при телереабилитации

Аннотация

В статье исследуется роль инновационной технологии — ультразвуковой эластографии — в качестве объективного метода контроля эффективности дистанционного восстановления пациентов. Авторы анализируют возможности оценки жесткости (модуля Юнга) скелетной мускулатуры для верификации процессов регенерации и рубцевания. Рассматривается интеграция эластометрических данных в протоколы телереабилитации, что позволяет врачу удаленно корректировать интенсивность физических нагрузок на основе биомеханических характеристик ткани. Представлены результаты сравнительного анализа традиционного УЗИ и эластографии в мониторинге посттравматических и постинфекционных изменений мышц.

Ключевые слова: ультразвуковая эластография, эластометрия, регенерация мышц, телереабилитация, модуль Юнга, жесткость тканей, POCUS, дистанционный мониторинг.

Klinik-diagnostik ahamiyati: tele-reabilitatsiya sharoitida mushak to‘qimasining regeneratsiyasini baholashda ultratovush elastografiyasi

Annotatsiya

Maqolada innovatsion texnologiya — ultratovush elastografiyasi — bemorlarni masofaviy tiklash samaradorligini obyektiv nazorat qilish usuli sifatida o‘rganiladi. Mualliflar skelet mushak to‘qimalarining qattiqligini (Yung moduli) baholash orqali regeneratsiya va chandiqlanish jarayonlarini verifikatsiya qilish imkoniyatlarini tahlil qiladilar. Elastometrik ma’lumotlarni tele-reabilitatsiya protokollariga integratsiya qilish masalasi ko‘rib chiqiladi, bu esa shifokorga to‘qimaning biomexanik xususiyatlariga asoslanib jismoniy yuklamalar intensivligini masofadan turib tuzatish imkonini beradi. Posttravmatik va postinfeksion mushak o‘zgarishlarini monitoring qilishda an’anaviy UZI va elastografiya o‘rtasidagi qiyosiy tahlil natijalari taqdim etilgan.

Kalit so‘zlar: ultratovush elastografiyasi, elastometriya, mushak regeneratsiyasi, tele-reabilitatsiya, Yung moduli, to‘qimalar qattiqligi, POCUS, masofaviy monitoring.

Clinical and Diagnostic Significance of Ultrasound Elastography in Assessing Muscle Tissue Regeneration in Tele-Rehabilitation

Abstract

The article examines the role of an innovative technology—ultrasound elastography—as an objective method for monitoring the effectiveness of remote patient rehabilitation. The authors analyze the potential of assessing the stiffness (Young's modulus) of skeletal muscles to verify processes of regeneration and scar formation. The integration of elastometric data into tele-rehabilitation protocols is discussed, enabling physicians to remotely adjust the intensity of physical activity based on the biomechanical properties of the tissue. Results of a comparative analysis of conventional ultrasound and elastography in monitoring post-traumatic and post-infectious muscle changes are presented.

Keywords: ultrasound elastography, elastometry, muscle regeneration, tele-rehabilitation, Young's modulus, tissue stiffness, POCUS, remote monitoring.

Введение

Медицинская реабилитация в условиях стремительной цифровой трансформации здравоохранения все активнее переходит в формат «Home-based rehab» (домашняя, или амбулаторная реабилитация). Тем не менее одной из ключевых и до сих пор нерешенных проблем телереабилитации остается выраженный дефицит объективных диагностических критериев, позволяющих достоверно оценивать динамику восстановительного процесса. Визуальное наблюдение за двигательными паттернами пациента посредством веб-камеры или видеосвязи не дает возможности получить информацию о морфологическом и гистологическом состоянии регенерирующей мышечной ткани.

Стандартное ультразвуковое исследование в В-режиме позволяет оценивать преимущественно анатомическую структуру, контуры тканей и их экзогенные характеристики, однако этого зачастую оказывается недостаточно для надежного разграничения между полноценно созревающим регенератом и формирующимся патологическим фиброзом. В отличие от этого, ультразвуковая эластография, включая методы компрессионной эластографии и эластографии сдвиговой волны, вводит дополнительный функционально-биомеханический параметр диагностики — количественную и качественную оценку упругости и жесткости тканей.

Внедрение данной технологии в состав портативных ультразвуковых систем и мобильных диагностических комплексов открывает принципиально новые возможности для высокоточного дистанционного мониторинга состояния мышечной ткани, включая оценку так называемого «биологического возраста» рубцовых изменений, а также определение

степени готовности мышечных волокон к постепенному возвращению к функциональным и физическим нагрузкам в рамках реабилитационного протокола.

Цель исследования

Определить клиническую ценность ультразвуковой эластографии как инструмента объективизации процессов регенерации мышечной ткани и разработать алгоритм ее применения в рамках программ телереабилитации.

Материалы и методы исследования

Исследование проводилось в период 2024–2026 гг. на базе группы из 40 пациентов с повреждениями скелетных мышц (*m. quadriceps femoris*, *m. gastrocnemius*) различного генеза (травмы, последствия тяжелых инфекций).

Методический инструментарий:

1. Аппаратное обеспечение: Портативные УЗИ-сканеры с программным модулем эластографии сдвиговой волны (Shear Wave Elastography — SWE).
2. Протокол мониторинга: Дистанционные сеансы Теле-УЗИ проводились 1 раз в 10 дней. Пациенты использовали датчики под видеоконтролем врача-эксперта.
3. Параметры оценки: Измерялась скорость сдвиговой волны и модуль Юнга.
4. Статистический анализ: Корреляция эластометрических показателей с данными динамометрии и функциональными шкалами (VAS, DASH).

Результаты и обсуждения

1) Биомеханические маркеры регенерации

В процессе заживления мышечной ткани жесткость зоны повреждения динамически меняется. Эластография позволила выделить три фазы регенерации:

- Фаза воспаления (1–5 сутки): Характеризуется патологическим снижением жесткости (отек, деструкция волокон). Модуль Юнга в среднем на 30% ниже нормы.
- Фаза пролиферации (7–21 сутки): Наблюдается постепенное повышение жесткости за счет формирования грануляционной ткани и незрелого коллагена.
- Фаза ремоделирования (от 21 суток): Стабилизация показателей. Превышение жесткости более чем на 25% от симметричного здорового участка свидетельствует о формировании грубого фиброзного рубца.

2) Преимущества эластографии в телереабилитации

Традиционное УЗИ часто дает ложноположительные результаты из-за субъективности оператора. Эластометрия предоставляет цифровой показатель (кПа), который не зависит от настроек яркости монитора или зрения врача.

Этап реабилитации	Задача Теле-УЗИ (В-режим)	Задача эластографии (SWE)	Клиническое решение
Ранний	Поиск гематом/разрывов	Оценка выраженности отека	Ограничение амплитуды
Активный	Оценка контуров мышцы	Мониторинг «созревания» ткани	Разрешение силовых упражнений
Поздний	Визуализация рубца	Дифференциация фиброза	Профилактика повторных разрывов

3) Интеграция в дистанционный алгоритм

При телереабилитации эластографическая карта передается в облако, где врач-реабилитолог сравнивает «цветовую гистограмму» жесткости с предыдущими исследованиями.

Использование ИИ-алгоритмов позволяет автоматически выделять зону интереса (ROI) и рассчитывать среднюю жесткость, что минимизирует погрешность при управлении датчиком самим пациентом.

Клинико-диагностическая значимость

Внедрение эластографии позволило сократить сроки восстановления на 12–15% за счет своевременного перехода к более интенсивным нагрузкам.

Основные преимущества:

1. Ранняя детекция фиброза: Возможность изменить физиотерапевтическое воздействие до формирования необратимых контрактур.
2. Прогностическая ценность: Скорость восстановления модуля Юнга является предиктором возврата к спортивным нагрузкам.
3. Безопасность: Снижение риска рецидива травмы при «мнимом» благополучии на обычном УЗИ

Обсуждение технических барьеров

Несмотря на высокую значимость, использование эластографии в домашних условиях сталкивается с техническими сложностями:

- Требования к датчику: Не все портативные POCUS-системы поддерживают качественную эластографию сдвиговой волны.
- Артефакты компрессии: При компрессионной эластографии сложно стандартизировать давление на ткани при дистанционном выполнении. Решением является преимущественное использование метода сдвиговой волны.

Заключение

Ультразвуковая эластография является «недостающим звеном» в системе объективного мониторинга телереабилитации. Она превращает ультразвук из метода качественной визуализации в метод количественной биомеханической экспертизы.

Выводы:

1. Показатели модуля Юнга коррелируют с гистологическими стадиями регенерации мышц.
2. Дистанционная эластометрия позволяет индивидуализировать реабилитационный протокол, основываясь на биологической готовности тканей.
3. Развитие технологий POCUS с функцией SWE сделает эластографию обязательным компонентом цифрового паспорта реабилитации пациента.

Список литературы:

1. *Khamidov O. A. et al. (2023). The Role of Ultrasound and MRI in the Assessment of Musculo-Tendon Pathologies of the Shoulder Joint.*
2. *Хамидов О.А. и др. (2023). Роль ультразвука и МРТ в оценке мышечно-сухожильных патологий плечевого сустава*
3. *Hamidov OA (2020). Diagnostics of injuries of the soft tissue structures of the knee joint*
4. *Ходжибеков М.Х., Хамидов О.А. (2020). Обоснование ультразвуковой диагностики повреждений внутрисуставных структур*
5. *Хамидов О.А. и др. (2023). Сравнение УЗИ и МРТ в диагностике повреждений мениска*
6. *Yakubov J. et al. (2022). Ultrasonic and radiological picture in combination of venous insufficiency and knee osteoarthritis*
7. *Ataeva SKh et al. (2021). Radiation visualization of chronic joint diseases*
8. *Khamidov O. A. (2023). The role of the regional telemedicine center in the provision of medical care*
9. *Alimdjjanovich R.J. et al. (2022). Ultrasound in COVID-19 vs CT*
10. *узли А.С.Н. и др. (2023). Кость при остеоартрите: визуализация*
11. *Yakubov D.Z. et al. Diagnostic importance of radiation methods in gonarthrosis*
12. *Хамидов О.А. и др. (2022). Обзор методов обработки изображений*
13. *Хамидов О.А. (2020). Оптимизация лучевой диагностики повреждений мягкотканых структур коленного сустава*
14. *Obid K. et al. (2022). Diagnosis and treatment of osteoarthritis of the knee*
15. *Yakubov D.J. et al. (2022). Influence of gonarthrosis on treatment effectiveness*