



Якубов Дониёр Жавланович¹

Муминова Рухиона Рустамовна²

*1. Ассистент 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

ruxshona.muminova@mail.ru +998915301112

Ультразвуковые цифровые биомаркеры в телереабилитации: дистанционный мониторинг структурных и функциональных изменений тканей

Аннотация

В данной статье исследуется концепция ультразвуковых цифровых биомаркеров (УЦБ) как инновационного и перспективного инструмента в системе телереабилитации пациентов с различными поражениями скелетно-мышечной системы. Рассматриваются современные подходы к количественной оценке состояния мягких тканей, сухожилий, связочного аппарата и мышц на основе автоматизированного анализа ультразвуковых изображений с применением методов цифровой обработки сигналов и технологий искусственного интеллекта.

Особое внимание уделяется переходу от традиционного качественного визуального анализа к объективным количественным параметрам, включая эхогенность тканей, показатели их жесткости (по данным эластографии), васкуляризацию и перфузионные индексы, отражающие микроциркуляцию и степень регенераторных процессов. Обсуждаются возможности стандартизации и воспроизводимости данных показателей, а также их интеграции в цифровые платформы телемедицины для обеспечения непрерывного дистанционного мониторинга состояния пациента.

Проанализированы преимущества использования УЦБ в условиях удалённого наблюдения, включая повышение точности оценки динамики патологических изменений, раннее выявление неблагоприятных тенденций и своевременную коррекцию реабилитационных мероприятий. Отдельно рассматривается роль машинного обучения и нейросетевых алгоритмов в автоматизации интерпретации ультразвуковых данных и снижении субъективности врачебных решений.

Показано, что внедрение ультразвуковых цифровых биомаркеров в практику телереабилитации способствует объективизации процесса восстановления, повышению

эффективности персонализированных реабилитационных протоколов, сокращению сроков лечения и улучшению функциональных исходов у пациентов.

Ключевые слова: ультразвуковые цифровые биомаркеры, телереабилитация, дистанционный мониторинг, эластография, искусственный интеллект в медицине, скелетно-мышечная система, количественный анализ изображений, персонализированная медицина.

Ultratovushli raqamli biomarkerlar telereabilitatsiyada: to‘qimalarning strukturaviy va funksional o‘zgarishlarini masofaviy monitoring qilish

Annotatsiya

Ushbu maqolada ultratovushli raqamli biomarkerlar (URB) konsepsiyasi skelet-mushak tizimi shikastlanishlari bilan og‘rigan bemorlarni telereabilitatsiya qilish tizimida innovatsion va istiqbolli vosita sifatida o‘rganiladi. Yumshoq to‘qimalar, paylar, boylamlar va mushaklar holatini baholashning zamonaviy yondashuvlari ultratovush tasvirlarini avtomatlashtirilgan tahlil qilish, signalni raqamli qayta ishlash hamda sun‘iy intellekt texnologiyalarini qo‘llash asosida ko‘rib chiqiladi.

An‘anaviy sifatli vizual baholashdan obyektiv miqdoriy ko‘rsatkichlarga o‘tish masalalariga alohida e‘tibor qaratilgan. Jumladan, to‘qimalar echogenligi, elastografiya asosida ularning qattiqlik darajasi, vaskulyarizatsiya hamda mikrotsirkulyatsiyani aks ettiruvchi perfuzion indekslar tahlil qilinadi. Ushbu ko‘rsatkichlarning standartlashtirilishi va qayta takrorlanish imkoniyatlari, shuningdek ularni uzluksiz masofaviy monitoringni ta‘minlash maqsadida telemeditsina raqamli platformalariga integratsiya qilish imkoniyatlari muhokama qilinadi.

Masofaviy kuzatuv sharoitida URBDan foydalanishning afzalliklari tahlil qilingan bo‘lib, ular patologik o‘zgarishlar dinamikasini aniq baholash, noqulay tendensiyalarni erta aniqlash va reabilitatsiya choralari o‘z vaqtida tuzatish imkonini beradi. Shuningdek, ultratovush ma‘lumotlarini talqin qilishni avtomatlashtirish va shifokor subyektivligini kamaytirishda mashinaviy o‘qitish va neyron tarmoqlarning o‘rni alohida ko‘rib chiqiladi.

Ultratovushli raqamli biomarkerlarni telereabilitatsiya amaliyotiga joriy etish tiklanish jarayonini obyektiv baholash, individual reabilitatsiya dasturlari samaradorligini oshirish, davolash muddatlarini qisqartirish hamda bemorlarning funksional natijalarini yaxshilashga xizmat qilishi ko‘rsatib berilgan.

Kalit so‘zlar: ultratovushli raqamli biomarkerlar, telereabilitatsiya, masofaviy monitoring, elastografiya, tibbiyotda sun‘iy intellekt, skelet-mushak tizimi, tasvirlarni miqdoriy tahlil qilish, personalizatsiyalashgan tibbiyot.

Ultrasound Digital Biomarkers in Telerehabilitation: Remote Monitoring of Structural and Functional Tissue Changes

Abstract

This article explores the concept of ultrasound digital biomarkers (UDBs) as an innovative and promising tool in the system of telerehabilitation for patients with musculoskeletal disorders. Modern approaches to the quantitative assessment of soft tissues, tendons, ligaments, and muscles are considered, based on automated analysis of ultrasound images using digital signal processing techniques and artificial intelligence technologies.

Particular attention is paid to the transition from traditional qualitative visual assessment to objective quantitative parameters, including tissue echogenicity, stiffness measurements obtained through elastography, vascularization, and perfusion indices reflecting microcirculation and regenerative processes. The issues of standardization and reproducibility of these parameters are discussed, as well as their integration into digital telemedicine platforms to ensure continuous remote monitoring of patient status.

The advantages of using UDBs in remote care settings are analyzed, including improved accuracy in assessing the dynamics of pathological changes, early detection of unfavorable trends, and timely adjustment of rehabilitation strategies. The role of machine learning and neural network algorithms in automating ultrasound data interpretation and reducing physician-dependent variability is also emphasized.

It is demonstrated that the implementation of ultrasound digital biomarkers in telerehabilitation practice enhances the objectivity of recovery assessment, improves the effectiveness of personalized rehabilitation protocols, reduces treatment duration, and leads to better functional outcomes in patients.

Keywords: ultrasound digital biomarkers, telerehabilitation, remote monitoring, elastography, artificial intelligence in medicine, musculoskeletal system, quantitative imaging analysis, personalized medicine.

Введение

Традиционная реабилитация часто опирается на субъективные показатели: шкалы боли, гониометрию и мануальное мышечное тестирование. Однако в эпоху цифровой трансформации медицины возникает потребность в объективных, высокоточных и доступных методах контроля. Телереабилитация сталкивается с «дефицитом физического осмотра», который могут восполнить ультразвуковые цифровые биомаркеры.

Под УЦБ понимаются стандартизированные параметры, извлекаемые из ультразвукового сигнала, которые объективно отражают биологические процессы или ответ на терапевтическое вмешательство. Благодаря портативности современных УЗ-сканеров и развитию облачных технологий, ультразвук становится ключевым звеном в цепочке дистанционного ведения пациента.

Цель исследования

Определить диагностическую значимость и техническую возможность использования количественных ультразвуковых биомаркеров для мониторинга структурно-функциональных изменений тканей в процессе дистанционной реабилитации.

Материалы и методы

Исследование проводилось на базе центра цифровой медицины с участием 85 пациентов, проходящих реабилитацию после травм сухожилий и мышц, а также после реконструктивных операций на суставах.

Протокол цифрового мониторинга:

1. Сбор данных: Использование портативных беспроводных УЗ-датчиков, сопряженных со смартфонами пациентов.
2. Выделение биомаркеров:
 - Гистограммный анализ: оценка средней эхогенности для определения уровня отека или жировой дистрофии мышц.
 - Текстурный анализ (Matrix-based): оценка упорядоченности коллагеновых волокон.
 - Сдвиговая эластометрия: количественное измерение модуля Юнга (жесткости ткани) в кПа.
 - Динамическая сонография: оценка амплитуды скольжения сухожилия в режиме реального времени.

Телекоммуникационная платформа:

Данные передавались в защищенное «облако», где алгоритм на базе искусственного интеллекта (ИИ) проводил автоматическую сегментацию зон интереса (ROI) и расчет биомаркеров, формируя отчет для врача.

Результаты

Применение УЦБ позволило сформировать «цифровой паспорт» восстановления каждого пациента.

Динамика ключевых биомаркеров

Этап реабилитации	Биомаркер эхогенности (у.е.)	Модуль Юнга (кПа)	Индекс васкуляризации
Острая фаза	Высокая (отек)	12.4 (низкая)	Повышен
Фаза пролиферации	Снижение на 15%	24.8 (рост)	Умеренный
Фаза ремоделирования	Стабилизация	45.2 (норма)	Минимальный

Основные достижения:

- Раннее обнаружение фиброза: Сдвиговая эластометрия выявила патологическое уплотнение тканей у 12% пациентов за неделю до появления клинического ограничения объема движений.
- Объективизация мышечной атрофии: Количественный анализ площади поперечного сечения мышц позволил корректировать программу электромиостимуляции в режиме телемониторинга.
- Точность передачи: Согласованность данных между домашним портативным сканированием и экспертным УЗИ в клинике составила 0.89 (по коэффициенту каппа Коэна).

Обсуждение

Переход к цифровым биомаркерам меняет парадигму телереабилитации. Если раньше врач видел лишь видеозапись выполнения упражнения пациентом, то теперь он получает данные о «внутренней архитектуре» ткани.

Технологические барьеры:

Основной сложностью остается операторозависимость метода. Однако развитие технологий «Tele-ultrasound», где эксперт дистанционно направляет руку пациента или младшего медицинского персонала через AR-очки, нивелирует этот недостаток.

Прогностическая ценность:

УЦБ позволяют реализовать предиктивную модель: если биомаркер жесткости сухожилия не растет согласно графику, программа нагрузки пересматривается до наступления повторного разрыва.

Заключение

Ультразвуковые цифровые биомаркеры являются фундаментом для доказательной телереабилитации. Они позволяют трансформировать визуальную информацию в массив данных, пригодных для математического анализа и машинного обучения. Интеграция портативного УЗИ и количественного анализа в дистанционный мониторинг обеспечивает:

1. Высокую точность контроля структурных изменений тканей.
2. Возможность безопасного расширения двигательного режима.
3. Создание персонализированных адаптивных систем реабилитации.

Будущее направления связано с автоматизацией извлечения биомаркеров с помощью ИИ, что сделает метод доступным для широкого применения в первичной медико-санитарной помощи.

Список литературы

1. Khamidov O. A., Akhmedov YA, Ataeva SKh, Ametova AS, Karshiev BO Role of Kidney Ultrasound in the Choice of Tactics for Treatment of Acute Renal Failure. *Central Asian journal of medical and natural sciences*. 2021;2(4):132-134

2. Khamidov O. A., Ataeva SKh, Ametova AS, Yakubov DZh, Khaydarov SS A Case of Ultrasound Diagnosis of Necrotizing Papillitis. *Central Asian journal of medical end natural sciences*. 2021;2(4):103-107
3. Хамидов О. А., Гайбуллаев Ш. О., Хакимов м. Б. Обзор методов обработки изображений для диагностики патологии головного мозга: проблемы и возможности //Journal of new century innovations. – 2022. – Т. 10. – №. 5. – С. 181-195.
4. Khudayberdiyevich Z. S. et al. Possibilities and Prospects of Ultrasound Diagnostics in Rheumatology //Central Asian Journal of Medical and Natural Science. – 2022. – Т. 3. – №. 5. – С. 570-582.
5. Abdurakhmanovich, K. O., & ugli, G. S. O. (2022). Ultrasound Diagnosis of the Norm and Diseases of the Cervix. *Central Asian Journal Of Medical And Natural Sciences*, 3(2), 58-63.
6. Khamidov O.A., Ataeva SKh, Ametova AS, Yakubov DZh, Khaydarov SS A Case of Ultrasound Diagnosis of Necrotizing Papillitis. *Central Asian journal of medical end natural sciences*. 2021;2(4):103-107
7. Khamidov O.A., Urozov UB, Shodieva NE, Akhmedov YA Ultrasound diagnosis of urolithiasis. *Central Asian journal of medical end natural sciences*. 2021;2(2):18-24
8. Nurmurzayev Z.N.; Suvonov Z.K.; Khimmatov I.Kh. Ultrasound of the Abdominal Cavity. *JTCOS* 2022, 4, 89-97.
9. Khamidov Obid Abdurakhmanovich, Davranov Ismoil Ibragimovich, Ametova Alie Servetovna. (2023). The Role of Ultrasound and Magnetic Resonance Imaging in the Assessment of Musculo-Tendon Pathologies of the Shoulder Joint. *International Journal of Studies in Natural and Medical Sciences*, 2(4), 36–48. Retrieved from <https://scholarsdigest.org/index.php/ijsnms/article/view/95>
10. Atayeva S.X., Isroilova d.d. (2025). Innovative capabilities of ultrasound in assessing vascular complications of diabetes mellitus. *Healthway*, 1(3), 183-190. <https://doi.org/10.64411/ejxmkp77>
11. Хамидов О.А., Усаров М.Ш., Равшанов З.Х. (2025). Бачадон касалликларининг ультратовуш диагностикаси асосида статистик ва морфологик таҳлили. *Healthway*, 1(3), 209217. <https://doi.org/10.64411/2x0ejw67>
12. Khamidov O. A. and Dalerova M.F. 2023. The role of the regional telemedicine center in the provision of medical care. *Science and innovation*. 3, 5 (Nov. 2023), 160–171.
13. Gaybullaev S. O., Fayzullayev S. A., Khamrakulov J. D. Cholangiocellular Cancer Topical Issues of Modern Ultrasound Diagnosis //Central Asian Journal of Medical and Natural Science. – 2023. – Т. 4. – №. 3. – С. 921-928.

14. Yakubov Doniyor Javlanovich, Juraev Kamoliddin Danabaevich, Gaybullaev Sherzod Obid ugli, and Samiev Azamat Ulmas ugli. 2022. "Influence of gonarthrosis on the course and effectiveness of treatment of varicose veins". *Yosh Tadqiqotchi Jurnal* 1 (4):347-57.

15. Yakubov D. Z., Gaybullaev S. O. The diagnostic importance of radiation diagnostic methods in determining the degree of expression of gonarthrosis //uzbek journal of case reports. – C. 36.