

EDN: <https://elibrary.ru/gxjria>DOI: <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2025-65-4-237-245>

УДК 612.1/.8; 613.65

© Суворов В.Г., Шитова Е.С., 2025

Суворов В.Г.^{1,2}, Шитова Е.С.¹**Физиологические аспекты развития утомления периферического нервно-мышечного аппарата и его диагностика**¹ФГБНУ «Научно-исследовательский институт медицины труда имени академика Н.Ф. Измерова», пр-т Будённого, 31, Москва, 105275;²ФГБОУ ДПО «Российская медицинская академия непрерывного профессионального образования» Минздрава России, ул. Баррикадная, 2/1, стр. 1, Москва, 125993

Введение. Заболевания опорно-двигательного аппарата от функционального перенапряжения в ответ на продолжительную интенсивную нагрузку на рабочем месте, занимают до настоящего времени одно из ведущих мест в профпатологии. Однако ряд вопросов, касающихся диагностики утомления периферического нервно-мышечного аппарата, условия его перехода в переутомление и перенапряжение требует дальнейшего изучения. В связи с разработкой концепции о вязкоупругих свойствах скелетных мышц стала возможным объективная оценка состояния периферического звена нервно-мышечного аппарата при разном уровне утомления, что позволяет уточнить механизмы развития заболеваний скелетно-мышечной системы от функционального перенапряжения.

Цель исследования — изучение динамики показателей биомеханических и вязкоупругих свойств скелетных мышц при развитии локального мышечного утомления и выяснение возможности использования этих показателей для объективной оценки состояния утомления скелетно-мышечной системы.

Материалы и методы. Для выполнения поставленной цели была обследована группа лиц в возрасте 32,5±10,6 года. Использовался прибор неинвазивной цифровой пальпации (Myoton-PRO), позволяющий определить биомеханические (тонус, жёсткость, упругость) и вязкоупругие (ползучесть и время релаксации) свойства мышц. Миотонометрические измерения проводились на мышцах локтевого и лучевого сгибателей запястья и короткой мышцы, отводящей большой палец. Данные миотонографии сопоставлялись с параметрами кистевой динамометрии. Во всех случаях проведено три серии измерений: фоновое, до ощущения субъективного утомления, и «до отказа».

Результаты. Миотонометрическое исследование выявило повышение биомеханических свойств мышц предплечья — тонуса и жёсткости и снижение вязкоупругих свойств ползучести и времени релаксации, более выраженных при переутомлении. Менее значимы изменения упругости, поскольку его параметры зависят от анатомо-структурных свойств мышцы.

Установлена положительная связь между показателями силы мышц, измеренными при динамометрии, и тонусом и жёсткостью сгибателей запястья, полученных при миотонометрии.

Ограничения исследования. Ограничения связаны с небольшой выборкой обследуемых.

Выводы. Установлено, что для наиболее объективной оценки мышечного утомления является использование комплекса показателей, включающих определение силы мышц динамометрическим методом, тонуса, жёсткости, ползучести и времени релаксации по данным миотонометрии.

Выявленные изменения свойств мышечной ткани не только расширяют наши представления о развитии утомления, но и уточняют механизмы формирования заболеваний скелетно-мышечной системы от функционального перенапряжения.

Этика. Данное исследование с участием человека в качестве субъекта осуществлено с соблюдением этических принципов, представленных в последней версии Хельсинкской декларации, разработанной Всемирной медицинской ассоциацией.

Ключевые слова: утомление; биомеханические; вязкоупругие свойства мышечной ткани; миотонометрия

Для цитирования: Суворов В.Г., Шитова Е.С. Физиологические аспекты развития утомления периферического нервно-мышечного аппарата и его диагностика. *Мед. труда и пром. экол.* 2025; 65(4): 237–245. <https://elibrary.ru/gxjria> <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2025-65-4-237-245>

Для корреспонденции: Суворов Вадим Германович, e-mail: margo-183@rambler.ru

Участие авторов:

Суворов В.Г. — концепция и дизайн исследования, анализ литературы, написание окончательного варианта статьи; Шитова Е.С. — сбор материала и обработка данных, написание предварительного варианта текста.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Конфликт интересов отсутствует.

Дата поступления: 07.04.2025 / Дата принятия к печати: 10.04.2025 / Дата публикации: 08.05.2025

Vadim G. Suvorov^{1,2}, Evgeniya S. Shitova¹**Physiological aspects of peripheral neuromuscular apparatus fatigue development and its diagnostics**¹Izmerov Research Institute of Occupation Health, 31, Budyonogo Ave, Moscow, 105275;²Russian Medical Academy of Continuing Professional Education, 2/1, 1, Barrikadnaya St, Moscow, 125993

Introduction. Diseases of the musculoskeletal system from functional overexertion in response to prolonged intense workload at the workplace, have so far occupied one of the leading places in occupational pathology. However, a number of questions regarding the diagnosis of fatigue of the peripheral neuromuscular apparatus, the conditions for its transition to overwork and overstrain require further study. In connection with the development of the concept of viscoelastic properties of skeletal muscles, it became possible to objectively assess the state of the peripheral link of the neuromuscular apparatus at different levels of fatigue, which makes it possible to clarify the mechanisms of the development of diseases of the musculoskeletal system from functional overstrain.

The study aims to explore the dynamics of indicators of biomechanical and viscoelastic properties of skeletal muscles during the development of local muscle fatigue and to find out the possibility of using these indicators for an objective assessment of the state of fatigue of the musculoskeletal system.

Results. A myotonometric study revealed an increase in the biomechanical properties of the muscles of the forearm — tone and stiffness and a decrease in the viscoelastic properties of creep and relaxation time, more pronounced during overwork. Changes in elasticity are less significant, since its parameters depend on the anatomical and structural properties of the muscle. A positive relationship was established between muscle strength measured by dynamometry and the tone and stiffness of wrist flexors obtained by myotonometry.

Limitations. Limitations relate to the small sample of subjects.

Conclusion. *It was found that for the most objective assessment of muscle fatigue, a set of indicators was used, including the determination of muscle strength by the dynamometric method, tone, rigidity, creep and relaxation time according to myotonometry. The identified changes in the properties of muscle tissue not only expand our ideas about the development of fatigue but also clarify the mechanisms of the formation of diseases of the musculoskeletal system from functional overstrain.*

Ethics. This human subject study was conducted in compliance with the ethical principles presented in the latest version of the Declaration of Helsinki developed by the World Medical Association.

Keywords: *fatigue; biomechanical; visco-elastic properties of muscular tissue; myotonometry*

For citation: Suvorov V.G., Shitova E.S. Physiological aspects of peripheral neuromuscular apparatus fatigue development and its diagnostics. *Med. truda i prom. ekol.* 2025; 65(4): 237–245. <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2025-65-4-237-245> <https://elibrary.ru/gxjria> (in Russian)

For correspondence: Vadim G. Suvorov, e-mail: margo-183@rambler.ru

Contributions:

Suvorov V.G. — study concept and design, literature analysis, writing the final version of the article;

Shitova E.S. — material acquisition and data processing, writing a preliminary version of the text.

Funding. The study had no funding.

Conflict of interest. Authors declare no conflict of interest.

Received: 07.04.2025 / Accepted: 10.04.2025 / Published: 08.05.2025

Введение. Актуальность настоящего исследования для медицины труда объясняется значительной распространённостью заболеваний скелетно-мышечной системы в ответ на продолжительную интенсивную нагрузку на рабочем месте. Так, по данным различных авторов распространённость данных заболеваний колеблется по разным регионам страны от 11 до 45% всех впервые выявленных профессиональных заболеваний, что зависит от превалирования вида труда в экономике региона, состояния медицины и технического оснащения [1–3].

Тем не менее, ряд вопросов, касающихся механизма формирования заболеваний скелетно-мышечных системы от физического перенапряжения, которое развивается на фоне предшествующего утомления, изучены недостаточно [4–6]. В настоящее время утомление рассматривается как суммарное проявление изменений, происходящих на разных уровнях нервно-мышечного аппарата, при этом ведущее звено (центральное или периферическое), которое определяет снижение работоспособности, зависит от характера мышечной деятельности и особенностей организма [7–11]. Не уменьшая важности изучения изменений, происходящих в центральных корковых структурах, в настоящем исследовании мы сосредоточили своё внимание на тех процессах, которые происходят в периферическом звене нервно-мышечной системы, т. е. на локальном мышечном утомлении.

В настоящее время в физиологии труда к традиционным методам оценки мышечного утомления относятся: динамометрия, треморометрия, измерение уровня молочной кислоты и других метаболитов в капиллярной крови, электромиография, различные виды ультразвукового исследования мышечной ткани и тестирование по специально разработанным опросникам¹. Несмотря на кажущееся многообразие, большая часть этих методик имеет ограничения при их использовании [12]. Так, результаты динамометрических тестирований и треморометрии часто зависят от общего психологического состояния индивида

и его волевых усилий в момент выполнения теста. Определение уровня молочной кислоты и других метаболитов является инвазивным и не может использоваться в качестве скрининга. Ультразвуковые методы исследования мышечной ткани (ультрасонография, эластография сдвиговой волны, деформационная эластография) также имеют ограничения, связанные с массогабаритными характеристиками оборудования, трудоёмкостью осуществления процесса и косвенным характером изменений, обнаруживаемых в мышечной ткани. Тестирование респондентов для выявления мышечного утомления является сугубо субъективным методом с трудностью объективного подтверждения. Наиболее объективным методом в настоящее время является электромиография, которая отражает процессы возбуждения мышцы, однако, и эта методика не отражает все изменения свойств скелетных мышц с точки зрения отнесения их к вязкоупругим средам [13].

С развитием концепции о вязкоупругих свойствах тканей, к которым следует относить и скелетные мышцы, наиболее перспективной методикой определения утомления в настоящее время рассматривается миотонметрия, позволяющая определять как биомеханические, так и вязкоупругие свойства мышечной ткани, возникающие в результате утомления [14–17]. В основе научного обоснования данного исследования лежит указанная концепция о вязкоупругих свойствах скелетных мышц, обладающих одновременной способностью, как к растяжению в ответ на напряжение, так и возвращению в обратное состояние при его прекращении.

Цель исследования — изучение динамики показателей биомеханических и вязкоупругих свойств скелетных мышц при возникновении локального мышечного утомления и выяснения возможности применения этих показателей для объективной оценки состояния утомления скелетно-мышечной системы.

Для выполнения работы использовался прибор неинвазивной цифровой пальпации «MyotonPRO». В основе принципа работы этого прибора лежит механическая модель мышцы, предложенная Вайном А.А. в 1990 г., кото-

¹ Измеров Н.Ф., Кириллова В.Ф. ред. Гигиена труда: учебник. М.: ГЭОТАР-Медиа; 2008

рый исходил из предположения, что свойства работающей мышцы определяются, в основном, соединительно-ткаными структурами, входящими в её состав, поскольку через них осуществляется передача механического напряжения от мышечной ткани на сухожилия. Учитывая ведущую роль в передаче механического напряжения соединительно-тканых структур мышечной ткани, изменение их биомеханических и вязкоупругих свойств будут отражать процессы утомления и перенапряжения, происходящие в работающих мышцах.

Материалы и методы. В исследовании приняли участие 13 человек в возрасте $32,5 \pm 10,6$ года при отсутствии жалоб любого характера на состояние здоровья и указаний в анамнезе на хронические заболевания, в том числе, скелетно-мышечной системы. Каждому участнику предлагалось выполнить две серии упражнений с кистевым эспандером со степенью сопротивления 20 кг: первая серия упражнений выполнялась до момента возникновения субъективного ощущения утомления, а вторая — «до отказа». Упражнения выполнялись правой рукой.

С помощью прибора «MyotonPro» изучались биомеханические и вязкоупругие свойства по данным тестирования лучевого и локтевого сгибателей запястья, при этом замеры в локтевом сгибателе производились в трех разных отделах мышцы: проксимальном (1 точка), центральном (2 точка) и дистальном (3 точка) с последующим вычислением средних значений. Наряду с этим изучалось состояние показателей короткой мышцы, отводящей большой палец кисти.

Состояние каждой мышцы оценивалось по 5 параметрам: тонус, жёсткость, упругость, характеризующие биомеханические свойства, и вязкоупругие — ползучесть и время релаксации.

Для регистрации параметров были выбраны точки приложения прибора, находящиеся в области брюшка

исследуемых мышц. Конкретное выполнение исследовательской методики было проведено в соответствии с рекомендованной производителем устройства.

Данные миоэлектрографии сопоставлялись с результатами кистевой динамометрии правой руки, являющегося классическим методом оценки утомления в физиологии труда. Исследование проводилось по стандартной методике с регистрацией максимальной произвольной силы и выносливости.

Во всех случаях, включая миоэлектрографию и динамометрию, проводилось три серии измерений: фоновое, после нагрузки до ощущения субъективного утомления и после нагрузки «до отказа».

Все полученные данные подвергались статистическому анализу. Принимая во внимание небольшое количество наблюдений, результаты анализировались с применением непараметрических методов статистики.

Результаты и обсуждение. Результаты проведённого исследования выявили изменения различной степени выраженности биомеханических и вязкоупругих свойств локтевого и лучевого сгибателей запястья. Отсутствие изменений исследуемых параметров в мышце, отводящей большой палец, исключает возможность развития в ней локального мышечного утомления в связи с малой активностью в работе и подчёркивает наличие причинно-следственной связи между выявленными изменениями в мышцах сгибателей запястья и развившимся периферическим утомлением в связи с активным участием их в работе.

Данные, представленные на **рисунке 1**, указывают на повышение показателей тонуса исследованных мышц запястья по сравнению с исходными данными, причём статистически более значимое изменение этого показателя выявляется после наступления состояния переутомления. Поскольку тонус как биомеханический показатель отражает

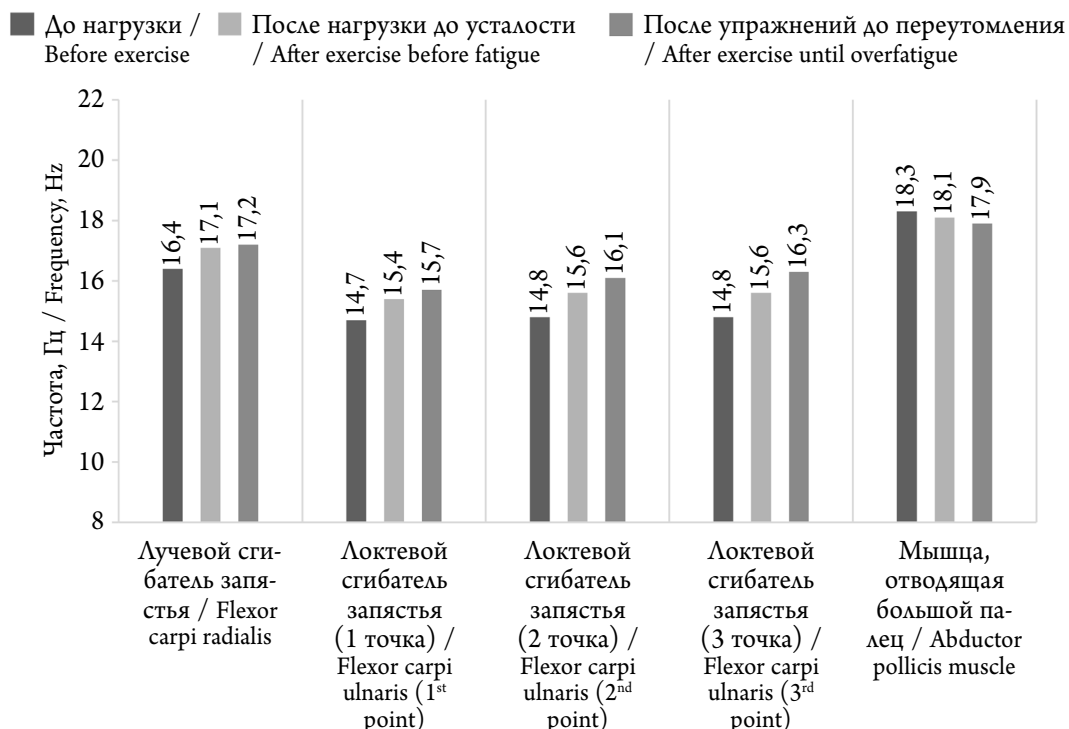


Рис. 1. Динамика тонуса исследуемых мышц в процессе развития утомления по данным миоэлектрографии

Fig. 1. Dynamics of the tone of the studied muscles during the development of fatigue according to myoelectrometry

состояние внутреннего напряжения мышцы его повышение обусловлено увеличением внутримышечного давления, за счёт усиленной эфферентной иннервации, повышением кровенаполнения мышцы при выполнении активной работы и параллельного с этим уменьшением венозного оттока.

Аналогичный характер изменений отмечается при исследовании параметра жёсткости, т. к. она зависит от из-

менений тонуса мышцы (рис. 2). Поскольку жёсткость характеризует способность ткани сопротивляться внешней силе, деформирующей её первоначальную форму, увеличение плотности мышечной ткани при повышении тонуса, сопротивление возрастает. В силу этого наблюдаемое повышение жёсткости неблагоприятно сказывается на работе мышц, как агонистов, так и антагонистов, поскольку им

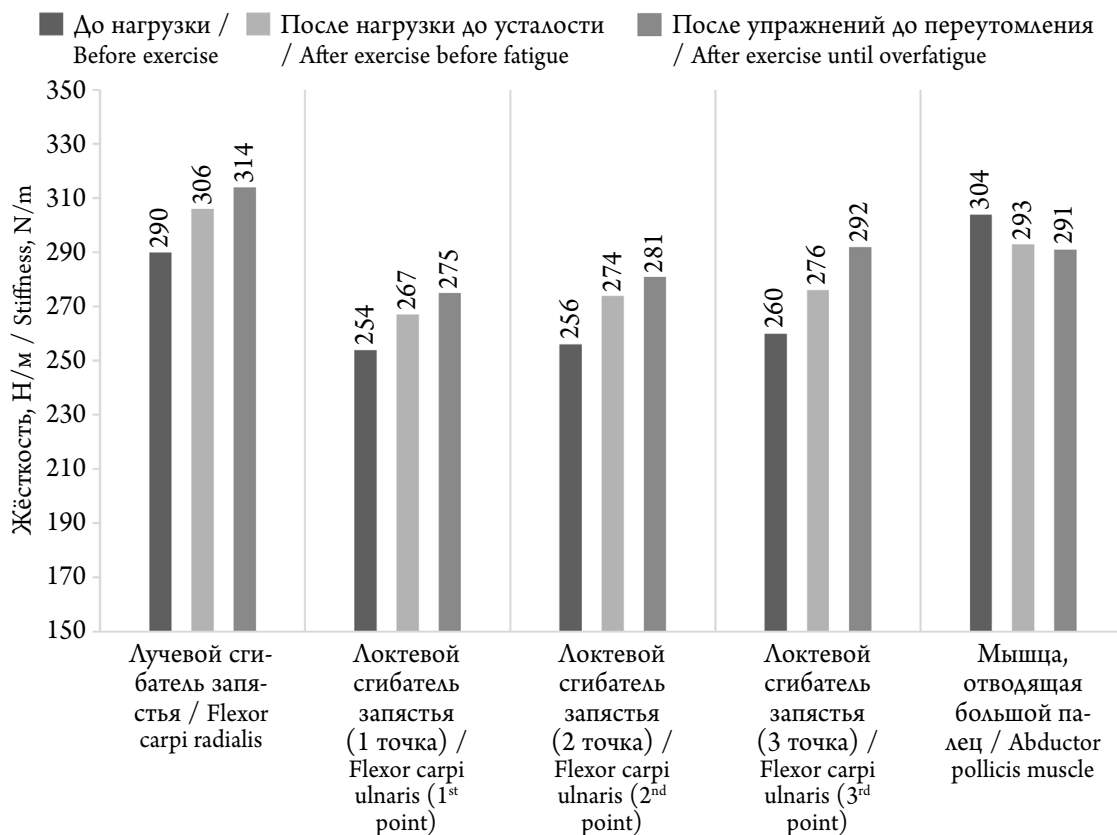


Рис. 2. Динамика жёсткости исследуемых мышц в процессе развития утомления по данным миоэлектромиографии

Fig. 2. Dynamics of stiffness of the studied muscles during the development of fatigue according to myotonometry

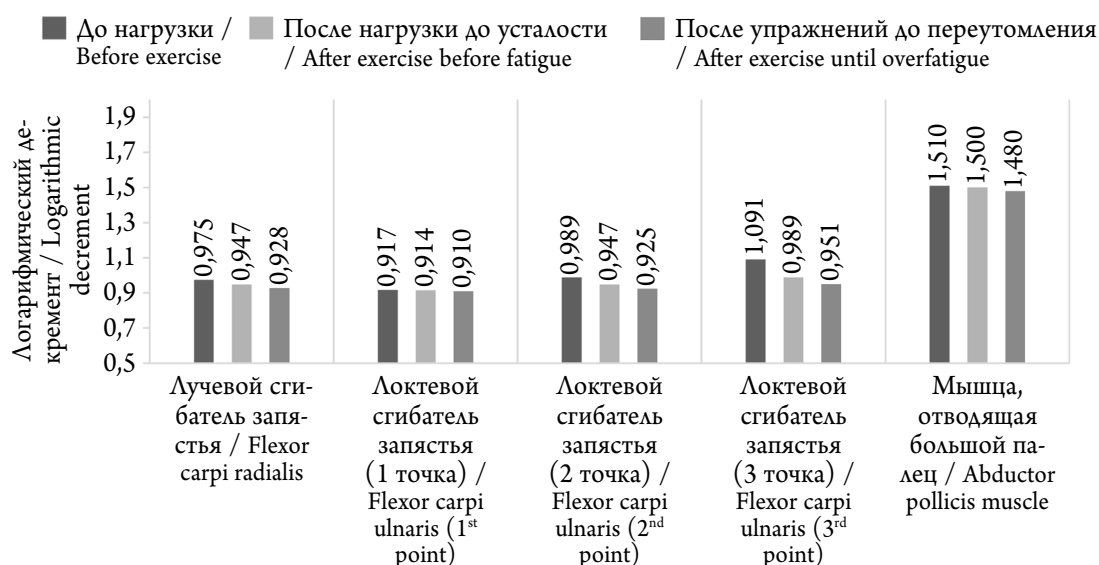


Рис. 3. Динамика показателя, характеризующего упругость исследуемых мышц в процессе развития утомления по данным миоэлектромиографии

Fig. 3. Dynamics of the parameter characterizing the elasticity of the studied muscles during the development of fatigue according to myotonometry

сложно противодействовать жёсткой мышце, следствием чего изменяется биомеханика движений и нарушается ход восстановительных процессов.

Рисунок 3 отражает динамику показателя упругости, который указывает на эластичность и характеризует способность мышцы восстанавливать свою форму после сокращения. Принимая во внимание, что упругость вычисляется в автоматическом режиме прибором «MyotonPRO» по величине логарифмического декремента, который обратно пропорционален значениям упругости, выявленные изменения логарифмического декремента свидетельствуют о повышении упругости при утомлении.

Как свидетельствуют полученные данные, интерпретация этого показателя характеризовалась некоторыми особенностями. Во-первых, статистически значимая достоверность изменений этого параметра была выявлена для лучевого сгибателя запястья только после переутомления, что свидетельствует о его низкой чувствительности к выполняемой нагрузке. Во-вторых, изменения упругости неодинаковы во всех точках измерения локтевого сгибателя запястья, что скорее всего, объясняется анатомо-функциональными особенностями строения различных отделов мышц, в частности их соединительно-тканых структур, которым принадлежит ведущая роль в передаче механического напряжения, как было указано выше во введении. В связи с этим, представленные на **рисушке 3** данные отражают статистически значимые изменения логарифмического декремента по средним данным, рассчитанным по результатам тестирования центральной и дистальной точек мышцы.

В связи с этими особенностями оценка изменений показателя упругости не может быть однозначной и должна

использоваться для оценки состояния утомления совместно с другими показателями.

Рисунки 4 и 5 отражают динамику показателей состояния вязкоупругих свойств мышечной ткани при различных уровнях утомления. На рисунке 4 представлена динамика показателя ползучести, который характеризует постепенное удлинение мышцы при постоянном растягивающем напряжении. Проведённый анализ выявил статистически значимое уменьшение этого показателя для лучевого и локтевого сгибателей запястья, особенно выраженное по сравнению с исходными данными при достижении переутомления.

Рисунок 5 демонстрирует динамику времени релаксации механического напряжения, в течение которого мышца восстанавливает свою форму после деформации в результате произвольного сокращения или снятия внешней силы. Миотонометрические тестирования выявили статистически значимое уменьшение этого показателя особенно при достижении переутомления.

Суммируя результаты миотонометрического тестирования можно заключить, что данный метод представляет широкий спектр изменений различных свойств мышечной ткани, возникающей в ходе развития субъективного утомления и переутомления. Динамика этих показателей представлена в **таблице**.

Следует подчеркнуть, что статистически значимые отклонения по отношению к исходным показателям выявлены практически во всех случаях уже при наступлении субъективного чувства усталости, нарастая в дальнейшем при продолжении воздействия нагрузки до уровня переутомления. Полученные данные подчёркивают роль

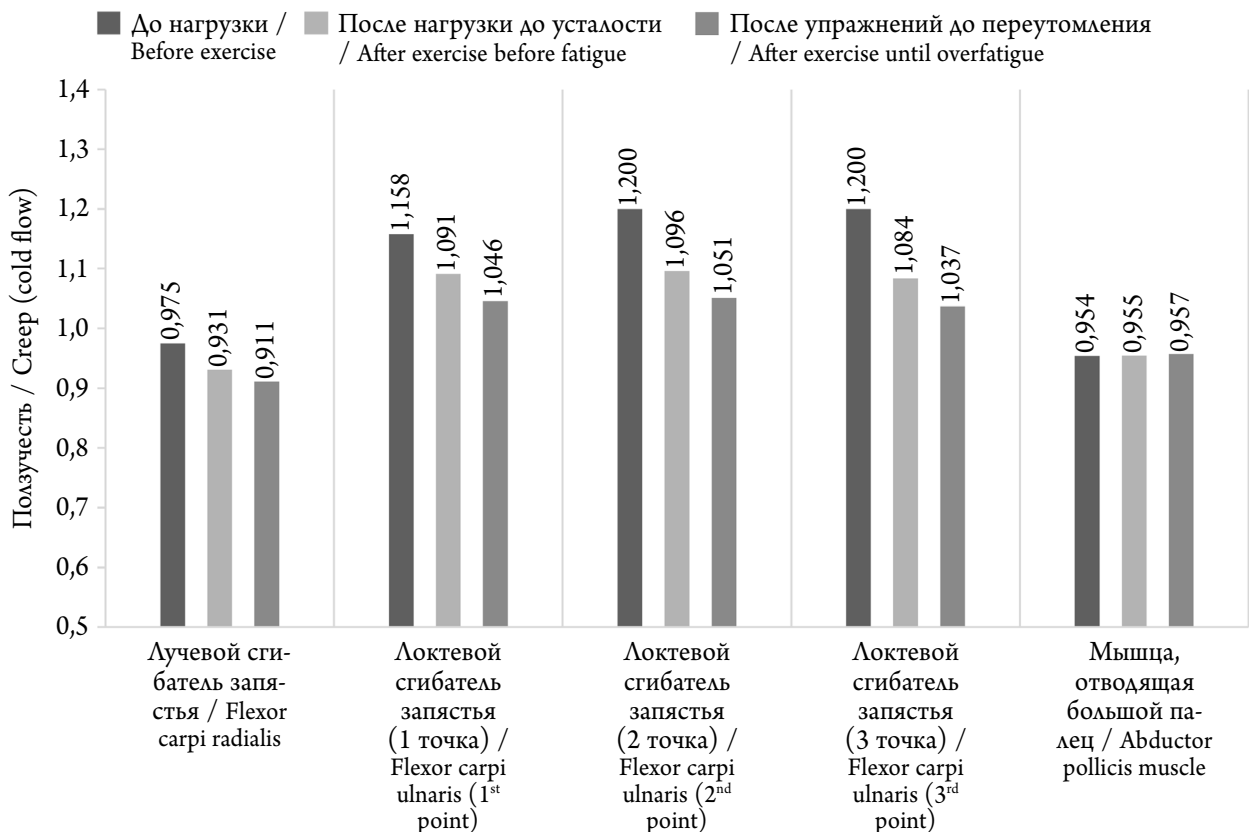


Рис. 4 Динамика показателя, характеризующего ползучесть исследуемых мышц в процессе развития утомления по данным миотонометрии

Fig. 4. Dynamics of the index characterizing the creep of the studied muscles during the development of fatigue according to myotonometry



Рис. 5. Динамика времени релаксации исследуемых мышц в процессе развития утомления по данным миотонотрии
Fig. 5. Dynamics of the relaxation time of the studied muscles during the development of fatigue according to myotonometry

Таблица / Table

Изменения биомеханических и вязкоупругих свойств исследуемых мышц при разных уровнях локального утомления по данным миотонотрического тестирования
Changes in biomechanical and viscoelastic properties of the studied muscles at different levels of local fatigue according to myotonometric testing

Свойства мышечной ткани / Properties of muscle tissue		До возникновения субъективной усталости (в % по сравнению с исходным уровнем) / Before the onset of subjective fatigue (in % compared to baseline)		До момента отказа от выполнения работы (в % по сравнению с исходным уровнем) / Before the moment of refusal to perform the work (in % compared to the initial level)	
		лучевой сгибатель запястья / flexor carpi radialis	локтевой сгибатель запястья / flexor carpi ulnaris	лучевой сгибатель запястья / flexor carpi radialis	локтевой сгибатель запястья / flexor carpi ulnaris
I Биомеханические свойства / I Biomechanical properties					
1	Тонус / Tone	↑ 4,1	↑ 5,4	↑ 4,7	↑ 8,6
2	Жёсткость / Stiffness	↑ 7,6	↑ 7,1	↑ 10,7	↑ 11,2
3	Упругость / Elasticity	↑ 2,8*	↑ 7,7	↑ 5,3	↑ 10
II Вязкоупругие свойства / II Viscoelastic properties					
4	Ползучесть / Creep (cold flow)	↓ 5,1	↓ 8,1	↓ 6,8	↓ 12,5
5	Время релаксации / Relaxation time	↓ 5,7	↓ 7,7	↓ 7,8	↓ 12,5

Примечания: ↑ — повышение показателя на..., ↓ — понижение показателя на..., * — статистически значимого отличия от исходного уровня не выявлено.
 Notes: ↑ — indicator increase by..., ↓ — indicator decrease by..., * — no statistically significant difference from baseline.

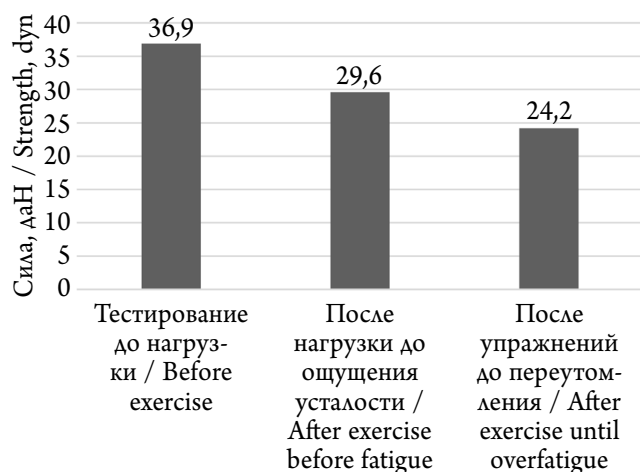


Рис. 6. Динамика силы правой кисти в процессе развития утомления по данным динамометрии
Fig. 6. Dynamics of the right hand strength indicator during the development of fatigue according to dynamometry

продолжающейся локальной мышечной нагрузки как фактора перехода утомления в переутомление и в перенапряжение мышечного аппарата, что может в ряде случаев привести к формированию заболеваний скелетно-мышечной системы от функционального перенапряжения в том числе профессионального характера. В этих случаях осуществление перехода возникших при утомлении функциональных изменений в патологические возможен только при длительном воздействии статико-динамических нагрузок, превышающих предельно допустимые параметры, что было доказано при обследовании лиц в производственных условиях [4, 18–21].

Сопоставление результатов миотонометрии с данными динамометрии, при которой выявлено значительное снижение (на 19,8%) по сравнению с фоновым показателем силы правой кисти при достижении субъективной усталости с увеличением на 34,5% с развитием переутомления (рис. 6).

Обращает на себя внимание выявленная динамика показателя выносливости, которая не регистрирует его снижения при ощущении чувства усталости, а наоборот свидетельствует о его некотором возрастании, что может быть обусловлено влиянием волевого компонента (рис. 7). Этот факт необходимо учитывать при трактовке динамометрического тестирования, однако классическим показателем развития периферического утомления в физиологии труда является снижение силового показателя. В контексте этого, важно установление тесной положительной связи между показателями силы мышц пра-

Время удержания тестовой нагрузки, сек. / Test load holding time, sec.

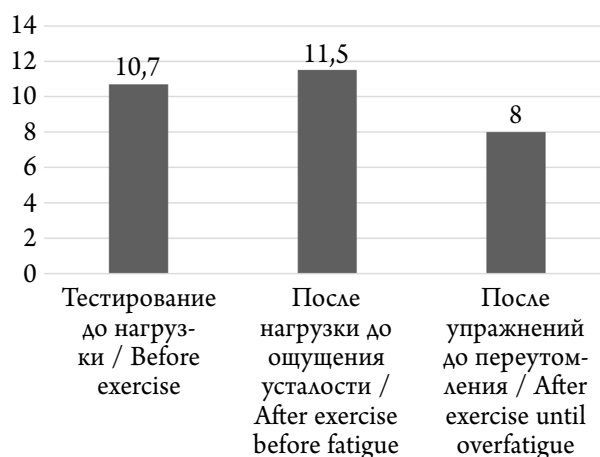


Рис. 7. Динамика показателя выносливости правой кисти в процессе развития утомления по данным динамометрии
Fig. 7. Dynamics of the endurance index of the right hand during the development of fatigue according to dynamometry data

вой кисти и тонуса лучевого сгибателя запястья в фоновых и контрольных тестированиях ($r=0,8$, $p=0,003$; $r=0,7$, $p=0,015$, соответственно) и наличие положительной связи средней силы между показателями силы мышц правой кисти и жёсткости, как в фоновом, так и контрольном тестировании ($r=0,6$, $p=0,047$; $r=0,6$, $p=0,040$, соответственно).

Выводы:

1. Резюмируя результаты миотонометрического тестирования, можно заключить, что данный метод представляет широкий спектр изменений различных свойств мышечной ткани, как биомеханических, так и вязкоупругих, возникающих при развитии локального утомления.

2. Анализ полученных в ходе проведённого исследования результатов позволяет утверждать, что наиболее объективной оценкой мышечного утомления, является комплекс показателей, включающий определение силы мышц динамометрическим методом, тонуса, жёсткости, ползучести и времени релаксации по данным миотонометрии.

3. Выявленные изменения свойств мышечной ткани не только расширяют представления о развитии процессов утомления, происходящих в мышечной ткани, но и позволяют уточнить механизмы формирования заболеваний скелетно-мышечной системы у лиц рабочих профессий, испытывающих длительное воздействие статико-динамических нагрузок, превышающих предельно допустимые показатели.

Список литературы

- Измеров Н.Ф. ред. *Профессиональные заболевания. Руководство для врачей. Том 2.* М.: Медицина; 1996.
- Измеров Н.Ф., Суворов Г.А., Матюхин В.В. Роль и задачи физиологии труда в стратегии охраны здоровья работающего населения на современном этапе. *Материалы 10-й Всероссийской конференции «Физиология труда в третьем тысячелетии».* М.; 2001: 3–7.
- Измеров Н.Ф. ред. *Профессиональная патология: национальное руководство.* М.: ГЭОТАР-Медиа; 2011.
- Мойкин Ю.В., Киколов А.Н., Тхоревский В.В. *Психофизиологические основы профилактики перенапряжения.* М.: Медицина; 1987.
- Шардакова Э.Ф., Матюхин В.В., Ямпольская Е.Г. и др. Профилактика риска развития перенапряжения работников физического труда в зависимости от класса условий труда по показателям тяжести трудового процесса. *Мед. труда и пром. экол.* 2012; 1: 23–29. <https://elibrary.ru/orngcr>
- Шардакова Э.Ф., Юшкова О.И., Елизарова В.В. и др. Физиологическая оценка физических и нервно-психических перегрузок в медицине труда. *Вестник Тверского государственного университета, Серия Биология, Экология.* 2018; 3: 7–20. <https://doi.org/10.26456/vtbio1> <https://elibrary.ru/yxelxf>
- Золина З.М., Измеров Н.Ф. ред. *Руководство по физиологии труда.* М.: Медицина; 1983.

8. Башкин В.М. Изменение быстроты мышечных сокращений в зависимости от выполненной тренировочной нагрузки. *Учёные записки университета им. П.Ф. Лесгафта: научно-теоретический журнал*. 2009; 5(51): 10–14. <https://elibrary.ru/kuhutx>
9. Фудин Н.А., Вагин Ю.Е., Пигарева С.Н. Системные механизмы утомления при физических нагрузках циклической направленности. *Вестник новых медицинских технологий*. 2014; 21(3): 118–121. <https://elibrary.ru/sxxcyj>
10. Моногаров В. Генез утомления при напряженной мышечной деятельности. *Наука в олимпийском спорте*. 2019; 4: 5–16. <https://elibrary.ru/iwkmprn>
11. Абдрахманова А.Ш., Мавлиев Ф.А., Ахметов И.И., Назаренко А.С. Утомление: Понимание проблемы и системные механизмы его развития. *Наука и спорт: современные тенденции*. 2022; 10(1): 6–17.
12. Шеррер Ж. *Физиология труда*. М.: Медицина; 1973.
13. Amirova L.E., Plehuna A., Rukavishnikov I.V., Saveko A.A., Peipsi A. and Tomilovskaya E. S. Sharp Changes in Muscle Tone in Humans Under Simulated Microgravity. *Front. Physiol.* 12: 661922. <https://doi.org/10.3389/fphys.2021.661922>
14. Вайн А.А. *Явление передачи механического напряжения в скелетной мышце*. Типография ТУ; 1990.
15. Vain A. Device and method for real-time measurement of parameters of mechanical stress state and biomechanical properties of soft biological tissue. Patent US, no 20130289365A1, 2010.
16. Roch M., Morin M., Gaudreault N. The MyotonPRO: A reliable tool for quantifying the viscoelastic properties of a trigger point on the infraspinatus in non-traumatic chronic shoulder pain. *Journal of Bodywork and Movement Therapies*. 2020; 24(4): 379–385. <https://doi.org/10.1016/j.jbmt.2020.05.002>
17. Lee Y., Kim M., Lee H. The Measurement of Stiffness for Major Muscles with Shear Wave Elastography and Myoton: A Quantitative Analysis Study. *Diagnostics*. 2021; 11(3): 524. <https://doi.org/10.3390/diagnostics11030524>
18. Навакатикян А.О. Проблема развития предпатологических состояний (перенапряжения и переутомления) под влиянием работы и факторов окружающей среду. *Гигиена труда и проф. заболевания*. 1981; (11): 14–17.
19. Грацианская Л.Н., Элькин М.А. *Профессиональные заболевания конечностей от функционального перенапряжения*. Л.: Медицина; 1984.
20. Тарасова Л.А., Шардакова Э.Ф., Матюхин В.В. Вероятность нарушения здоровья работающих от воздействия неблагоприятных факторов трудового процесса. *Актуальные проблемы медицина труда*. 2001, 6: 1–7. <https://elibrary.ru/snszaz>
21. Маслов Н.Б., Блощинский И.А., Максименко В.Н. Нейрофизиологическая картина генеза утомления, хронического утомления и переутомления человека-оператора. *Физиология человека*. 2003; 29(5): 123. <https://elibrary.ru/ootyzyx>

References

1. Izmerov N.F. Ed. *Occupational diseases. A guide for physicians. Volume 2*. Moscow: Meditsina; 1996 (in Russian).
2. Izmerov N.F., Suvorov G.A., Matyukhin V.V. The role and tasks of labor physiology in the strategy for protecting the health of the working population at the present stage. *Materials of the 10th All-Russian Conference "Physiology of Labor in the Third Millennium."* Moscow; 2001: 3–7 (in Russian).
3. Izmerov N.F. Ed. *Professional pathology: national leadership*. М.: GEOTAR-Media; 2011.
4. Moikin Yu.V., Kikolov A.N., Torevsky V.V. *Psychophysiological foundations of overvoltage prevention*. Moscow: Meditsina; 1987 (in Russian).
5. Shardakova E.F., Matyukhin V.V., Yampolskaya E.G. et al. Prevention of the risk of developing overvoltage of physical workers depending on the class of working conditions in terms of the severity of the labor process. *Med. truda i prom ecol.* 2012; 1: 23–29 (in Russian).
6. Shardakova E.F., Yushkova O.I., Elizarova V.V. Physiological assessment of physical and neuropsychic overloads in occupational medicine. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo universiteta, Seriya Biologiya, Ehkologiya*. 2018; 3: 7–20 <https://doi.org/10.26456/vtbio1> <https://elibrary.ru/yxelxf> (in Russian).
7. Zolina Z.M., Izmerov N.F. ed. *Manual on the physiology of labor*. Moscow: Meditsina; 1983 (in Russian).
8. Bashkin V.M. Change in the speed of muscle contractions depending on the completed training load. *Uchyonye zapiski universiteta im. P.F. Lesgafta: nauchno-teoreticheskij zhurnal*. 2009; 5 (51): 10–14. <https://elibrary.ru/kuhutx> (in Russian).
9. Fudin N.A., Vagin Yu.E., Pigareva S.N. Systemic mechanisms of fatigue during cyclic physical activity. *Vestnik novykh meditsinskikh tekhnologij*. 2014; 21(3): 118–121 <https://elibrary.ru/sxxcyj> (in Russian).
10. Monogarov V. Genesis of fatigue with strenuous muscle activity. *Nauka v olimpijskom sporte*. 2019; 4: 5–16 <https://elibrary.ru/iwkmprn> (in Russian).
11. Abdrakhmanova A. Sh., Mavliev F.A., Akhmetov I.I., Nazarenko A.S. Fatigue: Understanding the problem and systemic mechanisms of its development. *Nauka i sport: sovremennye tendentsii*. 2022; 10(1): 6–17 (in Russian).
12. Scherrer J. *Physiology of labor*. Moscow: Meditsina; 1973 (in Russian).
13. Amirova L.E., Plehuna A., Rukavishnikov I.V., Saveko A.A., Peipsi A., Tomilovskaya E.S. Sharp Changes in Muscle Tone in Humans Under Simulated Microgravity. *Front. Physiol.* 12: 661922. <https://doi.org/10.3389/fphys.2021.661922>
14. Vine A.A. *Phenomenon of transmission of mechanical stress in skeletal muscle*. Printing house TU; 1990 (in Russian).
15. Vain A. Device and method for real-time measurement of parameters of mechanical stress state and biomechanical properties of soft biological tissue. Patent US, no 20130289365A1, 2010.
16. Roch M., Morin M., Gaudreault N. The MyotonPRO: A reliable tool for quantifying the viscoelastic properties of a trigger point on the infraspinatus in non-traumatic chronic shoulder pain. *Journal of Bodywork and Movement Therapies*. 2020; 24(4): 379–385. <https://doi.org/10.1016/j.jbmt.2020.05.002>
17. Lee Y., Kim M., Lee H. The Measurement of Stiffness for Major Muscles with Shear Wave Elastography and Myoton: A Quantitative Analysis Study. *Diagnostics*. 2021; 11(3): 524. <https://doi.org/10.3390/diagnostics11030524>
18. Navakatikyan A.O. The problem of the development of pre-pathological states (overvoltage and overwork) under the influence of work and environmental factors. *Gigiiena truda i prof. zabolovaniya*. 1981; (11): 14–17 (in Russian).
19. Grazianskaya L.N., Elkin M.A. *Occupational diseases of limbs from functional overexertion*. L: Meditsina; 1984 (in Russian).
20. Tarasova L.A., Shardakova E.F., Matyukhin V.V. Probability of violation of the health of workers from the impact of adverse factors of the labor process. *Aktual'nye problemy meditsina truda*. 2001, 6: 1–7. <https://elibrary.ru/snszaz> (in Russian).
21. Maslov N.B., Bloschinsky I.A., Maksimenko V.N. Neurophysiological picture of the genesis of fatigue, chronic fatigue and overwork of a human operator. *Fiziologiya cheloveka*. 2003; 29(5): 123. <https://elibrary.ru/ootyzyx> (in Russian).

Сведения об авторах:

- Суворов Вадим Германович* зав. отделением реабилитации профессиональных и неинфекционных заболеваний ФГБНУ «Научно-исследовательский институт медицины труда имени академика Н.Ф. Измерова»; профессор кафедры профпатологии производственной медицины ФГБОУ ДПО «Российская медицинская академия непрерывного профессионального образования» Минздрава России, д-р мед. наук.
E-mail: margo-183@rambler.ru
- Шитова Евгения Сергеевна* мл. науч. сотр. лаб. средств индивидуальной защиты и промышленных экзоскелетов.
E-mail: shitova.zhe@gmail.com
https://orcid.org/0000-0002-4379-5187

About the authors:

- Vadim G. Suvorov* Head of the Department of Rehabilitation of Occupational and Non-Communicable Diseases, Professor of the Department of Occupational Pathology of Industrial Medicine, Izmerov Research Institute of Occupation Health; Professor of the Department of Occupational Pathology and Industrial Medicine, Russian Medical Academy of Continuing Professional Education, Dr. of Sci. (Med.).
E-mail: margo-183@rambler.ru
- Evgeniya S. Shitova* Junior Researcher, Laboratory of Personal Protective Equipment and Industrial Exoskeletons.
E-mail: shitova.zhe@gmail.com
https://orcid.org/0000-0002-4379-5187
-