

Обзорная статья

УДК 616.314-007.2-089.23:612.311

doi: <https://doi.org/10.19163/1994-9480-2023-20-4-10-15>

## Современные аспекты физиологии мышечного сокращения

Владимир Вячеславович Шкарин, Андрей Иванович Перепелкин,  
Ольга Сергеевна Чепуряева ✉

*Волгоградский государственный медицинский университет, Волгоград, Россия*

**Аннотация.** Физиологии мышечного сокращения посвящено немало трудов. Еще с древних времен ученые занимались изучением физиологических процессов, строением, особенностями организации и функции организма человека. Ведь только изучив в подробностях строение и нормальную физиологию человека, можно отделить норму от патологии, научиться диагностировать различные функциональные патологии и пути восстановления функции. Физиологии мышечного сокращения уделяется большое внимание, так как сама жизнь человека, активность, двигательная функция связана с работой мышц. В разные периоды развития медицины подходы к изучению и представления о мышечном сокращении, работе мышц человека были различными. На наш взгляд, весьма перспективным представляется изучение проблематики и особенностей физиологии мышечного сокращения.

**Ключевые слова:** сокращение мышц, сила сокращения, физиология.

Review article

doi: <https://doi.org/10.19163/1994-9480-2023-20-4-10-15>

## Modern aspects of physiology of muscle contraction

Vladimir V. Shkarin, Andrey I. Perepelkin, Olga S. Chepuryaeva ✉

*Volgograd State Medical University, Volgograd, Russia*

**Abstract.** A lot of works have been devoted to the physiology of muscle contraction. Since ancient times, scientists have been studying the physiological processes, structure, organization and function of the human body. After all, only by studying in detail the structure and normal physiology of a person, it is possible to separate the norm from pathology, learn to diagnose various functional pathologies and ways to restore function. Much attention is paid to the physiology of muscle contraction, since human life itself, activity, motor function is associated with the work of muscles. In different periods of the development of medicine, approaches to the study and ideas about muscle contraction, the work of human muscles were different. In our opinion, it is very promising to study the problems and features of the physiology of muscle contraction.

**Keywords:** muscle contraction, contraction force, physiology.

### ВВЕДЕНИЕ

Двигательная деятельность человека, составляющая основу жизни и индивидуального развития в процессе адаптации и взаимодействия с окружающей средой, представляет собой сложное сочетание тончайших координационных соотношений в работе различных органов и систем организма. Разные ученые занимались изучением «теории мышечного сокращения», но до сих пор многое остается до конца не изученным.

Физиологии мышечного сокращения посвящено немало трудов. Еще с древних времен ученые занимались изучением физиологических процессов, строением, особенностями организации и функции организма человека. Ведь только изучив в подробностях строение и нормальную физиологию человека, можно отделить норму от патологии, научиться диагностировать различные функциональные патологии и пути восста-

новления функции. Физиологии мышечного сокращения уделяется большое внимание, так как сама жизнь человека, активность, двигательная функция связана с работой мышц [1].

В разные периоды развития медицины подходы к изучению и представления о мышечном сокращении, работе мышц человека были различными. На наш взгляд, весьма перспективным представляется изучение проблематики и особенностей физиологии мышечного сокращения.

### ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Многие ученые занимались изучением сократительной способности мышц. Так, советский физикохимик и биофизик М.В. Волькенштейн говорил, что мы еще далеки от полного понимания процессов, происходящих в мышце [1].

В 2017 г. в труде российского астрофизика, писателя, доктора физико-математических наук Н.Н. Горькавого рассказывается об истории изучения животного электричества. Так, в 1745 г. в Лейдене голландским ученым Питером Ван Мушенбруком и его учеником Кюнеусом был изобретен первый накопитель электрических зарядов – лейденская банка – электрический конденсатор. Этот старинный прибор может накапливать статическое электричество и при включении в контур мгновенно разряжаться полностью [2, 3].

В конце XVIII в. Луиджи Гальвани, занимавшийся изучением анатомии человека, открыл биоэлектрические явления в организме и предположил электрическую основу сокращения мышц. Он впервые обнаружил «животное электричество» в результате опытов на животных. Результатом его трудов стал «Трактат о силах электричества при мышечном движении».

Лючия Галеацци – жена Гальвани – охотно посещала лабораторию мужа: препарировать лягушек ей не нравилось, а вот ручку электрофорной машины, которая давала яркие электрические искры, крутила с удовольствием и обратила внимание мужа на сокращение мышцы лягушки во время искры [2, 3]. Благодаря Л. Гальвани произошел эволюционный научный парадокс, который заключался в том, что он развивал и акцентировал внимание на теории «животного электричества», которая затмила его гениальные эксперименты и соответствующие выводы по биоэлектрической основе мышечного сокращения. До сих пор Луиджи Гальвани признают одним из великих авторов теории «животного электричества», а его теория электромышечного сокращения оказалась в тени [4]. Он проводил эксперименты с мышцами лягушки, которые спустя 300 лет повторяют студенты медицинских вузов.

В 1887 г. английским физиологом Огюстом Дезире Уоллером была предложена регистрация электрокардиограммы, а именно явления генерации электрического тока миокардом при работающем сердце. Им было доказано преобразование механической энергии в электрическую в мышцах сердца. Термин «электрокардиограмма» (ЭКГ) в 1901 г. предложил Виллем Эйнтховен (Einthoven), который создал первый в мире электрокардиограф. С помощью этого прибора В. Эйнтховен зарегистрировал генерацию электрического тока миокардом, определил временные и амплитудные параметры зубцов ЭКГ.

Генерация электрического тока скелетными мышцами у человека была зарегистрирована в 1907 г. немецким ученым Г. Пипером (Piper). Этот метод был назван электромиографией (ЭМГ) [5]. «Электрическая машина» традиционно ассоциируется с неживой природой, с созданием человеком различных двигательных конструкций. Электрическая машина – это электромеханический преобразователь энергии,

а электричество – совокупность явлений, обусловленных существованием, взаимодействием и движением электрических зарядов. Назрела необходимость пополнения словарей новыми терминами в связи с мышечной деятельностью – «электробиологическая машина», «электробиологический двигатель», «электробиологический преобразователь энергии», «поступательный электробиологический двигатель» (мышца). В настоящее время даже в лекциях для студентов смело говорится: «В период распространения возбуждения клетка миокарда имеет два противоположно заряженных полюса и является маленьким генератором электрического тока» [2, 5, 6].

Из приведенного выше видно, что исторически изучение механики сокращения началось со скелетных мышц, на ней впервые было продемонстрировано мышечное сокращение и действие электрического тока. При дальнейшем изучении стало понятно, что нет значительных различий в функционировании сердечной мышцы (миокарда) и скелетной мускулатуры [1].

Скелетная мышца – одна из наиболее пластичных структур в организме млекопитающих. При повышенной активности и нагрузке часто происходит увеличение ее размеров, объемов миофибриллярного аппарата, повышение сократительных возможностей (силы, мощности). Процесс прироста мышечной массы зависит от различных факторов: наследственных, конституциональных, а также пола, возраста, метаболизма, гормонального фона. Кроме того, с приобретением опыта тренировок становится все труднее увеличить мышечную массу, поэтому важно понимать и активно использовать все возможные механизмы этого процесса.

Работа мышц проявляется в их сокращении, началом которого является появление очага возбуждения на нейромышечных окончаниях. При этом наружная мембрана миоцита деполяризуется, открываются кальциевые каналы, возрастает концентрация кальция внутри клетки. Ионы кальция в клетке миоцита связываются с тропонином, который конформируется в тропониновый комплекс. Участки цепей белка миозина связываются с белком актином, этот процесс сопровождается высвобождением энергии вследствие расщепления аденозинтрифосфата (АТФ) до аденозиндифосфата АДФ и остатка фосфорной кислоты. При этом происходит перестройка внутри клетки мышечного волокна, изменяется угол между цепями миозина и актиновый филамент перемещается к центру саркомера, что приводит к изменению длины мышцы и ее сокращению [1, 6, 7]. Различают два типа клеток скелетных мышц: миосателлиты (взрослые стволовые клетки мышечной ткани, которые являются основой мышечной ткани) и миосимпласты (формируют многоядерный синцитий).

Мышечная активность сопровождается количественными и качественными изменениями в миоцитах

того типа, которые необходимы для наиболее эффективного осуществления выполняемой работы [8].

Мышечные волокна делятся на медленные (I тип) и быстрые (II тип). Оба этих типа имеют различный состав, включающий в себя сократительные белки, ферменты энергетического обмена и внутриклеточный кальций.

В момент выполнения работы миоцит подвергается действию физических и гуморальных факторов (пассивные механические силы, гипоксемия, факторы роста и т. д.). Они являются причиной запуска путей передачи сигнала внутри клеток, опосредуя транскрипцию и трансляцию генов, ответственных за синтез белков [9]. Изменения данных путей сопровождаются реорганизацией мышечных волокон, точнее их типов.

Увеличение силы мышц проявляется структурными перестройками, которые затрагивают нервную и мышечную системы. Изменения в нервной системе проявляются трансформацией величины кортикальных полей, которые регулируют выполнение определенного вида движения, влиянием на синхронизацию моторных единиц и на обучение определенных мышц, отвечающих за выполнение данного вида движений. Таким образом, наибольшая активность мышц наблюдается именно тогда, когда она необходима для достижения максимального эффекта (активность мышц агонистов при одновременной пассивности антагонистов). Также наблюдается изменение частоты и устойчивости генерируемых импульсов и порога возбудимости мотонейронов. Изменения в мышечной системе могут быть связаны с гипертрофией скелетных мышц (увеличение размеров мышечного волокна) и с их гиперплазией (увеличение количества миоцитов) [10].

К настоящему времени благодаря исследованиям, развернувшимся одновременно в нескольких направлениях – морфологическом, гистохимическом, электрофизиологическом, молекулярно-биологическом, фило- и онтогенетическом, биомеханическом, патофизиологическом и других – накоплено много информации о структуре и функции мотонейронов, нервных и мышечных волокон, рецепторов и других образований, принимающих активное участие в формировании и коррекции двигательных актов. Скелетные мышцы представляют собой сложное образование, основу структуры которого составляют мышечные волокна, имеющие диаметр от 10 до 100 мкм и длину от 5 до 400 мм. Волокна в мышце располагаются, как правило, параллельно, но некоторые мышцы, например, *m. gracilis* и *m. sartorius*, имеют последовательное соединение двух и даже трех волокон, разделенных внутренними сухожильными образованиями [7].

Всю мышцу окружает тонкий слой соединительной ткани – эпимизиум, от которого внутрь мышцы отходят разветвляющиеся соединительнотканые перегородки, образующие перимизиум. А от слоя перимизиума, окружающего пучки мышечных волокон, отходят тончайшие

прослойки соединительной ткани – эндомизиума, отделяющие друг от друга отдельные мышечные волокна. Эти соединительнотканые образования, коллаген которых составляет от 3 до 30 % всех мышечных белков, играют важную роль в креплении концов мышечных волокон к сухожилиям, а также придают мышцам прочность. Следует отметить, что мышцы относятся к сильно васкуляризованным тканям, где на одно мышечное волокно приходится от 3 до 4 капилляров [11].

Мышечные волокна разных типов, находящиеся внутри пучков, образуемых перимизиумом, обычно принадлежат разным двигательным единицам.

В современной физиологии регуляция движений исследуется с разных точек зрения. Многообразие подходов связано с чрезвычайной сложностью двигательной системы и тем положением, которое занимает движение в жизнедеятельности организма.

Впервые термин «двигательная единица» (ДЕ) был введен Лидделом и Шеррингтоном. Под ДЕ подразумевается мотонейрон с иннервируемыми им мышечными волокнами [12]. В процессе расширения и углубления исследований в области физиологии двигательного аппарата сложилось общепринятое представление о ДЕ, которое содержит в своем составе альфа-мотонейрон и иннервируемые им мышечные волокна. Кроме того Е. Henneman, утверждал, что каждая мышца состоит из большого количества отдельных мышечных волокон, подразделяющихся по скорости сокращения, цвету, гистохимическим параметрам. Мышечные волокна иннервируются большим количеством мотонейронов. Импульсная активность альфа-мотонейронов является результатом временной и пространственной суммации приходящих к нему возбуждающих и тормозных влияний.

W. Rail утверждал, что в интегральной деятельности нейрона тело, дендриты и аксонный холмик функционируют как части единого механизма, хотя эффективность синаптического действия связывают и с особенностями расположения синапсов. В норме каждый импульс, возникающий в альфа-мотонейроне, вызывает распространяющееся возбуждение и сокращение всех составляющих двигательную единицу мышечных волокон. Поскольку альфа-мотонейроны, аксоны и мышечные волокна, образующие ДЕ, неоднородны, то и сами двигательные единицы по функциональной специализации подразделяются на быстрые, медленные и переходные [12].

Малые тонические альфа-мотонейроны иннервируют ДЕ с меньшим числом мышечных волокон, которые развивают соответственно и меньшую силу. Мышечные веретена обычно располагаются и крепятся параллельно мышечным волокнам (однако возможны и другие способы их крепления), так что при любых изменениях длины мышцы, изменяется и длина мышечных веретен. На растяжение афферентные

веретена отвечают залпом импульсов, частота которых тем больше, чем выше скорость и величина растяжения. Поэтому веретена являются датчиками-измерителями длины мышцы и скорости ее растяжения [13].

Сухожильные органы Гольджи располагаются в месте перехода мышцы в сухожилие, являясь как бы «вставленными» между мышечными волокнами и сухожилием. Благодаря последовательному положению сухожильного органа частота следования генераторных потенциалов его рецепторных окончаний, возникающих при сокращении (напряжении) или растяжении мышц, изменяется пропорционально изменению напряжения, а также скорости, с которой это изменение происходит. Таким образом, сухожильные органы Гольджи, часто обозначаемые как тензорецепторы, служат измерителями величины и скорости напряжения мышцы [14].

Внешним проявлением интегративной управляющей и координирующей деятельности ЦНС и сложного взаимоотношения эфферентных и афферентных влияний в конечном итоге является периодическое напряжение и расслабление различных групп мышц, регулируемые по временным и амплитудным параметрам и обеспечивающие выполнение целенаправленных двигательных актов.

Одним из основных исходных сигналов является повышенная концентрация кальция внутри клетки и кальцинеина. Кальцинеин дефосфорилирует факторы транскрипции – NFAT (nuclear factor of activated T-cells), которые находятся в фосфорилированном состоянии [10]. Данные факторы в дефосфорилированной форме активируют гены-мишени, что способствует перестроению быстрых волокон в медленные.

По мере приспособления мышц к нагрузкам изменяются и процессы метаболизма в них. Существуют различные параметры, влияющие на формирование адаптивных механизмов в миоцитах при выполнении работы. Важнейшим является гипоксия, которая, в свою очередь, активирует ферментные системы (фумараза, цитратсинтаза, лактатдегидрогеназа) и запускает работу факторов транскрипции (PGC1). При недостатке кислорода происходит активация одной изоформы семейства гипоксия-индуцированных факторов (HIF; hypoxia inducible factor), которая проникает в ядро, связывается с определенным участком ДНК и активирует гены, отвечающие за гликолиз, потребление кислорода и ангиогенез, увеличивая данные процессы. Некоторые гормоны также способны влиять на экспрессию генов в мышечных клетках. Это такие гормоны, как инсулин, гормон роста, которые вместе с кортизолом запускают катаболические реакции в условиях метаболического и энергетического истощения [8].

Стоит напомнить, что мышцы не являются постоянными клетками, а заменяются в течение жизни. Пролiferация необходима для предотвращения

апоптоза клеток (регулируемый процесс клеточной гибели) и поддержания массы скелетных мышц. Это осуществляется через динамический баланс между синтезом белков в мышцах и их распадом. Мышечная гипертрофия возникает тогда, когда синтез белков превышает их распад.

При растяжении и сокращении мышц происходит образование факторов роста IGF и MGF, которые могут действовать как паракринно, так и аутокринно. С одной стороны, их действие проявляется в увеличении синтеза сократительных белков мышечных волокон. Основным участником данного механизма является фосфорилированная протеинкиназа B (PKB) [14]. Ее активация начинается с влияния на мышцу нагрузки, которая приводит к синтезу гена, запускающего путь IGF/PI3K. В ткани имеется несколько изоформ, некоторые из них (IGF-1 и MGF), взаимодействуя с рецепторами, приводят к конформационным изменениям. Через фосфорилирование ряда рецепторов и происходит активация PKB, способствующая развитию анаболических реакций [9].

С другой же стороны, происходит усиление пролиферации миосателлитов, их митотическая активность приводит к формированию новых клеток, а также сопровождается слиянием их с имеющимися мышечными волокнами или дает возможность формировать новые. Миосателлиты расположены между базальной мембраной и сарколеммой. Покоящиеся клетки активируются непосредственно травмированием мышцы и в ответ на это начинают активно делиться и соединяться с частями поврежденного волокна. Под влиянием тяжелой изнурительной работы происходит также активация данных клеток из-за образования многочисленных микротравм мышечного волокна. Вследствие этого наблюдается явление, подобное процессам, происходящим при воспалении. В зону повреждения активно мигрируют нейтрофилы и макрофаги, которые активируют синтез ранее упомянутых факторов роста, регулирующих пролиферацию и дифференцировку миосателлитов. Мышечная гипертрофия отличается от мышечной гиперплазии. При гипертрофии мышц увеличиваются сократительные элементы и межклеточный матрикс расширяется для поддержки роста. Гиперплазия приводит к увеличению количества мышечных волокон. Гипертрофия сократительных элементов может происходить путем добавления саркомеров либо последовательно или параллельно.

Некоторые авторы утверждают, что общее число волокон предопределяется генетически и практически не меняется в течение жизни без применения специальных стимуляторов [12].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, при мышечной работе происходит множество процессов на разных уровнях. Начиная

с изменений интенсивности обменных процессов и заканчивая изменениями механизмов нервной и гуморальной регуляции. Реорганизация мышц, лежащая в основе этих процессов, приводит к изменению многочисленных характеристик деятельности спортсменов.

Понимание и изучение физиологии мышечного сокращения невероятно важно для врача. Считаю весьма перспективным дальнейшее изучение физиологических процессов в мышцах, анализ имеющихся способов диагностики состояния мышц человека и способов немедикаментозного воздействия на организм человека для нормализации работы мышц.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Волькенштейн М.В. Общая биофизика: монография. М.: Наука, 1978. 592 с. URL: [https://www.studmed.ru/view/volkenshteyn-mv-obschaya-biofizika\\_66ffd1e76b7.html](https://www.studmed.ru/view/volkenshteyn-mv-obschaya-biofizika_66ffd1e76b7.html) (дата обращения: 22.04.2023).
2. Завьялов А. И., Миндиашвили Д. Г., Завьялов Д.А. Теория мышечного сокращения как основа совершенствования процесса подготовки спортсменов. *Вестник КГПУ им. В.П. Астафьева*. 2018;4(46). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/teoriya-myshechnogo-sokrascheniya-kak-osnova-sovershenstvovaniya-protssessa-podgotovki-sportsmenov> (дата обращения: 22.04.2023).
3. Основы физиологии физической нагрузки. URL: <https://lektsia.com/3x6cb.html> (дата обращения: 25.03.2023).
4. Горькавый Н.Н. Сказка об электрической лягушке и итальянском физике Алессандро Вольте, основоположнике учения об электричестве. *Наука и жизнь*. 2017;4. URL: <https://www.nkj.ru/archive/articles/31020/> (дата обращения: 23.03.2023).
5. Персон Р.С. Электромиография в исследованиях человека. М., 1969. 241 с. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01007321744> (дата обращения: 03.03.2023).
6. Сидорчик А. Алессандро Вольта: как сын священника перевернул мир. *Аргументы и факты*. 2015. URL: [http://www.aif.ru/society/science/alessandro\\_volta\\_kak\\_syn\\_svyaschennikaperevernul\\_mir](http://www.aif.ru/society/science/alessandro_volta_kak_syn_svyaschennikaperevernul_mir) (дата обращения: 03.03.2023).
7. Гидиков А.А. Теоретические основы электромиографии: биофизика и физиология двигательных единиц. Л.: Наука, 1975. 181 с. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01006919595> (дата обращения: 23.03.2023).
8. Физические основы электрокардиографии. *Studfiles – Файловый архив студентов*. 2015. URL: <https://studfiles.net/preview/2766659/> (дата обращения: 15.06.2018).
9. Ожгибесова М.А., Ганеева Е.П., Куриляк М.М. Ключевые механизмы мышечного роста. Научное обозрение. *Педагогические науки*. 2019;4–4:31–34. URL: <https://science-pedagogy.ru/ru/article/view?id=2137> (дата обращения: 12.04.2023).
10. Гуревич К.М. Последствие положительных и тормозных раздражителей в двигательной реакции. *Типологические особенности высшей нервной деятельности у человека : сб. науч. трудов*. Под ред. Б.М. Теплова. М., 1963. С. 240–247.

11. Huxley H., Hanson J. Changes in the cross – striations of muscle during contraction and stretch and their structural interpretation. *Nature*. 1954;173:923–976. URL: <http://arch.neicon.ru/xmlui/handle/123456789/2164296?show=full> (дата обращения: 23.03.2023).

12. Денисенко Ю.П., Высочин Ю.В., Яценко Л.Г. Современные представления о структурно-функциональной организации нервно-мышечной системы и механизмов сокращения и расслабления скелетных мышц. *Педагогико-психологические и медико-биологические проблемы физической культуры и спорта*. 2011;4(21). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennye-predstavleniya-o-strukturno-funktsionalnoy-organizatsii-nervno-myshechnoy-sistemy-i-mehanizmov-sokrascheniya-i> (дата обращения: 28.05.2023).

13. Бершицкий С., Цатурян А. Рыцарь науки, сэр Эндрю Хаксли (1917–2012). *Троицкий вариант*. 2012;12(106):10.

14. Einthoven W. Un nouveau galvanomètre. *Archives néerlandaises des sciences exactes et naturelles*. 1901;6:625–633. (In French) URL: [http://wiki-org.ru/wiki/Эйнтховен,\\_Виллем](http://wiki-org.ru/wiki/Эйнтховен,_Виллем) (accessed: 17.07.2018).

### REFERENCES

1. Volkenstein M.V. General biophysics: monograph. Moscow, Nauka, 1978. 592 p. (In Russ.) URL: [https://www.studmed.ru/view/volkenshteyn-mv-obschaya-biofizika\\_66ffd1e76b7.html](https://www.studmed.ru/view/volkenshteyn-mv-obschaya-biofizika_66ffd1e76b7.html) (accessed: 22.04.2023).
2. Zavyalov A.I., Mindiashvili D.G., Zavyalov D.A. Theory of muscle contraction as a basis for improving the process of training athletes. *Vestnik KGPU im. V.P. Astaf'eva* = Bulletin of Krasnoyarsk State Pedagogical University named after V.P. Astaf'ev. 2018;4(46). (In Russ.) URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/teoriya-myshechnogo-sokrascheniya-kak-osnova-sovershenstvovaniya-protssessa-podgotovki-sportsmenov> (accessed: 22.04.2023).
3. Fundamentals of physiology of physical activity. (In Russ.) URL: <https://lektsia.com/3x6cb.html> (accessed: 25.03.2023).
4. Gorkavy N.N. The tale of the electric frog and the Italian physicist Alessandro Volta, the founder of the doctrine of electricity. *Nauka i zhizn' = Science and Life*. 2017;4. (In Russ.) URL: <https://www.nkj.ru/archive/articles/31020/> (accessed: 23.03.2023).
5. Person R.S. Electromyography in human studies. Moscow, 1969. 241 p. (In Russ.) URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01007321744> (accessed: 03.03.2023).
6. Sidorchik A. Alessandro Volta: how the son of a priest turned the world upside down. *Argumenty i fakty = Arguments and Facts*. 2015. (In Russ.) URL: [http://www.aif.ru/society/science/alessandro\\_volta\\_kak\\_syn\\_svyaschennikaperevernul\\_mir](http://www.aif.ru/society/science/alessandro_volta_kak_syn_svyaschennikaperevernul_mir) (accessed: 03.03.2023).
7. Gidikov A.A. Theoretical foundations of electromyography: biophysics and physiology of motor units. Leningrad, Nauka, 1975. (In Russ.) URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01006919595> (accessed: 23.03.2023).

8. Physical fundamentals of electrocardiography. *Studfiles*. 2015. (In Russ.) URL: <https://studfiles.net/preview/2766659/> (accessed: 15.06.2018).

9. Ozhgibesova M.A., Ganeeva E.R., Kurylyak M.M. Key mechanisms of muscle growth. *Nauchnoe obozrenie. Pedagogicheskie nauki = Scientific Review. Pedagogical sciences*. 2019;4–4:31–34. (In Russ.) URL: <https://science-pedagogy.ru/article/view?id=2137> (accessed: 12.04.2023).

10. Gurevich, K.M. The aftereffect of positive and inhibitory stimuli in motor reaction. *Tipologicheskie osobennosti vysshei nervnoi deyatel'nosti u cheloveka: sb. nauch. trudov = Typological features of higher nervous activity in humans: collection of scientific works*. B.M. Teplov (ed.). Moscow, 1963:240–247. (In Russ.)

11. Huxley H., Hanson J. Changes in the cross – striations of muscle during contraction and stretch and their structural interpretation. *Nature*. 1954;173:923–976. URL: <http://arch.neicon.ru/xmlui/ha ndle/123456789/2164296?show=full> (accessed: 23.03.2023).

12. Denisenko Yu.P., Vysochin Yu.V., Yatsenko L.G. Modern ideas about the structural and functional organization of the neuromuscular system and mechanisms of contraction and relaxation of skeletal muscles. *Pedagogiko-psikhologicheskie i mediko-biologicheskie problemy fizicheskoi kul'tury i sporta = Pedagogical-psychological and medico-biological problems of physical culture and sports*. 2011;4(21). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennye-predstavleniya-o-strukturno-funktsionalnoy-organizatsii-nervno-myshechnoy-sistemy-i-mehanizmov-sokrascheniya-i> (accessed: 28.05.2023).

13. Bershitsky S., Tsaturyan A. Knight of Science, Sir Andrew Huxley (1917–2012). *Troitskii variant = Trinity variant*. 2012;12(106):10.

14. Einthoven W. Un nouveau galvanomètre. *Archives néerlandaises des sciences exactes et naturelles*. 1901;6: 625–633. (In French) URL: [http://wiki-org.ru/wiki/Эйнтховен,\\_Виллем](http://wiki-org.ru/wiki/Эйнтховен,_Виллем) (accessed: 17.07.2018).

**Конфликт интересов.** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

#### Информация об авторах

*В.В. Шкарин* – доктор медицинских наук, заведующий кафедрой общественного здоровья и здравоохранения, Волгоградский государственный медицинский университет, Волгоград, Россия; <https://orcid.org/0000-0001-7158-0282>; [vlshkarin@mail.ru](mailto:vlshkarin@mail.ru)

*А.И. Перепелкин* – профессор, доктор медицинских наук, заведующий кафедрой детской хирургии, Волгоградский государственный медицинский университет, Волгоград, Россия; [similipol@mail.ru](mailto:similipol@mail.ru)

*О.С. Чепуряева* – соискатель кафедры нормальной физиологии, Волгоградский государственный медицинский университет, Волгоград, Россия; <https://orcid.org/0000-0003-1642-410X>, [chepurjaeva@mail.ru](mailto:chepurjaeva@mail.ru)

Статья поступила в редакцию 17.05.2023; одобрена после рецензирования 02.09.2023; принята к публикации 28.11.2023.

**Competing interests.** The authors declare that they have no competing interests.

#### Information about the authors

*V.V. Shkarin* – Doctor of Medical Sciences, Head of the Department of Public Health and Public Health, Volgograd State Medical University, Volgograd, Russia; <https://orcid.org/0000-0001-7158-0282>, [vlshkarin@mail.ru](mailto:vlshkarin@mail.ru)

*A.I. Perepelkin* – Professor, Doctor of Medical Sciences, Head of the Department of Pediatric Surgery, Volgograd State Medical University, Volgograd, Russia; [similipol@mail.ru](mailto:similipol@mail.ru)

*O.S. Chepurjaeva* – Candidate of the Department of Normal Physiology, Volgograd State Medical University, Volgograd, Russia; <https://orcid.org/0000-0003-1642-410X>, [chepurjaeva@mail.ru](mailto:chepurjaeva@mail.ru)

The article was submitted 17.05.2023; approved after reviewing 02.09.2023; accepted for publication 28.11.2023.