

© Н. В. Булякова, В. С. Азарова, 2018
УДК 616.748.53-085.849.19:616.833.586/588-001.33:599.323.4

Н. В. Булякова, В. С. Азарова

ВЛИЯНИЕ ГЕЛИЙ-НЕОНОВОГО ЛАЗЕРА НА СТРУКТУРУ И ФУНКЦИЮ СКЕЛЕТНЫХ МЫШЦ ПОСЛЕ ТРАВМЫ НЕРВА РАЗЛИЧНОЙ СТЕПЕНИ ТЯЖЕСТИ

Лаборатория морфологических адаптаций позвоночных (зав. — д-р биол. наук О. Ф. Чернова), ФГБУН «Институт проблем экологии и эволюции им. А. Н. Северцова» РАН, Москва

Цель — изучение воздействия лазерного излучения низкой интенсивности на массу, структуру и функцию икроножных мышц у крыс после разрушения большеберцового нерва различной степени.

Материал и методы. Работа проведена на 20 лабораторных беспородных взрослых крысах-самцах. Повреждение большеберцового нерва (перерезка или удаление фрагмента) производили на расстоянии 1 см от места его вхождения в икроножную мышцу. В течение 1 мес производили облучение области повреждения нерва и всей икроножной мышцы гелий-неоновым лазером с длиной волны 632,8 нм (10 сеансов). На 30-е сутки после операции определяли массу и сократительную функцию мышц. Гистологический анализ регенератов проводили на 32 срезах, сделанных на разных уровнях икроножных мышц.

Результаты. После перерезки нерва масса регенератов и их структура сохранялись в значительной степени. Все регенераты сохраняли сократительную функцию при стимуляции нерва. После утраты фрагмента нерва усиливались дегенерация мышечной ткани и разрастание соединительной ткани, а регенераты отвечали сокращением только на прямое раздражение. Лазеротерапия способствовала большему сохранению массы и структуры икроножных мышц после обоих видов травмы нерва в одинаковой степени. После лазерного воздействия сокращения регенератов при стимуляции нерва наблюдались не только после его перерезки, но и после утраты фрагмента.

Выводы. При травме большеберцового нерва лазеротерапия оказывает положительное воздействие на денервированные икроножные мышцы, способствуя сохранению их массы, структуры и функции. Восстановление функции нерва при утрате фрагмента наблюдалось без имплантации биологического каркаса в область травмы.

Ключевые слова: икроножная мышца, большеберцовый нерв, повреждение, гелий-неоновый лазер

Нарушение иннервации скелетных мышц, вызванное травмой периферических нервов, как правило, сопровождается нарушением структуры и функции мышц. Поиск методов лечения травматических невропатий скелетных мышц сохраняет свою актуальность [2]. Известно, что воздействие лазерного излучения на периферические нервы или денервированные мышцы способствует улучшению восстановительного процесса, стимулируя рост и миелинизацию поврежденных аксонов, восстановление и формирование нервно-мышечных контактов, повышая сократительную активность мышц [7, 10]. При утрате или повреждении фрагмента периферического нерва восстановление сократительной функции скелетных мышц значительно затрудняется. В этом случае положительные результаты лазеротерапии наблюдаются после реконструкции области травмы периферического нерва с помощью имплантации биодеградируемого каркаса, прокладывающего путь растущим аксонам и способствующего врастанию аксонов в мышцу [14]. Однако отмечено также и угнетающее влияние низкоинтенсив-

ного импульсного лазерного излучения на нервную и мышечную ткань. Есть данные о том, что облучение области повреждения нерва с частотой импульса 5 и 20 кГц угнетает регенерацию нерва и способствует уменьшению числа миелиновых волокон в дистальном отрезке поврежденного нерва [9, 13].

Цель эксперимента — исследовать воздействие гелий-неоновых лазеров на массу, структуру и функциональную активность икроножных мышц крыс после различной степени повреждения большеберцового нерва, а именно, перерезки большеберцового нерва или утраты его фрагмента.

Материал и методы. Эксперимент проводили на беспородных взрослых крысах-самцах в возрасте 10–11 мес и массой тела 390–450 г, всего — 16 подопытных крыс и 4 интактных контрольных животных. Были выполнены 2 серии опытов: 1-я серия — без воздействия лазерного излучения (8 крыс) и 2-я серия — с лазеротерапией (8 крыс). В каждой серии животных разделяли на 2 группы по 4 крысы. В 1-й группе на обеих задних конечностях крыс большеберцовый нерв (БН) только перерезали, а во 2-й группе после перерезки нерва удаляли его фрагмент длиной 2 мм. У конт-

Сведения об авторах:

Булякова Нелли Васильевна (e-mail: bulyakova38@mail.ru), Азарова Валентина Сергеевна (e-mail: vazarova@mail.ru), лаборатория морфологических адаптаций позвоночных, ФГБУН «Институт проблем экологии и эволюции им. А. Н. Северцова» РАН, 119071, Москва, Ленинский пр., 33

рольных крыс икроножные мышцы денервации и лазеротерапии не подвергались.

Животных оперировали в асептических условиях под нембуталовым наркозом (0,04 г/кг). На обеих задних конечностях крыс с дорсальной стороны сбривали шерстный покров. Затем в области проекции БН делали небольшой разрез кожи (менее 1 см), вскрывали кроющую мышцу. Стеклопалочкой отделяли БН от окружающих тканей и на расстоянии 0,5–1 см выше места вхождения нерва в икроножную мышцу (ИМ) нерв или полностью перерезали, или удаляли фрагмент. После операции кроющую мышцу и кожу над областью травмы нерва зашивали послойно хирургическим шелком.

Применяли гелий-неоновый лазер (He-Ne-лазер): установка ОКГ-12 (Россия), длина волны — 632,8 нм, режим облучения дистанционный стабильный. На выходе луч лазера был расфокусирован с помощью линзы, диаметр поля облучения 2–2,5 см. Плотность потока мощности составляла 2,5–3 мВт/см². Площадь облучения захватывала область повреждения нерва и ИМ. Каждую конечность крысы облучали в течение 1 мес по 10 процедур: на 1-й и 2-й неделе после операции — по 3 процедуры, на 3-й и 4-й неделе — по 2 процедуры. Длительность процедуры составляла 3 мин. Суммарная доза облучения одной конечности в течение 1 мес составила 4,5–5,4 Дж/см². При этом учитывали, что глубина проникновения лучей He-Ne-лазера в биологические ткани, как известно, составляет 3 мм.

Мышечные регенераты изучали с помощью морфометрических, гистологических и физиологических методов через 30 сут после операции. Определяли относительную массу мышц (% к массе тела). Для гистологического анализа ИМ фиксировали в смеси Карнуа, парафиновые срезы толщиной 7–8 мкм окрашивали железным гематоксилином по Рего с докраской по Маллори. Гистологический анализ регенератов проводили на 32 срезах, сделанных на разных уровнях по всей глубине ИМ. Для анализа функциональной активности ИМ вырезали вместе с небольшим участком БН и сразу же определяли способность мышц к сокращению с помощью аппарата «ЭСЛ-2» (Россия). Сокращение мышцы вызывали раздражением электрическим током большеберцового нерва или прямым воздействием на мышцу, что позволяло судить о степени иннервации мышц.

Количественные данные обрабатывали статистически, о значимости различий судили по величине t-критерия Стьюдента и считали их значимыми при $p < 0,05$. Крысы получали стандартный гранулированный комбикорм и воду в свободном доступе. Животных выводили из опыта передозировкой наркоза. Исследования выполняли с соблюдением «Правил проведения работ с использованием эксперимен-

тальных животных», пользуясь разрешением этического комитета (№ 13 от 30 ноября 2017 г.).

Результаты исследования. У крыс в 1-й и 2-й сериях опытов после обоих видов травмы БН относительная масса денервированных икроножных мышц снижается и через 30 сут значительно отстает от контроля (табл. 1).

Кроме того, у подопытных животных отмечались различия в зависимости от степени повреждения БН и лазеротерапии. В 1-й серии без лазеротерапии масса мышц после удаления фрагмента была значимо ниже, чем после перерезки нерва. Во 2-й серии с лазеротерапией масса мышц после перерезки нерва и после удаления фрагмента не имела различий. В то же время, по сравнению с 1-й серией (без лазеротерапии) масса мышц была значимо выше как после перерезки нерва, так и после удаления фрагмента нерва ($p < 0,01$).

У контрольных крыс латеральная и медиальная головки ИМ были крупными, соединительнотканые септы в них были узкими. Гистологический анализ показал, что в мышечной ткани практически все мышечные волокна имели одинаковый диаметр, ядра веретеновидной формы располагались по периферии мышечного волокна.

У подопытных крыс травма БН и лазеротерапия оказывали влияние на структуру восстанавливающихся ИМ. Так, на 30-е сутки после травмы БН в облученных и необлученных лазером регенератах сохранялись медиальная и латеральная головки, но они были значительно меньше, чем в контрольных мышцах. Различия в структуре регенератов носили в основном количественный характер.

В 1-й серии без лазеротерапии после перерезки БН в регенератах наблюдалось в основном увеличение количества соединительной ткани в септах и между пучками мышечных волокон по сравнению с ИМ у контрольных крыс. Встречались небольшие скопления жировых клеток. Все мышечные волокна имели четкое продольное направление. В мышечной ткани

Таблица 1

Масса икроножных мышц через 1 мес после повреждения большеберцового нерва (БН) в различной степени тяжести и лазеротерапии (% от массы тела)

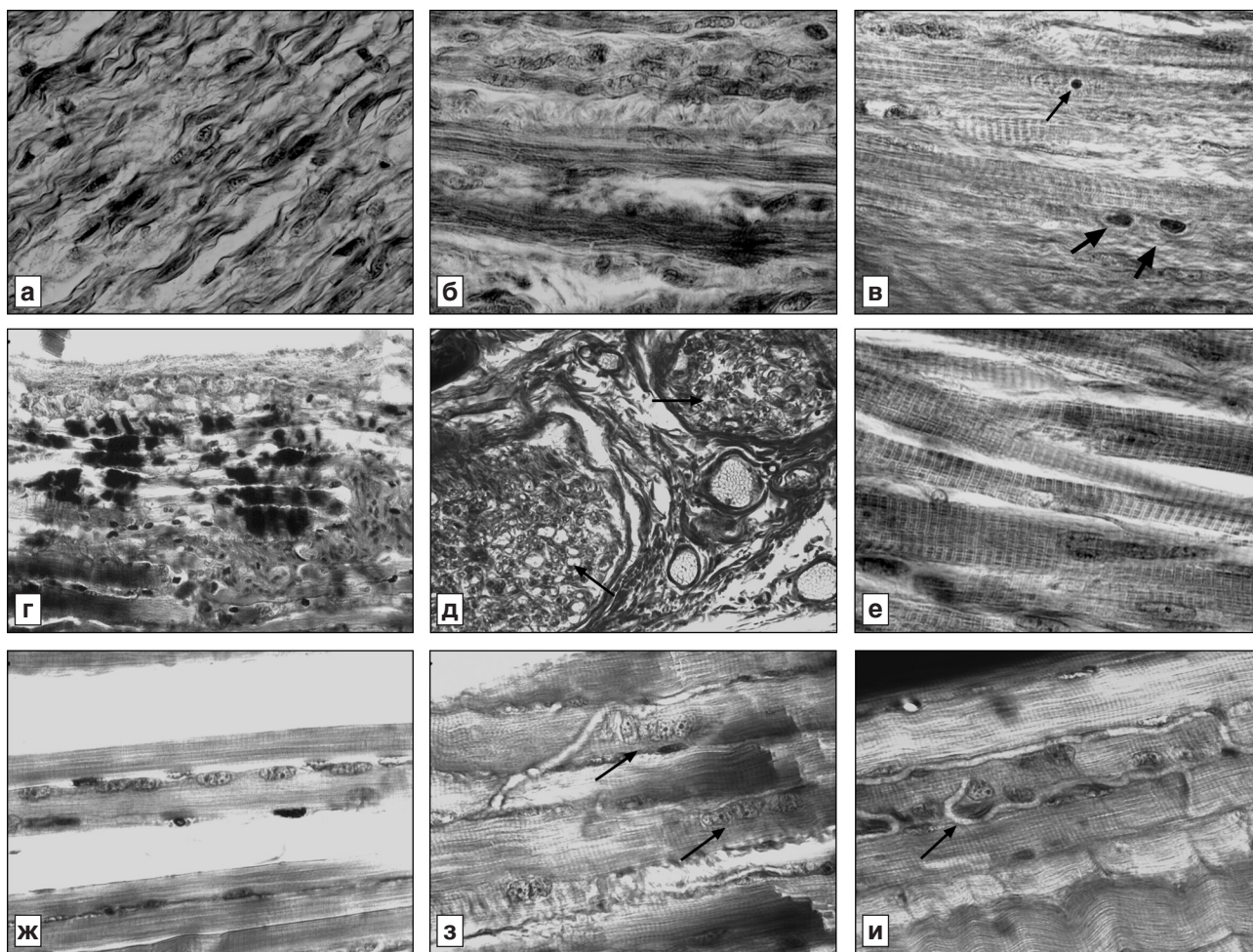
Контроль	1-я серия: без лазеротерапии		2-я серия: с лазеротерапией	
	1-я группа: полная перерезка БН	2-я группа: удаление 2 мм БН	1-я группа: полная перерезка БН	2-я группа: удаление 2 мм БН
Без травмы нерва и лазеротерапии				
0,55±0,02 %	0,22±0,0075 % ($p < 0,01$)*	0,18±0,0140 % ($p < 0,01$)* ($p < 0,05$)**	0,24±0,0045 % ($p < 0,01$)* ($p < 0,05$ ***)	0,25±0,0067 % ($p < 0,01$)* ($p < 0,01$ ***)

* Значимые различия между опытом и контролем; ** значимые различия в 1-й серии между двумя группами животных; *** значимые различия соответствующих показателей между 1-й и 2-й сериями.

регенератов в их проксимальном отделе места-ми наблюдались небольшие участки мышечных волокон с реактивными изменениями мышечных ядер. Крупные светлые овальные ядра скапливались по 6–8 вместе или собирались в короткие цепочки на периферии и в центре мышечного волокна. Дегенерирующие мышечные волокна отмечались крайне редко. Врастающий БН имел нормальное строение, без признаков повреждения (рисунк, а).

В 1-й серии без лазеротерапии после удаления фрагмента БН в мышечной ткани крыс значительно расширялись соединительнотканые септы. Увеличивалось количество жировой ткани. Чаше,

чем после перерезки БН, встречались участки узких рыхло расположенных мышечных волокон (см. рисунок, б). В некоторых местах регенерата отмечались участки мышечных волокон, имеющих волнистый ход в результате отсутствия продольного натяжения. Наблюдались мышечные волокна, в которых, наряду с крупными овальными мышечными ядрами с гипертрофированными ядрышками, встречались ядра, подвергавшиеся пикнозу (см. рисунок, в). Иногда сравнительно большие группы узких мышечных волокон содержали погибающие темноокрашенные мышечные ядра. Встречались довольно широкие участки мышечных волокон, подвергавшиеся ценке-



Структурные изменения в денервированной мышечной ткани икроножных мышц у взрослых крыс на 30-е сутки после повреждения большеберцового нерва (БН).

а–д — 1-я серия без лазеротерапии; е–и — 2-я серия с лазеротерапией. а — БН, вступающий в икроножную мышцу после поперечной перерезки, имеет нормальное строение; б — участки узких рыхло расположенных мышечных волокон в регенератах после удаления фрагмента нерва; в — мышечные волокна, содержащие крупные овальные мышечные ядра с гипертрофированными ядрышками (тонкая стрелка), и ядра, подвергавшиеся пикнозу (толстые стрелки), в регенератах после удаления фрагмента нерва; г — участки мышечных волокон, подвергавшиеся ценкеровскому некрозу в регенератах после удаления фрагмента нерва; д — дегенерация дистального конца БН (стрелки), оставшегося в мышце после удаления фрагмента нерва во время операции; е — участки мышечных волокон с четкой поперечной исчерченностью миофибрилл и реактивными изменениями ядер (светлые овальные ядра) в регенератах после перерезки нерва; ж, з — участки широких и узких мышечных волокон с активными ядрами, крупными ядрышками, образующими цепочки или скопления ядер (стрелки) в регенератах после удаления фрагмента нерва; и — усиление микроциркуляции мышечных волокон, разветвленная сеть капилляров (стрелка) в регенератах после удаления фрагмента нерва. Окраска гематоксилином и по Маллори. Ув.: а, д — 400; б, в, е, ж, з, и — 1000; г — 100

ровскому некрозу (см. рисунок, г). В некоторых регенератах в процесс дегенерации вовлекалась мышечная ткань в одной из головок ИМ. На входе в мышцу область повреждения нерва была утолщена в 1,5 раза, а на поверхности кожи в этой области появлялось образование в виде нароста. Здесь разрасталась жировая и рыхлая соединительная ткань. Дистальный конец большеберцового нерва, оставшийся в мышце после удаления фрагмента во время операции, выявлялся в проксимальной части регенерата и подвергался дегенерации (см. рисунок, д). Встречались также гиперемизированные кровеносные сосуды с расширенным периваскулярным пространством и повышенной лейкоцитарной инфильтрацией различной интенсивности вследствие воспалительного процесса в мышце.

Во 2-й серии с лазеротерапией в структуре регенератов как после перерезки БН, так и после удаления его фрагмента заметных различий не выявлено. Отмечали нарастание волокон соединительной ткани, фибробластов в интерстициальном пространстве между пучками мышечных волокон. Встречались участки мышечных волокон с четкой поперечной исчерченностью миофибрилл и реактивными изменениями ядер (светлые овальные ядра) (см. рисунок, е). Много широких и узких мышечных волокон с активными ядрами, крупными ядрышками, образующими в мышечном волокне сравнительно длинные цепочки или скопления (см. рисунок, ж, з). Встречались также пучки мышечных волокон, в которых мышечные ядра веретеновидной формы лежали под сарколеммой мышечного волокна. Наблюдали усложнение микроциркуляторного русла в мышечной ткани, формирование разветвленной сети капилляров (см. рисунок, и). В просветах некоторых крупных кровеносных сосудов, а также в интерстициальном пространстве наблюдали единичные лейкоциты. Иногда в регенератах отмечали ишемизированные мышечные волокна гомогенной темной окраски, лежащие по 2–3 вместе, в которых миофибриллы и мышечные ядра не выявлялись железным гематоксилином по Рего. Область вхождения БН в мышцу увели-

чивалась в 2 раза. Наблюдали разрастание рыхлой соединительной ткани и формирование участков жировой ткани. В регенератах, сокращающихся при раздражении нерва, врастающий нерв не имел признаков разрушения, наблюдались ядра активно делящихся леммоцитов.

Анализ сократительной реакции ИМ на 30-е сутки после денервации и лазерного воздействия представлен в *табл. 2*.

После обоих видов травмы БН с лазеротерапией или без нее все ИМ у взрослых крыс сокращались в ответ на прямое воздействие электрических импульсов. При раздражении БН электрическим током в 1-й серии без лазеротерапии сокращения мышц после перерезки нерва наблюдались в 100% случаев, в то время как после удаления его фрагмента во всех регенератах сокращение отсутствовало.

Во 2-й серии лазеротерапия оказывала положительное влияние на проведение нервного импульса по БН как после его перерезки, так и после удаления его фрагмента. Однако процесс восстановления функции нерва после его перерезки замедлялся в 2 раза по сравнению с соответствующей группой крыс 1-й серии. После удаления фрагмента нерва четверть регенератов сокращались при стимуляции нерва. Без лазеротерапии проведение импульса через нерв отсутствовало, и сокращения мышц не наблюдались в отличие от ИМ соответствующей группы крыс 1-й серии.

Обсуждение полученных данных. Показано, что изменения массы, структуры и функциональной активности ИМ у взрослых крыс определяются степенью повреждения БН. Воздействие излучения He-Ne-лазера после травмы БН различной интенсивности оказывает стимулирующее действие на ряд показателей восстановления ИМ. Дегенеративные изменения в мышечной ткани, связанные с денервацией, в течение 30 сут в условиях лазеротерапии замедляются. Наши наблюдения согласуются с данными о том, что лазеротерапия на ранних стадиях мышечной атрофии замедляет процесс денервации, поддерживая активность креатинкиназы и сохраняя функцию ацетилхоли-

Таблица 2

Сократительная реакция икроножных мышц через 30 сут после травмы большеберцового нерва (БН) различной степени тяжести и лазеротерапии

Характер сокращения	1-я серия: без лазеротерапии		2-я серия: с лазеротерапией	
	1-я группа: полная перерезка БН	2-я группа: удаление 2 мм БН	1-я группа: полная перерезка БН	2-я группа: удаление 2 мм БН
При стимуляции через нерв, %	100 активно	0	50	25
При прямой стимуляции мышцы, %	100	100	100	100

новых рецепторов в мышце [13]. Не исключено, что скопления округлых мышечных ядер под сарколеммой мышечных волокон, отмеченные нами на гистологических срезах, соответствуют зонам формирования нервно-мышечных контактов. Низкоинтенсивное лазерное облучение скелетных мышц уменьшает деструктивные процессы и апоптоз мышечных клеток, повышает пролиферативную активность «дремлющих» мышечных клеток-сателлитов, усиливает микроциркуляцию и обменные процессы в мышечной ткани [5, 9, 11, 12].

Известно, что прямая электростимуляция мышцы позволяет вызвать ее сокращение [3]. Нами показано, что в течение 1 мес после повреждения БН во многих денервированных ИМ сохранялась жизнеспособность мышечных структур, отвечающих за проведение электрического импульса в мышце.

При стимуляции БН ответная реакция необлученных и облученных лазером регенератов различалась в зависимости от степени травмы нерва. Так, после перерезки нерва без лазеротерапии (1-я серия) все регенераты на 30-е сутки отвечали сокращением, что согласуется с данными о меньшей травматичности простой перерезки [1]. При удалении фрагмента нерва сокращение ИМ в ответ на раздражение БН отсутствовало, тогда как после воздействия лазерного излучения (2-я серия) проведение нервного импульса через БН на 30-е сутки наблюдалось при обоих видах травмы нерва.

Выявленные различия в иннервации регенератов 1-й серии и 2-й серии, возможно, объясняются тем, что в области вхождения БН в ИМ происходит разрастание рыхлой соединительной и жировой тканей. Известно, что регенеративный рост нервных волокон при неблагоприятных условиях осложняется развитием ишемии и гипоксии, эндоневральным фиброзом, гибелью леммоцитов, низким уровнем экспрессии нейротрофических факторов, образованием нейромы, что значительно ограничивает успех реиннервации скелетных мышц [4]. Без лазеротерапии после удаления фрагмента нерва область травмы может замещаться соединительной тканью. Лазеротерапия оказывает стимулирующее влияние не только на рост соединительнотканых элементов в области повреждения нерва, кроющей мышцы и кожи во время операции, но и рост периферических отделов аксонов, что способствует более активному врастанию их в область травмы нерва и мышцу,

ускоряя реиннервацию и повышая жизнеспособность мышечной ткани.

Таким образом, воздействие излучения He-Ne лазера с длиной волны 632,8 нм по 10 экспозиций длительностью 3 мин с суммарной дозой 4,5–5,4 Дж/см² в течение 1 мес на поврежденные БН и ИМ улучшает восстановление денервированной мышцы. При этом происходят торможение дегенеративных процессов в денервированной мышечной ткани, восстановление ее сократительной функции и, как следствие, увеличение массы регенератов уже через 30 сут после простой перерезки БН или утраты его фрагмента по сравнению с регенератами без лазеротерапии. Важно, что в условиях лазеротерапии восстановление функции БН после утраты его фрагмента возможно без имплантации биологического каркаса в область травмы.

Вклад авторов:

Концепция и дизайн исследования: Н. В. Б.

Сбор и обработка материала: Н. В. Б., В. С. А.

Статистическая обработка данных: Н. В. Б.

Анализ и интерпретация данных: Н. В. Б.

Написание текста: Н. В. Б.

Авторы сообщают об отсутствии в статье конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Женеvская Р.П. Нервно-трофическая регуляция пластической активности мышечной ткани. М.: Наука, 1974 [Zhenevskaya R. P. Nervno-troficheskaya regulatsiya plasticheskoi aktivnosti myshechnoi tkani. Moscow: Nauka; 1974. In Russ.].
2. Живолупов С.А., Гневывшев Е.Н., Рашидов Н.А., Самарцев И.Н. Нейропластические закономерности восстановления функций при травматических невропатиях и плексопатиях // Вестник Российской военно-медицинской академии. 2015. Т. 1, № 49. С. 81–90 [Zhilovupov S. A., Gnevyshev E. N., Rashidov N. A., Samartsev I. N. Neiroplasticheskie zakonomernosti vosstanovleniya funktsii pri travmaticheskikh nevroptiyakh i pleksopatiyakh // Vestnik Rossiiskoi voenno-meditsinskoi akademii. 2015. Vol. 1, № 49. P. 81–90. In Russ.].
3. Мак-Комас А.Дж. Скелетные мышцы. Киев: Олимпийская литература, 2001. 406 с. [McComas A. Skeletnye myshsy. Kiev: Olimpiiskaya literature, 2001. 406 p. In Russ.].
4. Масгутов Р.Ф., Ризванов А.А., Богов А.А. (мл), Галлямов А.Р., Киясов А.П., Богов А.А. Современные тенденции лечения повреждений периферических нервов // Практическая медицина. 2013. Т. 2, № 1–2 (69). С. 99–103 [Masgutov R. F., Rizvanov A. A., Bogov A. A. (ml), Gallyamov A. R., Kiyasov A. P., Bogov A. A. Sovremennye tendentsii lecheniya povrezhdenii perifericheskikh nervov // Prakticheskaya meditsina. 2013. Vol. 2, № 1–2 (69). P. 99–103. In Russ.].
5. Павлов С.Е., Разумов А.Н., Павлов А.С. Лазерная стимуляция в медико-биологическом обеспечении подготовки квалифицированных спортсменов. М.: Спорт, 2017. 216 с.

- [Pavlov S.E., Razumov A.N., Pavlov A.S. Lazernaya stimulyatsiya v mediko-biologicheskom obespechenii podgotovki kvalifitsirovannykh sportsmenov. M.: Sport, 2017. 216 p. In Russ.].
6. Сайткулов К.И., Челышев Ю.А. Реакции нервной ткани на действие низкоинтенсивного лазерного излучения // Казанский мед. журн. 1998. № 3. С. 203–209 [Saitkulov K.I., Chelyshev Yu.A. Reaktsii nervnoi tkani na deistvie nizkointensivnogo lazernogo izlucheniya // Kazanskii meditsinskii zhurnal. 1998. № 3. P. 203–209. In Russ.].
 7. Улащик В.С., Морозова И.Л., Нежута А.Ю. Изменения афферентной импульсации периферического нерва под влиянием поляризованного света различной длины волны // Вопросы курортологии, физиотерапии и лечебной физической культуры. 2007. № 6. С. 3–6 [Ulashchik V.S., Morozova I.L., Nezhuta A.Yu. Izmeneniya afferentnoi impul'satsii perifericheskogo nerva pod vliyaniem polarizovannogo sveta razlichnoi dliny volny // Voprosy kurortologii, fizioterapii i lechebnoi fizicheskoi kul'tury. 2007. № 6. P. 3–6. In Russ.].
 8. Chen Y.-Sh., Hsu Sh.-F., Chiu C.-W., Lin J.G., Chen C.T., Yao C.H. Effect of low-power pulsed laser on peripheral nerve regeneration in rats // *Microsurgery*. 2005. Vol. 25. P. 83–89. Doi:10.1002/micr.20079.
 9. Luo L., Sun Z., Zhang L., Li X., Dong Y., Liu T.C. Effects of low-level laser therapy on ROS homeostasis and expression of IGF-1 and TGF- β 1 in skeletal muscle during the repair process // *Lasers Med. Sci.* 2013. Vol. 28, № 3. P. 725–734. Doi: 10.1007/s10103-012-1133-0.
 10. Mandelbaum-Livnat M.M., Almog M., Nissan M., Loeb E., Shapira Y., Rochkind Sh. Photobiomodulation triple treatment in peripheral nerve injury: Nerve and muscle response // *Photomed Laser Surgery*. 2016. Vol. 34, № 12. P. 638–645. Doi: 10.1089/pho.2016.4095.
 11. Nakano J., Kataoka H., Sakamoto J., Origuchi T., Okita M., Yoshimura T. Low-level laser irradiation promotes the recovery of atrophied gastrocnemius skeletal muscle in rats // *Exp. Physiol.* 2009. Vol. 94, № 9. P. 1005–1015. Doi: 10.1113/expphysiol.2009.047738.
 12. Ribeiro B.G., Alves A.N., Santos L.D., Fernandes K.P., Cantero T.M., Gomes M.T., França C.M., Silva D.F., Bussadori S.K., Mesquita-Ferrari R.A. The effect of low-level laser therapy (LLLT) applied prior to muscle injury // *Lasers Surg. Med.* 2015. Vol. 47. P. 571–578. Doi: 10.1002/lsm.22381.
 13. Rochkind S., Shainberg A. Protective effect of laser phototherapy on acetylcholine receptors and creatine kinase activity in denervated muscle // *Photomed Laser Surg.* 2013. Vol. 31, № 10. P. 499–504.
 14. Shen C.C., Yang Y.C., Liu B.S. Large-area irradiated low-level laser effect in a biodegradable nerve guide conduit on neural regeneration of peripheral nerve injury in rats // *Injury*. 2011. Vol. 42, № 8. P. 803–813.

Поступила в редакцию 06.12.2017

Получена после доработки 11.02.2018

EFFECT OF HENE LASER ON SKELETAL MUSCLE STRUCTURE AND FUNCTION AFTER NERVE INJURY OF VARIOUS DEGREES OF SEVERITY

N. V. Bulyakova, V. S. Azarova

Objective — to investigate the effect of low-intensity laser radiation on the mass, structure and function of gastrocnemius muscles in rats after varying degrees of destruction of the tibial nerve.

Materials and methods. The work was carried out on laboratory outbred adult male rats (n=20). The tibial nerve was damaged at a distance $\approx$ 1 cm from the site of its the entry of into the gastrocnemius muscle by cutting or fragment removal. Laser irradiation of the area of nerve injury and the whole gastrocnemius muscle was performed for a month (10 sessions) with a HeNe laser (at a wavelength of 632.8 nm). On the 30th day after the operation, the mass and contractile function of the muscles were determined. Histological analysis of the regenerates was performed in 32 sections at different levels of the gastrocnemius muscles.

Results. After nerve cutting, the mass of regenerates and the structure were preserved to a significant extent. All the regenerates preserved their contractile function during nerve stimulation. After the loss of a nerve fragment, a degeneration of muscle tissue and proliferation of connective tissue were markedly increased, and regenerates responded by contraction only to direct stimulation. Laser therapy contributed to a greater preservation of the mass and structure of gastrocnemius muscles, and after both types of nerve injury to approximately the same extent. Contraction of regenerates during stimulation of the nerve was noted not only after its cutting, but also after the loss of the fragment.

Conclusions. In both types of trauma of the tibial nerve, laser therapy of denervated gastrocnemius muscles had a positive effect on their mass, structure and function. Moreover, restoration of the nerve function after the loss of its fragment was observed without the implantation of the biological scaffold in the area of injury.

Key words: *gastrocnemius muscle, tibial nerve, injury, HeNe laser*

Laboratory of Morphological Adaptations of Vertebrates, RAS A. N. Severtsov Institute of Ecology and Evolution, 33 Leninskiy Prospekt, Moscow 119071