

УДК 612.74

ОСОБЕННОСТИ АКТИВАЦИИ И РЕКРУТИРОВАНИЯ МЫШЦ ГОЛЕНИ ЧЕЛОВЕКА ПОСЛЕ ИНТЕРВАЛЬНЫХ ГИПОКСИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

А.А. Фокин, А.С. Шилов

Сыктывкарский государственный университет

Представлены результаты изменений активации и рекрутирования мышечных волокон камбаловидной (*m. soleus*) и медиальной икроножной (*m. gastrocnemius*) мышц в период реадaptации после интервальных гипоксических воздействий на организм человека в течение 16 суток. В результате наблюдается устойчивая тенденция облегченного рекрутирования мотонейронов в период реадaptации, особенно на 1-е сутки, увеличение интенсивности активации прямого М-ответа в период реадaptации, после интервальных гипоксических воздействий как тонической, так и фазической мышц.

Ключевые слова: гипоксия, прямой М-ответ, двигательная единица, рекрутирование.

Введение. Знания в области спинальных механизмов осуществления движений, могут быть существенно углублены, при изучении особенностей прямых моторных ответов мышц, их рекрутирования при действии стрессорных факторов различного генеза на организм человека, в данном случае интервальной нормобарической гипоксической гипоксии [1; 3–5]. Выявление особенностей регуляции периферического звена нервно-мышечного аппарата на спинальном уровне способствует более детальному изучению механизмов развития адаптационных и патологических процессов в нервно-мышечной системе, что позволяет контролировать функциональное состояние нервно-мышечного аппарата, в различных условиях деятельности (спортивной, трудовой и т.д.).

Одним из косвенных показателей деятельности нервно-мышечного прибора является моторный ответ (М-ответ) – суммарный электрический потенциал мышцы в ответ на одиночное электрическое раздражение двигательного или смешанного нерва. Супрамаксимальная стимуляция нерва, позволяющая регистрировать электрический ответ всех двигательных единиц мышцы, является стандартизированной в регистрации и оценке М-ответа, а также методике оценки скорости проведения по двигательным волокнам. Анализируемыми параметрами М-ответа являются: латентный период, амплитуда, длительность, площадь и форма. М-ответ отражает непосредственную активацию мышцы, являясь показателем возбудимости мышечных волокон [2].

Целью настоящего исследования являлся анализ особенностей активации и рекрутирования прямого мышечного ответа,

регистрируемого с камбаловидной (*m. soleus*) и медиальной икроножной мышц (*m. gastrocnemius*) при стимуляции заднего смешанного большеберцового нерва после курса интервальных гипоксических воздействий (ИГВ).

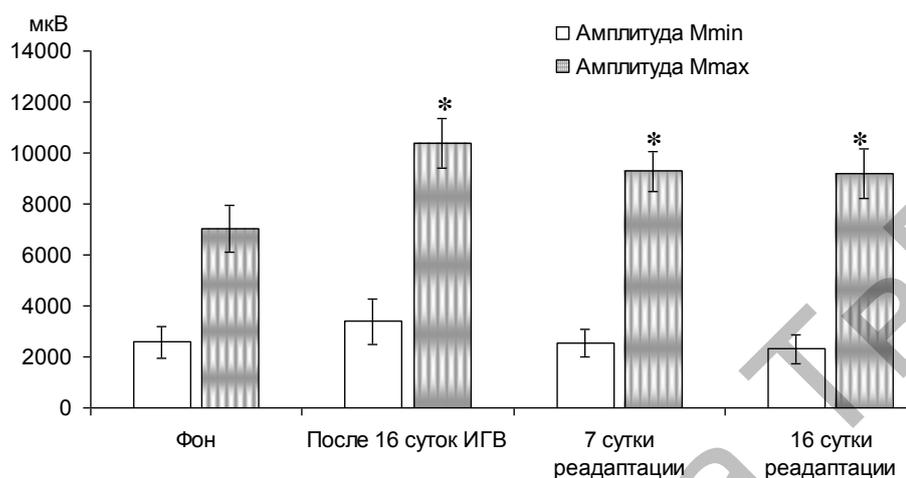
Методика. Исследования выполнены на практически здоровых молодых мужчинах 18-24 лет ($n=31$). Виды воздействий хронологически были выстроены следующим образом: в контрольном исследовании проводилась электрическая стимуляционная нейромиография (ЭНМГ методика регистрации М-ответов); далее в течение 16 суток исследуемые подвергались дозированным нормобарическим ИГВ по специально разработанному протоколу. Для отражения изменений рефлекторной возбудимости спинальных структур и закрепившихся следовых реакций, ЭНМГ была проведена на 1-е, 7-е, и 16-е сутки реадaptации после ИГВ. Для обработки полученных данных применялись методы вариационной статистики и метод интерполяции. Анализировались амплитудно-временные характеристики прямых моторных ответов, получаемых с *m. gastrocnemius* и *m. soleus*. Исследования выполнены при одинаковых микроклиматических условиях: относительная влажность воздуха – 60-70%; атмосферное давление – 745-747 мм рт. ст. (993-996 гПА); температура окружающей среды – $23\pm 2^\circ\text{C}$. Необходимыми условиями для исследуемых являлись: отсутствие физических и психических нагрузок как минимум за сутки до нейромиографических скринингов и функциональных проб с острой гипоксией, запрет на употребление фармакологических препаратов, алкогольных и «энергетических» напитков. Для регистрации моторных ответов мышц использовали нейромышечный анализатор «Нейромиан НМА 4-01» (Таганрог, Россия). При регистрации прямого М-ответа исследуемым накладывали хлорсеребряные отводящие электроды на «активные точки» *m. soleus* и *m. gastrocnemius* левой ноги и производили стимуляцию *n. tibialis* (большеберцовый нерв) в подколенной ямке монополярным электродом. Стимуляция была нарастающей с 12 мА до 50 мА с дискретом 2 мА и частотой 0,1 Гц.

Исследуемые подвергались дозированному воздействию (ДВ) интервальными нормобарическими гипоксическими нормокапническими экспозициями (дыхание воздухом с содержанием O_2 12,3%, CO_2 – 0,03%, что соответствует примерно 5000 м над уровнем моря) ежедневно в течение 16 суток. Каждый сеанс ИГВ включал от 6 до 10 повторных гипоксических экспозиций (гипоксических нагрузок), которые предполагали 5-минутное дыхание воздухом, обедненным O_2 , перемежающееся (в зависимости от сеанса) от 2-х до 1-минутными (в зависимости от сеанса) нормоксическими респирациями (дыхание атмосферным воздухом с содержанием O_2 $20,94\pm 0,2\%$; CO_2 0,03%. Гипоксический воздух (ГВ) приготавливался адсорбированным способом (короткоцикловая адсорбция на цеолитах под давлением)

кислородным медицинским гипоксикатором-концентратором «Onyx PSA Oxygen Generator» (форма «AirSep Corporation», США), переоборудованным НИИ физиологии СО РАМН (Новосибирск, Россия) в дыхательной тренажер согласно свидетельству на полезную модель № 24098 от 27 июля 2002 года. Контроль за содержанием O_2 во вдыхаемом воздухе осуществлялся анализатором кислорода «OxiQuant B» (EnviteC, Германия) с помощью датчика кислорода «Goel 369» (Greisinger Electronic, Германия). В соответствии с требуемым гипоксическим режимом во время проведения всех ИГВ дыхательную (гипоксическую) смесь тарировали по O_2 со строго определенной периодичностью каждые 2 минуты. При проведении ИГВ исследуемые находились в положении сидя в максимально удобной для себя позе. На каждой минуте ИГВ портативным пульсоксиметром «Nonin» (Nonin Medical Inc., США) регистрировались насыщение артериальной крови кислородом ($SpO_2\%$) и частота сердечных сокращений (ЧСС).

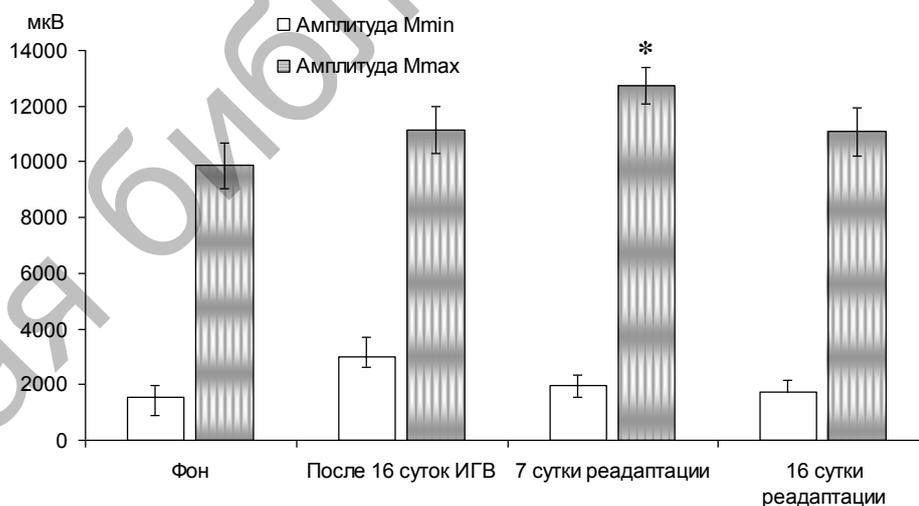
Результаты и обсуждения. Рекрутирование М-ответа постурально-тетанической мускулатуры человека после ИГВ носило непостоянный характер, однако наблюдалась устойчивая тенденция облегченного рекрутирования мотонейронов в период реадaptации, особенно на 1-е сутки. Интенсивность активации прямого М-ответа в период реадaptации после ИГВ как тонической, так и фазической мышц увеличивалась, о чем свидетельствует значимое ($p < 0,05$) увеличение минимальных и максимальных по амплитуде моторных ответов, получаемых с *m. gastrocnemius* и *m. soleus*, однако у последней наблюдался более поздний, отставленный во времени, эффект гиперрефлексии по сравнению с *m. gastrocnemius*. В период реадaptации вплоть до 16 суток имеет место повышение возбудимости мотонейронных пулов исследуемых мышц, по-видимому, за счет снижения порога активации двигательных единиц *m. gastrocnemius* и *m. soleus*.

Анализ амплитуд прямого мышечного ответа *m. gastrocnemius* (рис. 1.) после ИГВ, показал следующее, минимальная амплитуда М-ответа (M_{min}) значимо не отличалась во всем периоде реадaptации, однако после увеличения относительно контроля на 1-е сутки реадaptации, в дальнейшем наблюдалось снижение M_{min} . Максимальная амплитуда М-ответа (M_{max}) значимо ($p < 0,05$) увеличилась на 1-е сутки реадaptации, на 7-е и 16-е сутки реадaptации M_{max} имела тенденцию к снижению.



Р и с . 1 . Изменения амплитуд М-ответов *m. gastrocnemius* в контроле и в разных периодах реадaptации после курса ИГВ ($M \pm m$): * – $p < 0,05$

Минимальная амплитуда M_{\min} *m. soleus* (рис. 2.) после ИГВ, также значимо не изменялась, наибольший ее прирост приходится на 1-е сутки реадaptации, в остальном периоде реадaptации M_{\min} и M_{\max} увеличились на уровне тенденции ($p > 0,05$) на 1-е сутки реадaptации, значимо ($p < 0,05$) увеличились только на 7-е сутки реадaptации, а на 16-е сутки реадaptации M_{\max} имела отрицательную динамику.

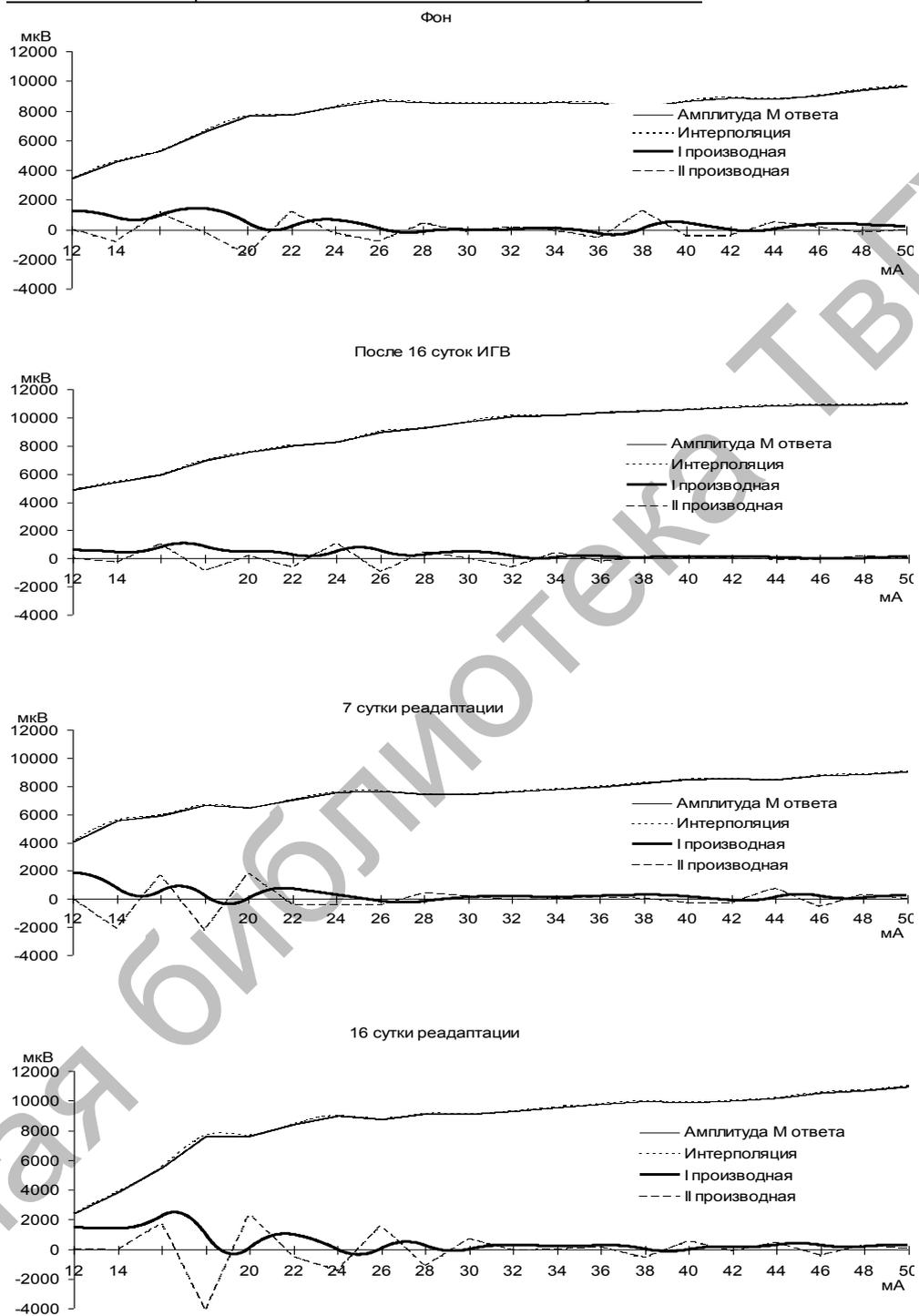


Р и с . 2 . Изменения амплитуд М-ответов *m. soleus* в контроле и в разных периодах реадaptации после курса ИГВ ($M \pm m$): * – $p < 0,05$

При интерполяционном анализе *m. soleus* (рис. 3.), наблюдалось определенное снижение диапазона I и II производных интерполяции М-ответа в 1-е сутки реадaptации, примечательно, что при этом

максимальный М-ответ (M_{max}) значимо увеличивался ($p < 0,05$) также на 1-е сутки реадaptации, количество максимальных и минимальных пиков диапазона в контроле составило 6 положительных и 5 отрицательных, на 1-е сутки реадaptации показатели поменялись местами, стало 5 положительных, 6 отрицательных. В дальнейшем, на 7-е и 16-е сутки реадaptации, происходило увеличение диапазона I и II производных интерполяции, что особенно было ярко выражено на 16-е сутки реадaptации, количество минимальных и максимальных пиков диапазона интерполяции на 7-е сутки составило 4 максимальных и 4 минимальных, на 16-е сутки 6 максимальных и 5 минимальных. Значительно увеличился диапазон I и II производных интерполяции на 16-е сутки реадaptации, относительно контроля и 1-х суток реадaptации, для сравнения при силе стимуляции 18 мА значение минимального пика диапазона II производной интерполяции в контроле составило $-125,872$, на 1-е сутки реадaptации $-826,613$, на 16-е сутки реадaptации $-3949,16$. Важно отметить, что и в контроле и в периоде реадaptации диапазон I и II производных интерполяции значительно изменялся в диапазоне силы тока 12-30 мА.

Интерполяционный анализ *m. gastrocnemius* показал (рис. 4.), что на 1-е сутки реадaptации наблюдается снижение диапазона I и II производной интерполяции, относительно контроля, 7-х и 16-х суток реадaptации; в контроле количество максимальных пиков диапазона – 4, минимальных – 5, на 1-е сутки реадaptации – 4 максимальных, 4 минимальных, на 7-е сутки реадaptации – 3 максимальных, 3 минимальных, на 16-е сутки реадaptации – 4 максимальных, 4 минимальных, однако на 7-е и 16-е сутки реадaptации происходило увеличение диапазона I и II производных интерполяции, причем, в большей степени на 16-е сутки реадaptации. Изменение диапазона производных интерполяции, также наблюдалось в диапазоне силы тока 12-32 мА.



Р и с . 3 . Интерполяция М-ответа *m. soleus*

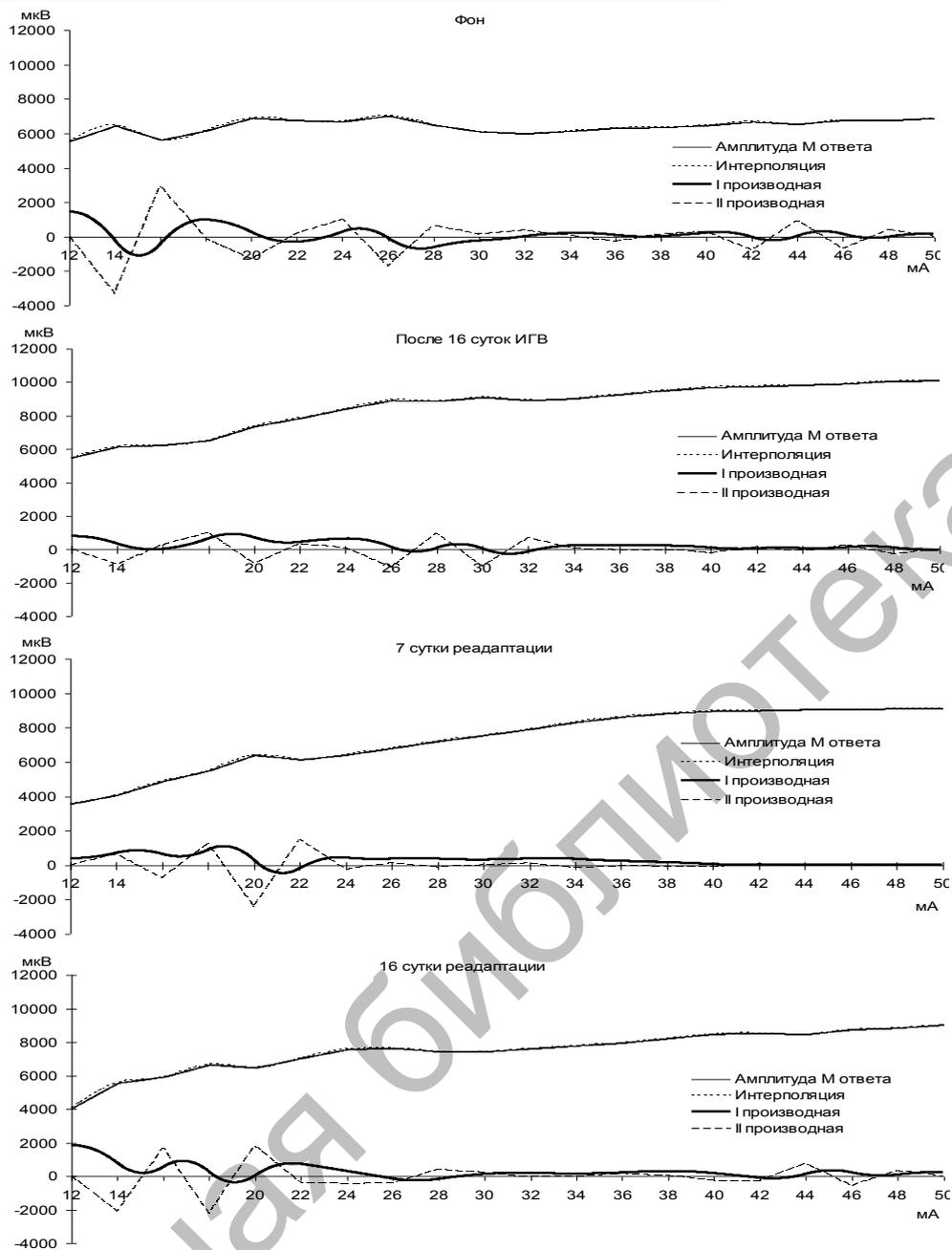


Рис. 4. Интерполяция М-ответа *m. gastrocnemius*

При сравнении интерполяции М-ответа *m. soleus* и *m. gastrocnemius* наблюдалась схожая картина, снижение диапазона I и II производных интерполяции относительно контроля на 1-е сутки реадaptации, а затем его увеличение на 7-е и еще в большей мере на 16-е сутки реадaptации. Определенной закономерности по количеству

максимальных и минимальных пиков диапазона производных интерполяции не наблюдалось.

Заключение. Рекрутирование М-ответа постурально-тетанической мускулатуры человека после ИГВ носит непостоянный характер, однако наблюдается устойчивая тенденция облегченного рекрутирования мотонейронов в период реадaptации, особенно на 1-е сутки. Интенсивность активации прямого М-ответа в период реадaptации после ИГВ как тонической, так и фазической мышц увеличивалась, о чем свидетельствует значимое ($p < 0,05$) увеличение M_{\max} и M_{\min} *m. gastrocnemius* и *m. soleus*, однако у последней наблюдается более поздний, отставленный во времени, эффект гиперрефлексии по сравнению с *m. gastrocnemius*. В период реадaptации имеет место повышение возбудимости мотонейронных пулов, за счет снижения, по-видимому, порога активации двигательных единиц *m. gastrocnemius* и *m. soleus*.

Список литературы

1. Горанчук В.В., Сапова Н.И., Иванов А.О. Гипокситерапия. СПб., 2003. 536 с.
2. Команцев В.Н., Заболотных В.А. Методические основы клинической электронейромиографии. СПб.: Лань, 2001. С. 215–216.
3. Шилов А.С., Бочаров М.И. Влияние гипоксической гипоксии и антиортостатической гипокинезии на активность мотонейронных пулов икроножной и камбаловидной мышц человека // Вестн. Твер. гос. ун-та. 2008. Вып. 7, № 7 (67). С. 37–42.
4. Badier M., Guillot C., Lagier-Tessonnier F., Jammes Y. EMG changes in respiratory and skeletal muscles during isometric contraction under normoxic, hypoxic, or ischemic conditions // Muscle and Nerve. 1994. Vol. 17. Is. 5. P. 500–508.
5. Caquelard F., Burnet H., Tagliarini F., Cauchy E., Richalet Jammes Y. Effects of prolonged hypobaric hypoxia on human skeletal muscle function and electromyographic events // Clin. Sci. (Lond.). 2000. Vol. 98. P. 329–337.

**PECULIARITIES ACTIVATION AND RECRUITMENT
SURAE HUMAN AFTER INTERVAL HYPOXIA**

A.A. Fokin, A.S. Shilov

Syktvykar State University

The results of changes in the activation and recruitment of the soleus muscle fibers (m. soleus) and medial gastrocnemius (m. gastrocnemius) muscles during rehabilitation after the interval hypoxic effects on the human body for 16 days. As a result, one observes a steady facilitated recruitment of motor neurons in the rehabilitation period, especially on day 1, increasing the intensity of the direct activation of the M-response during rehabilitation after the interval hyper-poksicheskikh effects as a tonic and phasic muscles.

Ключевые слова: *hypoxia, direct M-answer, motive unit, recruitment.*

Об авторах:

ФОКИН Андрей Александрович—руководитель студенческой научно-исследовательской лаборатории «Sport & Health», ФГБОУ ВПО «Сыктывкарский государственный университет», 167005, Республика Коми, Сыктывкар, Октябрьский пр., д. 55, e-mail: fokin.90@inbox.ru

ШИЛОВ Александр Сергеевич—кандидат биологических наук, доцент кафедры теоретических и медико-биологических основ физической культуры, руководитель НОЦ «Проблемы физиологии и физической реабилитации», ФГБОУ ВПО «Сыктывкарский государственный университет», 167005, Республика Коми, Сыктывкар, Октябрьский пр., д. 55, e-mail: shelove@list.ru