

УДК 612.592 + 612.741.1

ВЛИЯНИЕ ГОДОВОГО ТЕМПЕРАТУРНОГО ЦИКЛА И ОСТРОЙ ХОЛОДОВОЙ ИММЕРСИИ НА НЕЙРОМЫШЕЧНЫЙ СТАТУС ЧЕЛОВЕКА

¹Потемина А.М., ¹Мейгал А.Ю., ^{1,2}Шегельман И.М.

¹ФБГОУ ВПО «Петрозаводский государственный университет», Петрозаводск,
e-mail: meigal@petsu.ru;

²ГБУЗ «Республиканская больница им. В.А.Баранова», Петрозаводск

Цель исследования заключалась в поиске адаптационных изменений нейромышечного статуса при сезонном изменении температуры среды и при острой холодной иммерсии у любителей спортивного зимнего плавания («моржей») на основе поверхностной электромиографии (ЭМГ). Установлено, что занятия зимним плаванием вызывают минимальное изменение нейромышечного статуса в течение годового цикла температур и по сравнению с контрольной группой. Достоверные изменения параметров ЭМГ получены лишь после острого погружения в ледяную воду в виде снижения частоты импульсации двигательных единиц (ДЕ) и уменьшения нелинейных параметров ЭМГ. Вывод: параметры функционирования двигательной системы человека достаточно устойчивы к занятиям зимним плаванием и годовым колебаниям температуры, но острая холодная иммерсия оказывает статистически значимое влияние на нейромышечный статус.

Ключевые слова: двигательная система, электромиограмма, двигательные единицы, скелетные мышцы, иммерсия, холод, адаптация, нелинейные параметры

INFLUENCE OF ANNUAL TEMPERATURE MODULATION AND ACUTE COLD IMMERSION ON NEUROMUSCULAR STATUS OF THE MAN

¹Potyomina A.M., ¹Meigal A.Y., ^{1,2}Shegelman I.M.

¹Petrozavodsk State University, Petrozavodsk, Russia, e-mail: meigal@petsu.ru;

²Republican Hospital, Petrozavodsk

The purpose of the study was to evaluate electromyographic (EMG) signs of adaptation of neuromuscular system to seasonal modulation of environmental temperature and under acute immersion of winter swimmers in cold water. We documented that winter swimming exert only minimal effect on the neuromuscular status round the year. Statistically significant variation of the EMG parameters were seen only after acute immersion in cold water in as decrease in motor unit firing rate and of the nonlinear characteristics of EMG. We concluded that the motor system functioning is resistant to temperature stimuli like winter swimming and annual modulation of habitat temperature. However, immersion in cold water exerts strong acute effect on the motor system.

Keywords: motor system, electromyogram, skeletal muscle, immersion, cold, temperature, adaptation, motor units, nonlinear parameters

Человек редко пребывает в термонейтральной среде – на него в каждый данный момент действует либо охлаждение, либо согревание. Для не одетого человека термонейтральные условия составляют ~ 28 °С, а для легко одетого (офисный костюм, 1 CLO) – ~ 21–22 °С [9]. За пределами этой температуры возникают физиологические реакции, которые поддерживают тепловой баланс человека. Человек получает холодную нагрузку обычно вне дома и работы, в холодный сезон (зима, частично осень и весна). Наиболее экстремальным видом холодного влияния является зимнее плавание (холодовая иммерсия), когда человек погружается в воду при температуре, близкой к точке замерзания. Также, в последнее время получает популярность такой вид лечебно-косметической процедуры, как криосауна (*WBC, whole body cryotherapy*) [15]. Чутким индикатором длительных и острых сенсорных воздействий является двигательная система и ее двигательные единицы (ДЕ).

Двигательная система, попадая под влияние холода, неизбежно адаптируется к нему [7]. В соответствии с недавно предложенной парадигмой об однонаправленности действия гравитации/невесомости и некоторых других сенсорных модальностей (холод, согревание, гипоксия) в онтогенезе человека [2, 3] было бы интересно исследовать изменения нейромышечного статуса в ответ на экстремально сильное острое и хроническое действие холода на организм человека, каким является зимнее плавание в холодной воде. Это могло бы стать частью профилактических мероприятий в практике космических полетов [10].

В этой связи цель настоящего исследования заключалась в том, чтобы на основе электромиографических параметров, в том числе и новых нелинейных параметров на основе фрактального анализа [11, 14], дать описание нейромышечного статуса у любителей зимнего плавания в течение всего года, начале и конце сезона зимнего плавания, а также при остром погружении в ледяную воду.

Материалы и методы исследования

Проведено 3 серии исследований с двумя группами испытуемых:

- 1) любителей зимнего плавания (далее – «моржей»);
- 2) «не-моржей».

В первом исследовании проведено сравнение параметров интерференционной электромиограммы (иЭМГ) и двигательных единиц (ДЕ) в группах «не-моржей» (М0) и «моржей» до начала сезона зимнего плавания в конце лета (конец августа 2012 г., М1А), осенью (октябрь-декабрь 2010 г., М1Б) в лабораторных условиях. Второе исследование заключалось в сравнении параметров иЭМГ в конце сезона зимнего плавания до погружения в ледяную воду (М2) и сразу после выхода из нее (М3).

Исследовано 13 здоровых любителей спортивного зимнего плавания (КРО общероссийской общественной организации «Федерация закаливания и спортивного зимнего плавания» (клуб «Виктория», г. Петрозаводск, наб. Варкауса, предс. И.Н.Жолудева, 7 мужчин и 6 женщин). Средний стаж занятий зимним плаванием составил 4,4 года (1–12 лет), среднее время экспозиции в воде в неделю ~5 мин (2–15 мин). Среди испытуемых 2 мастера спорта, чемпион России по зимнему плаванию, 2 разрядника по разным видам спорта. Все испытуемые некурящие, не страдают неврологическими заболеваниями.

В контрольную группу отобрано 14 человек («не-моржи», 5 мужчин и 9 женщин). Обе группы примерно одинаковы по возрасту, полу и антропометрическим данным. У испытуемых собиралось информированное согласие на участие в исследовании. Исследование групп М1Б и М0 проведено примерно в одно время года (с 21 октября по 21 декабря 2010 г.), группы М1А – 15–25 августа 2012 г. в условиях лаборатории на базе кафедры физиологии человека и животных ПетрГУ. Группа «моржей» также была обследована на берегу Онежского озера, в обогреваемом здании (М2) в марте-апреле 2011 года при температуре воздуха в здании клуба 24–25 °С. Группу М3 сформировали те же испытуемые сразу после иммерсии в холодной воде. Температура воды составила 1–4 °С, температура воздуха в марте 2011 г. составила –6–2 °С, в апреле от –1 до +10 °С. Время иммерсии (погружения) – 60–80 с. Испытуемые также получали дополнительную холодную экспозицию примерно 2–3 мин при подходе к проруби и выходе из нее. Измеряли средневзвешенную температуру кожи (СВТК) по методу Раманатана [13] до и после погружения в холодную воду:

$$\text{СВТК} = 0,3T_1 + 0,2T_2 + 0,3T_3 + 0,2T_4,$$

где T_1 – температура кожи под ключицей, T_2 – передней поверхности плеча, T_3 – передней поверхности бедра, T_4 – задней поверхности голени.

Поверхностную иЭМГ регистрировали с двуглавой м. плеча (*m. biceps br.*) справа, в позе стоя, плечо было опущено вниз, предплечье удерживалось в положении локтевого сгибания. Запись иЭМГ делали при нагрузках 0 (без нагрузки), 1, 2 и 3 кг. Использовали электромиограф Нейро-МВП-8 с программной средой «Нейрософт» (ООО «Нейрософт», г. Иваново, Россия). Отводящие электроды укрепляли лейкопластырем над основной массой мышцы. Кожу предварительно обрабатывали абразивной пастой и 70%-м

этанолом, на электрод наносили электродный гель. Полоса пропускания ЭМГ составила 50–500 Гц. Регистрировали отрезки ЭМГ длительностью 1 с. Аппарат Нейро-МВП-8 позволяет получать такие линейные параметры, как среднюю амплитуду (A , мкВ) и среднюю частоту (MNF, Гц) иЭМГ. Нами также применена программа FRACTAN 4.4 © для характеристики аттрактора иЭМГ, который описывается несколькими нелинейными параметрами: фрактальной размерностью (D), корреляционной размерностью (D_c) и корреляционной энтропией (K_2) и [3]. Также регистрировали параметры импульсации двигательных единиц (ДЕ) трехглавой мышцы плеча (*m. triceps br.*) билатерально по методу, примененному нами ранее [4]. Испытуемых просили напрягать мышцу до появления спонтанно импульсирующих ДЕ. Анализировали до 70–100 межимпульсных интервалов, рассчитывали средний межимпульсный интервал (МИИ, мс), среднюю частоту импульсации (f , имп/с), вариабельность (среднеквадратическое отклонение от среднего межимпульсного интервала). Таким образом, всего для характеристики нейромышечного статуса учитывалось 7 электромиографических параметров. Статистический анализ проведен в программной среде SPSS 12.0™. Корреляционный анализ между параметрами производили с помощью критериев Спирмена и Пирсона, сравнение средних значений производили с помощью t -теста Стьюдента. Нормальность распределения данных определяли по методу Шапиро-Уилка.

Результаты исследования и их обсуждение

Значения параметров иЭМГ групп «моржей» (М1А и М1Б) до сезона зимнего плавания и «не-моржей» приведены в таблице. Достоверные различия были характерны только для f и D . f была меньше, а D больше в группе «не-моржей». Это может свидетельствовать о наличии большей предопределенности в сигнале ЭМГ. Наблюдалась отчетливая тенденция к увеличению межимпульсного интервала ДЕ в группе «моржей», характерная как для мужчин, так и для женщин. Частота импульсации ДЕ была в целом на ~0,5 имп./с больше в группе «не-моржей», однако это различие не было статистически значимым ($p = 0,099$). Частота импульсации ДЕ была больше на 0,5–1,0 имп./с у мужчин в обеих группах, чем у женщин.

Повторное исследование, проведенное в комнатных условиях на той же группе «моржей» спустя 3,5–4 месяца занятий зимним плаванием (М2, иммерсия в среднем 5 мин в неделю), показало, что исследованные параметры иЭМГ и параметры активности ДЕ практически не изменились (см. таблицу). Сразу после 60–80-секундного погружения в ледяную воду (М3) СВТК снижалась с $30,9 \pm 2,1$ до $14,6 \pm 1,5$ °С, частота импульсации ДЕ достоверно снижалась как у мужчин, так и у женщин,

увеличивался межимпульсный интервал, а также снижались все нелинейные параметры иЭМГ (рис. 1), что можно считать

специфическим влиянием острого охлаждения организма. Пример импульсации ДЕ до и после погружения представлен на рис. 2.

Параметры суммарной ЭМГ двуглавой мышцы плеча в разных группах

| Параметр иЭМГ | Группа М0 | Группа М1Б | Группа М2 | Группа М3 |
|----------------------------------------------|----------------|-----------------|----------------|------------------|
| <i>Средняя амплитуда иЭМГ (мкВ)</i> | | | | |
| Без нагрузки | 76,98 ± 37,05 | 90,05 ± 38,76 | 65,92 ± 38,90 | 74,59 ± 41,43 |
| 1 кг | 112,81 ± 30,10 | 121,58 ± 33,38 | 97,26 ± 49,21 | 99,81 ± 44,50 |
| 2 кг | 127,51 ± 35,58 | 131,64 ± 40,64 | 126,61 ± 56,05 | 130,07 ± 57,79 |
| 3 кг | 151,11 ± 40,84 | 152,31 ± 35,11 | 142,63 ± 55,14 | 144,00 ± 54,16 |
| Средняя частота иЭМГ (Гц) | 127,81 ± 18,25 | 135,90 ± 14,33* | 134,96 ± 25,13 | 132,46 ± 24,09 |
| Фрактальная размерность (D) | 1,7629 ± 0,046 | 1,7512 ± 0,041* | 1,7511 ± 0,038 | 1,7412 ± 0,059 * |
| Корреляционная размерность (D _c) | 4,253 ± 0,336 | 4,380 ± 0,366 | 4,464 ± 0,570 | 4,355 ± 0,436 * |
| Корреляционная энтропия (K ₂) | 5,397 ± 2,72 | 5,921 ± 2,906 | 4,752 ± 1,63 | 4,610 ± 1,746 * |

Примечание: * – $p < 0,05$ между группами М1 и М0.

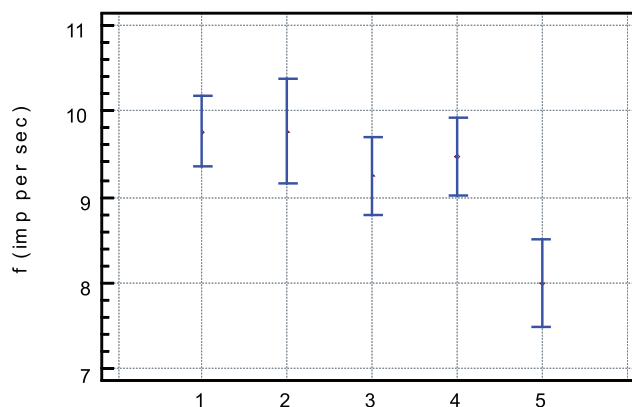


Рис. 1. Средняя частота импульсации (имп/с) двигательных единиц в четырех исследованных состояниях группы «моржей» и «не-моржей». Примечание: график средних значений и среднеквадратического отклонения (межгрупповое различие $P = 0,0015$, критерий Крускал-Уоллиса): 1 – М0, 2 – М1А, 3 – М1Б, 4 – М2, 5 – М3

Таким образом, почти 4-месячный сезон зимнего плавания практически не изменил параметры иЭМГ в группе «моржей». Можно сделать вывод о том, что у человека, в отличие от лабораторных и свободно живущих в природе видов, длительное и сильное температурное влияние оказывают минимальное воздействие на нейромышечный статус. Это может быть связано с тем, что, несмотря на длительность сезона зимнего плавания, это воздействие является все-таки кратковременным (всего 4–5 мин в неделю). Все остальное время любители зимнего плавания проводили в термонеutralных комфортных температурных условиях, в отличие от лабораторных животных, которые находились в более жестких температурных условиях [5, 6]. Можно также предположить, что в группе «моржей» 4-месячное воздействие холодной иммерсии «камуфли-

руется» уже имеющейся «аккумулированной» адаптацией скелетных мышц к холоду, поскольку у большинства любителей зимнего плавания стаж погружений в ледяную воду составляет более 2 лет.

Таким образом, наиболее сильное влияние на нейромышечный статус оказало острое охлаждение в ледяной воде, на фоне более чем 2-кратного снижения кожной температуры. Погружение в ледяную воду (иммерсия) оказало достоверное и предсказуемое влияние на ДЕ, снижая их частоту, что совпадает с ранее полученными данными о влиянии умеренного воздушного охлаждения (экспозиции) на ДЕ человека. Таким образом, в континууме состояний М0-М1А-М1Б-М2-М3 два крайних состояния – М0 («не моржи») и М3 («моржи» после иммерсии) – оказались наиболее различными с точки зрения нейромышечного

статуса (см. рис. 1). Физиологический смысл этих изменений заключается в т.н. «интерполяции» скорости сокращения мышечных волокон и частоты импульсации ДЕ для того, чтобы поддерживался примерно одинаковый

режим зубчатого тетануса [8, 12]. Снижение скорости сокращения при охлаждении требует снижения частоты импульсации ДЕ. Также снижение частоты импульсации имеет калоригенный эффект [1].

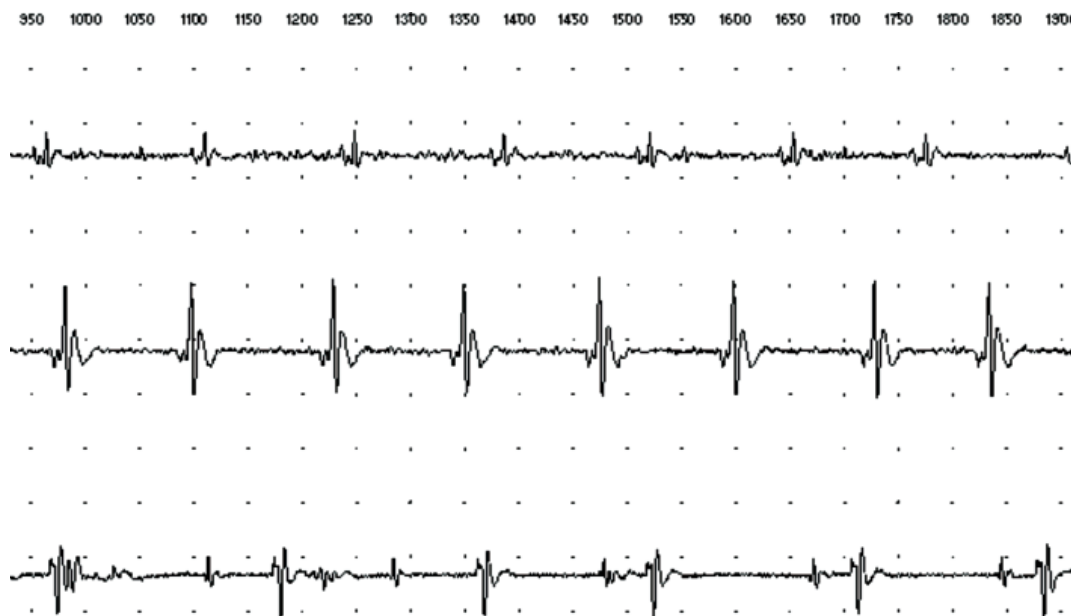


Рис. 2. Примеры импульсной активности двигательных единиц трехглавой мышцы плеча мужчины-любителя зимнего плавания до (верхняя запись) и после (три нижние записи) погружения в холодную воду. Примечание: калибровка времени 50 мс, амплитуды 50 мкВ

Новые нелинейные параметры ЭМГ, характеризующие нейромышечный статус, оказались достаточно стабильными в разных состояниях. Но после иммерсии в ледяной воде D и D_c были достоверно ниже по сравнению с группой «не-моржей». Снижение размерности сигнала свидетельствует об уменьшении его сложности и, соответственно о повышении его предсказуемости. Это, в свою очередь, является признаком повышенного количества одинаковых фрагментов сигнала, то есть появления ритмичности и синхронизации ДЕ [11, 14]. Поэтому снижение нелинейных параметров после иммерсии в ледяной воде может быть признаком неявной холодовой дрожи, которая визуально имела место у двоих из 13 испытуемых.

Таким образом, занятия зимним плаванием оказывают минимальный адаптационный эффект на нейромышечный статус «моржей». Наибольшее влияние оказывает острое сильное охлаждение – погружение в ледяную воду (иммерсия).

Список литературы

1. Гурфинкель В.С. Зависимость теплопродукции скелетной мышцы от режима ее сокращения / Гурфинкель В.С., Левик Ю.С., Полещук Н.К., Коровин Ю.В. // Физиология человека. – 1981. – Т.7. – № 1. – С. 46–54.

2. Мейгал А.Ю. Онтогенетическая модель гравитации и невесомости: теоретические и практические аспекты // Физиология человека. – 2011. – Т. 37. – № 6. (в печати).

3. Мейгал А.Ю., Ворошилов А.С. Перинатальная модель перехода от гипогравитации к земной гравитации на основе нелинейных характеристик электромиограммы // Авиакосм. Экологич. Медицина. – 2009. – Т. 43. – № 6. – С. 14–18.

4. Мейгал А.Ю. Способ селективного отведения потенциалов действия двигательных единиц человека накожными электродами / А.Ю. Мейгал, Г.И. Кузьмина, Т.А. Шигуева, А.З. Закирова // Физиология человека. – 2009. – Т. 35. – № 5. – С. 134–138.

5. Сорокина Л.В. Терморегуляционная активность мотонейронного пула у крыс, адаптированных к холоду и гипоксии / Л.В. Сорокина, Ю.В. Лупандин, Л.П. Власова // Физиол. Журн. СССР. – 1984. – Т.70. – С. 75–80.

6. Сорокина Л.В., Медведев Н.В. Терморегуляционная активность двигательных единиц скелетных мышц голубя // Физиол. журн. СССР. – 1986. – Т.72. – № 11. – С. 1571–1574.

7. Ткаченко Е.Я., Якименко М.А. Исследование эффективности работы мышцы у белых крыс при адаптации к холоду // Физиол. журн. СССР. – 1985. – Т.71. – № 3. – С. 337–341.

8. Успенский А.Н., Данилова Л.И. Влияние охлаждения на характеристику одиночного сокращения скелетной мышцы у адаптированных к холоду крыс // Физиол. Журн. СССР. – 1990. – Т.76. – № 3. – С. 414–417.

9. Bligh J. Temperature regulation in mammals and other vertebrates // Frontiers of Biology. – 1973. – Vol. 30. – P. 436.

10. Meigal A.Y. Interplanetary spaceflight compared with fetal and neonatal strategy at microgravity: theoretical and practical implications // Pathophysiology. – 2011. – Vol. 19. – P. 269–276.

11. Meigal A., Rissanen S., Kankaanpää M., Tarvainen M., Nuutinen J., Tarkka I., Airaksinen O., Kajalainen P.A. Novel parameters of surface EMG in patients with Parkinson's disease and healthy young and old controls // *J. Electromyogr. Kinesiol.* – 2009. – Vol. 19, № 3. – P. 206–213.

12. Merton P.A. Voluntary strength and fatigue // *J. Physiol.* – 1954. – Vol. 123. – P. 553–564.

13. Ramanathan N.L. A new weighting system for mean surface temperature of the human body // *J. Appl. Physiol.* – 1964. – Vol. 19. – P. 531–533.

14. Rissanen S. Surface EMG and acceleration signals in Parkinson's disease: feature extraction and cluster analysis / S. Rissanen, M. Kankaanpää, A. Meigal, M. Tarvainen, J. Nuutinen, I. Tarkka, O. Airaksinen, P.A. Kajalainen // *Med. Biol. Eng. Comp.* – 2008. – Vol. 46. – P. 849–858.

15. Smolander J. Thermal sensation and comfort in women exposed repeatedly to whole-body cryotherapy and winter swimming in ice-cold water / J. Smolander, M. Mikkelsen, J. Oksa, T. Westerlund, J. Leppäluoto, P. Huttunen // *Physiol. Behav.* – 2004. Vol. 82. – P. 691–695.

References

1. Gurfinkel V.S. Zavisimost teploproduksii skeletnoy myshy ot rezhima ee sokrascheniya. / Gurfinkel V.S., Levik YU.S., Poleschuk N.K., Korovin YU.V. // *Fiziologiya cheloveka.* 1981. T.7. no. 1. pp. 46–54.

2. Meigal A.Yu. Ontogeneticheskaya model gravitatsii i nevesomosti : teoriticheskie i orakticheskie aspekty // *Fiziologiya cheloveka.* 2011. T.37. no. 6. (v pechati).

3. Meigal A.Yu., Voroshilov A.S. Perinatalnaya model perekhoda ot gipogravitatsii k zemnoy gravitatsii na osnove nelineynykh kharakteristik elektromiogrammy // *Aviakosm. Ekologich. Meditsina.* 2009. T.43. no. 6. pp. 14–18.

4. Meigal A.Yu. Sposob selektivnogo otvedeniya potentsialov deystviya dvigatelnykh edinits cheloveka nakozhnymi elektrodami / Meigal A. Yu., Kuzmina G.I., Shigueva T.A., Zakirova A.Z. // *Fiziologiya cheloveka.* 2009. T. 35. no. 5. pp. 134–138.

5. Sorokina L.V. Termoregulyatsionnaya aktivnost motoneyronnogo pula u krysa, adaptirovannikh k kholodu i gipoksii. / Sorokina L.V., Lupandin YU.V., Vlasova L.P. // *Fiziol. Zhurnal SSSR.* 1984. T. 70. pp. 75–80.

6. Sorokina L.V., Medvedev N.V. Termoregulyatsionnaya aktivnost dvigatelnykh edinits skeletnykh myshits golubyu // *Fiziol. zhurnal. SSSR.* 1986. T.72. no. 11. pp. 1571–1574.

7. Tkachenko E.Ya., Yakimenko M.A. Issledovanie effektivnosti raboty myshitsy u belykh krysa pri adaptatsii k kholodu // *Fiziol. Zhurnal. SSSR.* 1985. T.71. no. 3. pp. 337–341.

8. Uspenskiy A.N., Danilova L.I. Vliyanie okhlazhdeniya na kharakteristiku odinochnogo sokrascheniya skeletnoy myshitsy u adaptirovannikh k kholodu krysa // *Fiziol. zhurnal. SSSR.* 1990. T. 76. no. 3. pp. 414–417.

9. Bligh J. Temperature regulation in mammals and other vertebrates // *Frontiers of Biology.* 1973. Vol. 30. pp. 436 .

10. Meigal A.Yu. Interplanetary spaceflight compared with fetal and neonatal strategy at microgravitation: theoretical and practical implications // *Pathophysiology.* 2011. Vol. 19. pp. 269–276.

11. Meigal A., Rissanen S., Kankaanpää M., Tarvainen M., Nuutinen J., Tarkka I., Airaksinen O., Kajalainen P.A. Novel parameters of surface EMG in patients with Parkinson's disease and healthy young and old controls // *J. Electromyogr. Kinesiol.* 2009. Vol. 19, no. 3. pp. 206–213.

12. Merton P.A. Voluntary strength and fatigue // *J. Physiol.* 1954. Vol.123. pp. 553–564.

13. Ramanathan N.L. A new weighting system for mean surface temperature of the human body // *J. Appl. Physiol.* 1964. Vol. 19. pp. 531–533.

14. Rissanen S. Surface EMG and acceleration signals in Parkinson's disease: feature extraction and cluster analysis / Rissanen S., Kankaanpää M., Meigal A., Tarvainen M., Nuutinen J., Tarkka I., Airaksinen O. Kajalainen P.A. // *Med. Biol. Eng. Comp.* 2008. Vol.46. pp. 849–858.

15. Smolander J. Thermal sensation and comfort in women exposed repeatedly to whole-body cryotherapy and winter swimming in ice-cold water/ Smolander J., Mikkelsen M., Oksa J., Westerlund T., Leppäluoto J., Huttunen P. // *Physiol. Behav.* 2004. Vol. 82. pp. 691–695.

Рецензенты:

Виноградова И.А., д.м.н., профессор, зав. кафедрой фармакологии, организации и экономики фармации с курсами микробиологии и гигиены Петрозаводского государственного университета, г. Петрозаводск;

Илюха В.А., д.б.н., зав. лабораторией экологической физиологии животных ИБ КарНЦ РАН, г. Петрозаводск.

Работа поступила в редакцию 12.12.2012.