



# 烧伤后足部畸形儿童身体平衡控制系统的病理性超同步化

## ABNORMAL HYPERSYNCHRONIZATION OF BODY BALANCE CONTROL SYSTEM IN CHILDREN WITH POST-BURN FOOT DEFORMITY

© I.E. Nikityuk, E.L. Kononova, M.S. Nikitin, K.A. Afonichev

The Turner Scientific Research Institute for Children's Orthopedics, Saint Petersburg, Russia

Received: 03.12.2018

Revised: 18.02.2019

Accepted: 06.06.2019

**背景。**烧伤后足部畸形儿童的治疗是再造整形手术的一项重大任务。急性热烧伤后，即使采取了充分的手术方法治疗，足部背面上形成的疤痕通常也会导致足部畸形，且最终有损足部功能。关键问题在于，随着儿童不断成长，继发性异常变化会出现在下肢关节和脊柱上，因此导致运动功能受损，包括身体平衡控制受损。

**目标。**本研究旨在探究烧伤后足部畸形儿童在手术治疗前后的姿势稳定性。

**材料与方法。**本稳定性测定研究在患有烧伤后瘢痕性足部畸形的 12 名患者中进行；患者的平均年龄是  $9.8 \pm 0.93$  岁。对照组包含无骨科异常迹象的 12 名年龄匹配的儿童。采用相关性分析和回归分析来分析数据。

**结果。**在烧伤后结疤和足部畸形患者中（治疗前阶段），显示出静负荷的补偿性重新分配至完好下肢。在姿势控制指标的分析中，主组患者呈现身体平衡控制系统的同步化异常增加。受影响的足部完成再造手术后，可注意到负荷分配的对称和肢体功能的恢复。相关性分析显示，稳定性测定参数之间的异常超同步化有明显增加，表明接受治疗的患者姿势控制策略的正常化。

**结论。**烧伤后足部畸形的消除修复了足部解剖外形，同时实现患者身体直立平衡的显著良好动态。

**关键词：**足部；烧伤；儿童；稳定性测定；姿势平衡。

**Relevance.** Treatment of children with post-burn foot deformities is an important task of reconstructive plastic surgery. The scars formed on the back surface of the feet, even with adequate surgical approach, in the acute period of thermal injury, further often lead to deformities of the entire foot, which leads to a derangement of its support function. The importance of the problem lies in the fact that with the growth of the child, secondary abnormal changes develop on the part of the joints of the lower extremities and the spine, leading to impaired locomotor function, including deviations in the body balance control system.

**Purpose of the study.** To study postural stability in children with post-burn foot deformities before and after surgical treatment.

**Material and methods.** The stabilometric study was conducted in 12 patients with post-burn cicatricial foot deformity, the average age of the patients was  $9.8 \pm 0.93$  years old. The control group consisted of 12 children of the same age with no signs of orthopedic abnormality. To assess the results, the methods of descriptive statistics with the inclusion of correlation and regression analysis were used.

**Results.** In patients with post-burn cicatricial deformity of the foot at the pre-treatment stage, a compensatory redistribution of the static load towards the intact lower limb was revealed. Analysis of postural control indicators in patients of the main group showed an abnormal increase in the synchronization of the system of body balance control. After reconstructive operations on the affected foot, symmetry of the distribution of the load and restoration of the support of the limb of the affected side were noted. Correlation analysis revealed a pronounced decrease in abnormal hypersynchronization between stabilometric parameters, which may indicate a trend towards normalization of the postural control strategy in patients after treatment.

**Conclusion.** Elimination of post-burn foot deformity contributed to the restoration of its anatomical shape and was accompanied by pronounced positive dynamics in the state of the system of vertical balance of the patient's body.

**Keywords:** foot; burns; children; stabilometry; postural balance.

## 引言

足部是人体肌肉骨骼系统的主要结构部分之一，具有静态运动功能并体现了整体形态功能性对象，会影响人体运动功能 [1]。烧伤后足部畸形儿童患者的治疗在再造手术中非常重要 [2]。根据一些作者的观点，该部位受损伤的概率超过 40% [3]，足背最经常受影响 [4]。足部的背面具有一些特殊的解剖特性，包括皮肤较薄、皮下脂肪层变薄、浅表的真皮层、外周血供应以及静脉和淋巴外排缓慢。所有这些因素使得该部位更容易发生较深的损伤和随后出现结疤 [5]。疤痕在足背形成，即使在热烧伤急性期期间进行充分手术干预，通常也会导致整个足部日后的畸形 [6]，而使得其支持功能失调。随着儿童发育长大，下肢负荷的不对称导致下肢关节和脊柱发生继发性病理变化，这一事实进一步加重了上述问题的重要性。这通常导致静态运动功能受损 [7]。所以，通过骨科康复量化下肢负荷的分布至关重要 [8]。然而，据我们所知，文献中并没有关于此类肌肉骨骼系统功能紊乱的诊断信息。

考虑到人体肌肉骨骼系统在功能上的统一，建议使用稳定性测定方法评估静态运动功能，因为它在分析骨科病患者的疾病机理及修复身体直立平衡方面非常详实有用。

本研究旨在探究烧伤后足部畸形儿童患者在手术治疗前后的姿势稳定性。

## 材料与方法

在患有瘢痕性烧伤后足部畸形的 12 名患者中开展稳定性测定研究，包括具有左侧病变的 7 名儿童患者和具有右侧病变的 5 名患者。儿童患者的年龄范围是 5 至 16 岁（平均年龄为  $9.8 \pm 0.93$  岁）。研究组包括患有足部烧伤畸形的儿童患者，

患者来自其他医疗机构，从来没有接受过任何手术。在手术治疗之前采用 MBN 生物机械学软件和硬件复合体 (MBN, Russia) 进行检查，时间是在消除瘢痕畸形后 1 至 2 年内，依据是睁眼和闭眼的标准方案。身体的重心投影 (MCP) 的位移参数已进行记录，即  $x$  坐标 (mm)、平均轨迹长度  $L$  (mm)、晃动面积  $S$  ( $\text{mm}^2$ )、以及身体重心晃动的包络面积 (statokinesigram) 长度与其晃动面积的比率  $L/S$  ( $\text{mm}^{-1}$ )。正面及矢状面中 MCP 晃动幅度  $A$  (mm) 和 60% 的光谱功效水平  $f_{60\%}$  (Hz) 的平均值已计算出来。此外，综合指标已计算出来，即长度与幅度的比率  $L/A$  [9]。手术干预涉及消除烧伤后足部畸形，目的是修复解剖外形和用全层植皮取代皮肤疤痕 (图 1)。

对照组包含没有呈现骨科病理迹象的 12 名年龄匹配的儿童患者。使用 SPSS 11.5 和 Statgraphics Centurion 16.2 进行数据统计分析。首先，确定变化系列的分布性质 (Shapiro-Wilk 检验)。因为数据不是正态分布，所以使用 Mann-Whitney  $U$  检验比较不相关的样本，Wilcoxon 检验则用于相关联的样本 ( $Z$ -标准的计算)。数据以中位数和四分位数间距 (25% - 75%) 呈现。指标差异具有统计显著性， $p < 0.05$ 。采用 Spearman 系数  $r_s$ ，进行相关性分析来研究稳定性测定的参数之间的关系。当  $r_s \geq 0.7$  时，认为相关性强。

## 结果

稳定性测定参数表明，足部烧伤后瘢痕畸形患者患有姿势平衡障碍 (表 1)。治疗前，这些患者还呈现出正面 MCP 位移 (指标  $x$ ) 非常显著且具有统计学意义，符合反偏侧化原则，即，与受影响侧相反的一侧发生位移 (请见图 4, a)。



图 1. 患者 B (14 岁) 的足部。右脚的烧伤后瘢痕畸形：  
a — 手术前；b — 受影响足部手术后一年

体重在下肢的不对称分布这一特点，表明静负荷的补偿性重新分配至完好的下肢，是单侧病变的典型特征 [10]。这一结果具有重大的临床意义，因为下肢支撑功能的长期不对称会引起不良后果 [11]。

对研究组中剩余的姿势控制指标的分析显示，与标准的偏差明显且稳定，参数  $L$  有所增加。参数  $S$ 、 $A$  和  $f$  60% 也有所增加，取决于在研究该视觉分析器的过程中患者的使用情况，增长的显著性水平不同。因此，在足部烧伤后瘢痕畸形的患

表 1

健康儿童和足部烧伤后瘢痕畸形患者（手术治疗前后）的稳定性测定指标

参数		对照组 $n = 12$ 中位数 (25% - 75%)	Mann-Whitney 检验 ( $p$ -值)	研究组 (手术前) $n = 12$ 中位数 (25% - 75%)	Wilcoxon 检验 $p$	研究组 (手术后) $n = 12$ 中位数 (25% - 75%)
$x$ , mm	O	0.29 (0.1 - 0.37)	< 0.0001	5.01 (3.87 - 6.15)	0.002	1.21 (0.92 - 1.61)
	C	0.3 (0.13 - 0.41)	0.0001	4.43 (2.96 - 7.96)	0.002	0.93 (0.69 - 2.35)
$L$ , mm	O	619 (580 - 686)	0.0002	1084 (819 - 1324)	0.002	920 (649 - 1156)
	C	790 (630 - 952)	0.004	1397 (990 - 1638)	0.002	1082 (667 - 1290)
$S$ , mm <sup>2</sup>	O	346 (311 - 474)	0.005	949 (452 - 1426)	0.019	697 (499 - 1048)
	C	639 (353 - 740)	0.112	669 (493 - 1847)	0.002	491 (360 - 1358)
$A$ , mm	O	2.4 (2.1 - 3.1)	0.026	4.1 (2.5 - 5.0)	0.889	3.2 (2.4 - 4.6)
	C	3.0 (2.5 - 3.6)	0.402	3.3 (2.4 - 5.7)	0.889	3.5 (2.7 - 4.8)
$f$ 60%, Hz	O	1.2 (1.0 - 1.4)	0.908	1.2 (1.0 - 1.5)	1.000	1.3 (0.8 - 1.4)
	C	1.0 (0.9 - 1.1)	0.024	1.1 (1.0 - 1.7)	0.182	1.0 (0.9 - 1.1)

注释：O — 睁眼检验；C — 闭眼检验； $p$  值 — 健康儿童和儿童患者组之间指标的差异显著性水平； $p$  — 手术前后，儿童患者组的指标的差异显著性水平。

表 2

对  $L/S$  参数与重心投影的晃动幅度  $A$  的相关性以及  $L/A$  参数与平均光谱功效水平  $f60\%$  的相关性进行的相关性分析（健康儿童和足部烧伤后瘢痕畸形患者手术治疗前后的身体重心晃动的包络面积）

相关性		Spearman 秩相关系数 $r_s$		
		对照组 $n=12$	研究组（手术前） $n=12$	研究组（手术后） $n=12$
$L/S \sim A$	O	-0.44	-0.79	-0.68
	C	-0.58	-0.93	-0.80
$L/A \sim f60\%$	O	0.20	0.90	0.43
	C	0.42	0.83	0.48

注释：O — 睁眼检验；C — 闭眼检验。

者中，可注意到身体姿势平衡明显受损。人们认为，姿势控制的生理资源较少，需要较高的能耗以及过度负荷分布在肌肉骨骼系统的其他部分 [12]。

还对这些患者进行了相关性分析，以更好地了解维持身体直立平衡方面的功能性偏差。 $L/S$  参数与晃动幅度  $A$  的相关性可从功效函数  $Y = bX^a$  体现出来；综合指标  $L/A$  与平均光谱功效水平  $f60\%$  之间呈线性关系： $Y = a + bX$ ，其中， $a$  和  $b$  是回归系数，变量  $X$  对应于幅度  $A$  或平均光谱功效水平  $f60\%$ ，而变量  $Y$  对应于参数  $L/S$  或  $L/A$ 。表 2 呈列了相关性分析的结果。

相关性分析显示，在健康儿童组中，参数  $L/S \sim A$  和  $L/A \sim f60\%$  之间的关系较弱，因为相关性系数的模块不超过 0.7（图 2）。

事实表明，在标准中，为了确保直立身体稳定性，不需要  $L$ 、 $S$ 、 $A$  和  $f60\%$  参数的高度同步化，静立过程中的参数之间的比率本质上是随机和混乱的 [13]。根据另一原则，计算治疗前患者组中的身体姿势平衡，其特点是  $L/S \sim A$  和  $L/A \sim f60\%$  比率具有很强的相关性，其中， $r_s$  系数的模块超过 0.7（图 3）。

稳定性测定参数之间的相关性如此强，表明了不同的姿势策略，即确保健康儿童和

足部烧伤后瘢痕畸形患者的直立身体平衡。受影响的足部进行再造手术后，评估了下肢支撑功能的恢复（请见表 1）。在正视图（ $x$  轴）中，注意到身体 MCP 的显著稳定化，显示了负荷分配的对称性和受影响侧支撑功能的恢复（图 4， $b$ ）。

足部烧伤后瘢痕畸形患者中，对其他稳定性测定参数的描述性统计分析没有呈现完全恢复至身体重心晃动的包络面积的正常  $L$  长度和晃动面积  $S$  平均值（治疗后的），但是呈现出其变化走向正常化的稳定性、显著性和单向性。尽管指标  $A$  和  $f60\%$  在治疗后没有发生变化，但相关性分析显示  $L/S \sim A$  比率的病理性超同步化下降，同时，指标  $L/A$  和  $f60\%$  之间的相关系数下降至正常数值。这可能表明，患者受影响的足部进行再造手术后，呈现姿势控制策略的正常化趋势。

## 讨论

我们的研究结果表明，足部烧伤后瘢痕畸形儿童患者的姿势稳定性显著下降，表现为稳定性测定参数明显偏离标称值。我们观察到，晃动面积  $S$ 、身体重心晃动的包络面积的长度  $L$ 、重心投影的晃动幅度  $A$  和 60% 的光谱功效水平  $f60\%$  之间存在很强的相关性，显著超过健康儿童相关参数之间的相关性。这表明，相比健康儿童，

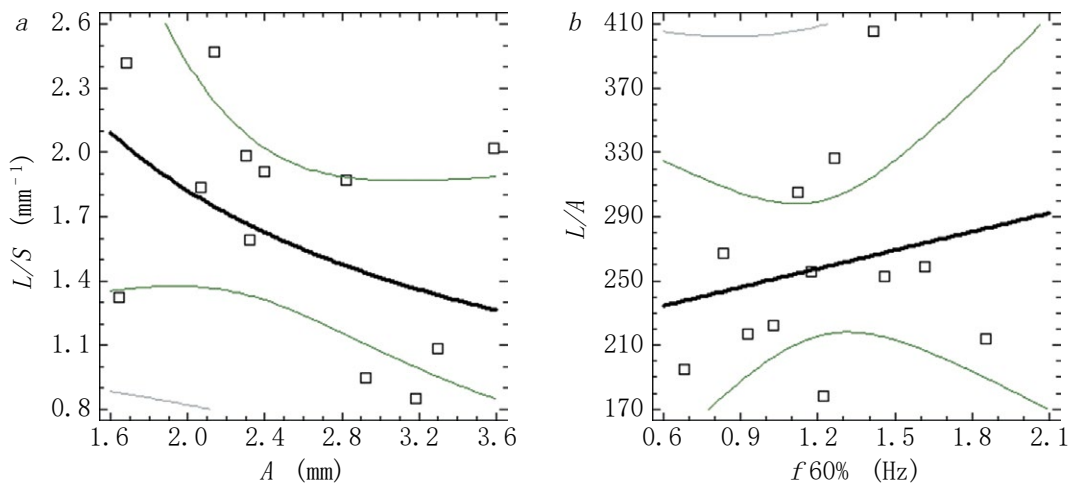


图 2. 回归线 (粗线) 及其置信区间 (细线) 反映了采用睁眼检验的健康儿童的相关性:  $a$  是  $L/S$  参数与重心投影的晃动幅度  $A$  的相关性;  $b$  是  $L/A$  参数与身体重心晃动的包络面积的平均光谱功效水平  $f\ 60\%$  的相关性

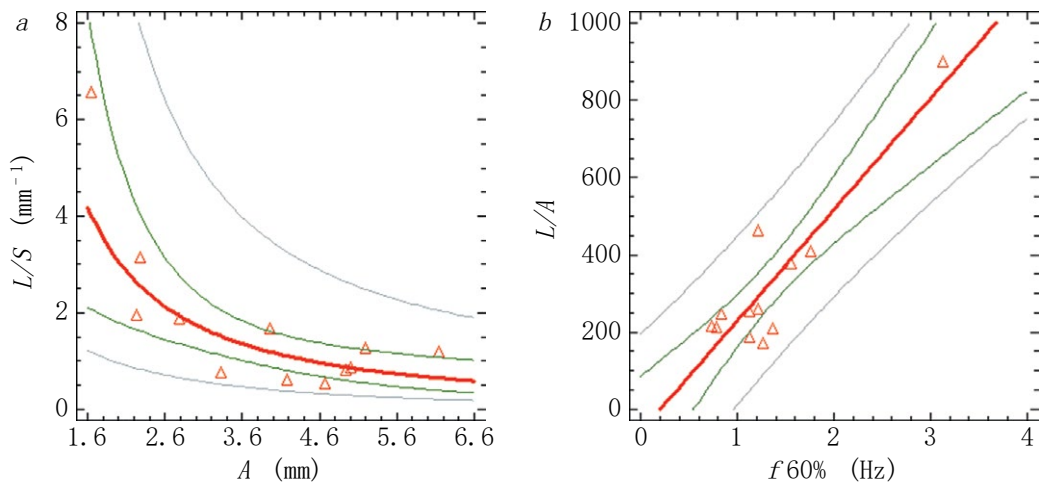


图 3. 回归线 (粗线) 及其置信区间 (细线), 反映了在采用睁眼检验的单侧后脚跟烧伤的患者中的相关性 (治疗前):  $a$  是  $L/S$  参数与重心投影的晃动幅度  $A$  的相关性;  $b$  是  $L/A$  参数与身体重心晃动的包络面积的平均光谱功效水平  $f\ 60\%$  的相关性

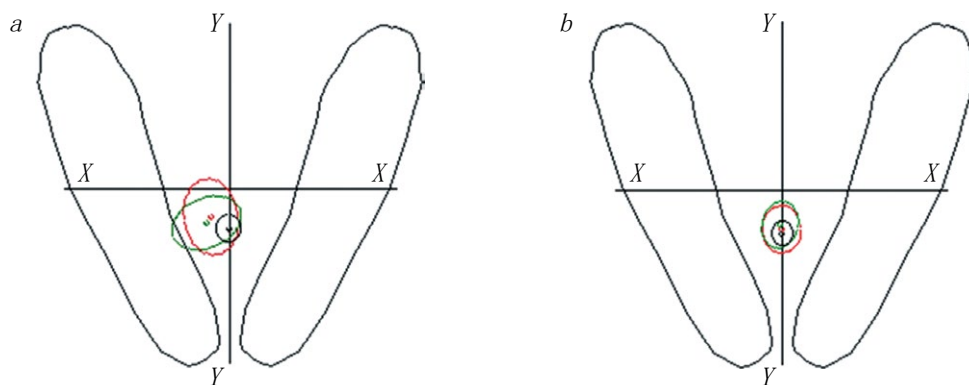


图 4. 14 岁患者 B 的稳定性图 (请见图 1):  $a$  — 手术前;  $b$  — 受影响足部手术后一年。正面图中身体重心投影居中的恢复, 身体重心晃动的包络面积正常化。红线表示睁眼检验, 绿线表示闭眼检验

在单侧足部烧伤后瘢痕畸形的患者中，MCP 的轨线更有序，从而，根据身体纵向平衡实现更高水平的控制系统同步化。超同步化姿势策略具有适应性，因为它能够让人维持直立姿势和在有效畸形足的新状况下行走。此外，MCP 轨线有序性增加是病理性的，因为它是姿势控制不足的一个指标。身体平衡控制系统的这种超同步化是中央神经系统病变患者具有的特征，例如颅脑损伤 [14]、帕金森症 [15] 和脊椎病变 [16]。众所周知，足部感受器是身体 MCP 部位发生任何变化的重要信息来源 [17]，在无负荷的下肢中，显示足部机械性感受器的活性有所下降 [18]。此外，脚底表层和深层感受器习惯性刺激的单侧变化会阻碍对直立姿势的控制和管理 [19]。可以认为，在烧伤后瘢痕畸形患者中，执行足部支撑动作的皮质脊髓肌理发生变化，是受到来自受影响足部的病理上发生变化的传入冲动的影响。不同部位足部皮肤的机械感受器涉及运动动作的传入控制和程序设计 [20]。受影响的足部感受器的传入冲动发生变化，导致肌肉骨骼系统的肌肉失衡，因为传入冲动穿过本体感受脊柱大脑回路，生物运动链的链接之一具有单侧障碍 [21]。在烧伤后足部畸形儿童患者中，在这种静态运动功能的中央调节变化情况下，额外的补偿机制被驱动以维持身体平衡。由于身体平衡控制系统同步化的病理性增加，可以通过改变姿势策略来执行这些补偿机制。

## 结论

在足部烧伤后瘢痕畸形儿童患者组中，我们发现姿势平衡失调和下肢负荷不对称，这可能表明需要用完好的肢体补偿受影响足部支撑功能的退化。此外，我们的研究结果表明，烧伤后足部畸形消除后，这些患者的直立身体平衡系统的状态会伴随着发生显著的良好变化。

## 其他信息

**资助来源：**本研究工作的开展在俄罗斯联邦卫生部国家任务第 A A A A-A 18-118122690164-3 号范围内。

**利益冲突：**作者声明，不存在与发表本文相关的明显或潜在利益冲突。

**伦理审查：**本研究按照世界医学协会赫尔辛基宣言的伦理标准（经俄罗斯卫生部修订）开展，由儿童骨科 Turner 科学研究院的伦理委员会批准（方案号：4，日期：2018 年 11 月 27 日）。患者（或其代理人）签署了关于处理和发表个人数据的自愿知情同意书。

**致谢：**作者非常感谢 Alyona Nikolayevna Melchenko（儿童骨科 Turner 科学研究院国际项目和对外关系部负责人）帮忙将本文章的概述部分翻译成英语。

## 作者贡献

*I. E. Nikityuk* 制定研究设计，收集资料 and 进行资料的统计分析，回顾关于本文章主题的发表情况，并撰写原稿文本。

*E. L. Kononova* 采集和分析资料，回顾关于本文章主题的发表情况，撰写文本，进行原稿的阶段性和最终编辑。

*M. S. Nikitin* 收集和分析资料，回顾关于本文章主题的发表情况，并撰写文本。

*K. A. Afonichev* 采集和分析资料，回顾关于本文章主题的发表情况，撰写文本，进行原稿的阶段性和最终编辑。

## References

1. Ефимов А.П. Информативность биомеханических параметров походки для оценки патологии нижних конечностей // Российский журнал биомеха-

- ники. – 2012. – Т. 16. – № 1. – С. 80–88. [Efimov AP. Informativity of biomechanical parameters of gait for the estimation of the lower extremities pathology. *Rossiyskiy zhurnal biomekhaniki*. 2012;16(1):80-88. (In Russ.)]
2. Ngu F, Patel B, McBride C. Epidemiology of isolated foot burns in children presenting to a Queensland paediatric burns centre- a two-year study in warmer climate. *Burns Trauma*. 2017;5:6. <https://doi.org/10.1186/s41038-017-0070-3>.
  3. Гизатулина Л.Я., Богов А.А., Муллин Р.И., Ибрагимов Я.Х. Применение васкуляризированной кожной пластики задним фасциально-жировым лоскутом голени на ретроградном кровотоке для замещения дефекта мягких тканей нижней трети голени и стопы // Практическая медицина. – 2017. – № 8. – С. 53–55. [Gizatulina LY, Bogov AA, Mullin RI, Ibragimov YK. The usage of vascularized skin plastics by reverse adipofascial flap of the lower leg in counterpulsation for defects of soft tissues of the lower third of shin and foot. *Prakticheskaya meditsina*. 2017;(8):53-55. (In Russ.)]
  4. Богов А.А., Ибрагимова Л.Я., Муллин Р.И. Применение васкуляризированной кожной пластики медиальным лоскутом стопы для замещения дефекта мягких тканей стопы // Практическая медицина. – 2012. – № 8-1. – С. 86–87. [Bogov AA, Ibragimova LY, Mullin RI. The use of vascularized skin plastics by medial flap of the foot for replacing defects of soft tissues of the foot. *Prakticheskaya meditsina*. 2012;(8-1): 86-87. (In Russ.)]
  5. Богданов С.Б., Бабичев Р.Г. Хирургические аспекты лечения детей с глубокими ожогами тыльной поверхности кистей и стоп // Российский вестник детской хирургии, анестезиологии и реаниматологии. – 2016. – Т. 6. – № 1. – С. 57–62. [Bogdanov SB, Babichev RG. Surgical aspects of treatment children with deep burns of dorsal surface of hands and feet. *Rossiyskiy vestnik detskoy khirurgii, anesteziologii i reanimatologii*. 2016;6(1):57-62. (In Russ.)]
  6. Sonmez Ergun S. A new splint for dorsal foot burns. *J Burn Care Res*. 2018;39(2):308-310. <https://doi.org/10.1097/BCR.0000000000000573>.
  7. Hurkmans HLP, Bussmann JBJ, Benda E, et al. Techniques for measuring weight bearing during standing and walking. *Clin Biomech*. 2003;18(7):576-589. [https://doi.org/10.1016/s0268-0033\(03\)00116-5](https://doi.org/10.1016/s0268-0033(03)00116-5).
  8. Kumar SN, Omar B, Joseph LH, et al. Evaluation of limb load asymmetry using two new mathematical models. *Glob J Health Sci*. 2014;7(2):1-7. <https://doi.org/10.5539/gjhs.v7n2p1>.
  9. Никитюк И.Е., Мошонкина Т.Р., Щербаклова Н.А., и др. Влияние локомоторной тренировки и функциональной электромиостимуляции на поструральные функции детей с тяжелыми формами ДЦП // Физиология человека. – 2016. – Т. 42. – № 3. – С. 37–46. [Nikityuk IE, Moshonkina TR, Shcherbakova NA, et al. Effects of locomotor training and functional electrical stimulation on postural function in children with severe cerebral palsy. *Fiziol Cheloveka*. 2016;42(3):37-46. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.7868/S0131164616030127>.
  10. Adegoke BO, Olaniyi O, Akosile CO. Weight bearing asymmetry and functional ambulation performance in stroke survivors. *Glob J Health Sci*. 2012;4(2):87-94. <https://doi.org/10.5539/gjhs.v4n2p87>.
  11. Щуров В.А., Новиков К.И., Мурадисинов С.О. Влияние разновысокости нижних конечностей на биомеханические параметры ходьбы // Российский журнал биомеханики. – 2011. – Т. 15. – № 4. – С. 102–107. [Shchurov VA, Novikov KI, Muradisinov SO. Effect of uneven legs on biomechanical parameters of walking. *Rossiyskiy zhurnal biomekhaniki*. 2011;15(4):102-107. (In Russ.)]
  12. Скворцов Д.В. Диагностика двигательной патологии инструментальными методами: анализ походки, стабилметрия. – М.: Т.М. Андреева, 2007. – 640 с. [Skvortsov DV. Diagnostika dvigatel'noy patologii instrumental'nymi metodami: analiz pokhodki, stabilometriya. Moscow: T.M. Andreeva; 2007. 640 p. (In Russ.)]
  13. Никитюк И.Е., Икоева Г.А., Кивоенко О.И. Система управления вертикальным балансом у детей с церебральным параличом более синхронизирована по сравнению со здоровыми детьми // Ортопедия, травматология и восстановительная хирургия детского возраста. – 2017. – Т. 5. – № 3. – С. 49–57. [Nikityuk IE, Ikoeva GA, Kivoenko OI. The vertical balance management system is more synchronized in children with cerebral paralysis than in healthy children. *Pediatric traumatology, orthopaedics and reconstructive surgery*. 2017;5(3):49-57. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.17816/PTORS5349-57>.
  14. Cavanaugh JT, Guskiewicz KM, Stergiou N. A nonlinear dynamic approach for evaluating postural control: new directions for the management of sport-related cerebral concussion. *Sports Med*. 2005;35(11):935-950. <https://doi.org/10.2165/00007256-200535110-00002>.
  15. Schmit JM, Riley MA, Dalvi A, et al. Deterministic center of pressure patterns characterize postural instability in Parkinson's disease. *Exp Brain Res*. 2006;168(3):357-367. <https://doi.org/10.1007/s00221-005-0094-y>.
  16. Никитюк И.Е., Кононова Е.Л., Виссарионов С.В. Постуральный дефицит у детей со стенозом позвоночного канала // Ортопедия, травматология и восстановительная хирургия детского возраста. – 2018. – Т. 6. – № 4. – С. 13–19. [Nikityuk IE, Kononova EL, Vissarionov SV. Postural deficiency in children with spinal stenosis *Pediatric traumatology, orthopaedics and reconstructive surgery*. 2018;6(4):13-19. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.17816/PTORS6413-19>.
  17. Carpenter MG, Murnaghan CD, Inglis JT. Shifting the balance: evidence of an exploratory role for postural sway. *Neuroscience*. 2010;171(1):196-204. <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2010.08.030>.
  18. Wright WG, Ivanenko YP, Gurfinkel VS. Foot anatomy specialization for postural sensation and control. *J Neurophysiol*. 2012;107(5):1513-1521. <https://doi.org/10.1152/jn.00256.2011>.
  19. Казенников О.В., Киреева Т.Б., Шлыков В.Ю. Влияние структуры опорной поверхности под стопой на поддержание вертикальной позы при разном рас-

- пределении нагрузки между ногами // Физиология человека. – 2016. – Т. 42. – № 4. – С. 61–68. [Kazennikov OV, Kireeva TB, Shlykov VY. Influence of structure of the support surface under the sole on vertical posture during standing with different body weight distribution between legs. *Fiziol Cheloveka*. 2016;42(4):61-68. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.7868/S0131164616040044>.
20. Бачу А.Я. Усиление сенсорно-моторной интеграции в неокортексе путем рефлексогенной стимуляции физиологически активных зон // Вестник Приднестровского университета. – Серия «Медико-биологические и химические науки». – 2014. – № 2. – С. 112–117. [Bachu AY. Usilenie sensorno-motornoy integratsii v neokortekse putem refleksogennoy stimulyatsii fiziologicheskii aktivnykh zon. *Vestnik Pridnestrovskogo universiteta. Seriya: Mediko-biologicheskie i khimicheskie nauki*. 2014;(2):112-117. (In Russ.)]
21. Щеколова Н.Б., Бронников В.А., Ладейщиков В.М., Зиновьев А.М. Значение оценки биомеханических показателей при ортопедической коррекции двигательных нарушений у больных после перенесенного церебрального инсульта // Пермский медицинский журнал. – 2018. – Т. 35. – № 3. – С. 9–14. [Schekolova NB, Bronnikov VA, Ladeischikov VM, Zinoviev AM. Significance of biomechanical indices assessment in orthopedic correction of motor disorders in patients following cerebral stroke. *Perm Medical Journal*. 2018;35(3):9-14. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.17816/pmj3539-14>.

---

### Information about the authors

---

**Igor E. Nikityuk** — MD, PhD, Leading Researcher of the Laboratory of Physiological and Biomechanical Research. The Turner Scientific Research Institute for Childrens Orthopedics, Saint Petersburg, Russia. <https://orcid.org/0000-0001-5546-2729>. E-mail: femtotech@mail.ru.

**Elizaveta L. Kononova** — MD, PhD, Head of the Laboratory of Physiological and Biomechanical Research. The Turner Scientific Research Institute for Childrens Orthopedics, Saint Petersburg, Russia. <https://orcid.org/0000-0001-7624-013X>. E-mail: Yelisaveta@yandex.ru.

**Maksim S. Nikitin** — MD, Orthopedic and Trauma Surgeon of the Department of Trauma Sequelae and Rheumatoid Arthritis. The Turner Scientific Research Institute for Children's Orthopedics, Saint Petersburg, Russia. <https://orcid.org/0000-0001-8987-3489>. E-mail: doknikitin@yandex.ru.

**Konstantin A. Afonichev** — MD, PhD, D.Sc., Head of the Department of Trauma Sequelae and Rheumatoid Arthritis. The Turner Scientific Research Institute for Children's Orthopedics, Saint Petersburg, Russia. <https://orcid.org/0000-0002-6460-2567>. E-mail: afonichev@list.ru.