

О. Н. Васько^{1,2}, Н. Н. Альтау¹, И. А. Ильясевич^{1,2},
А. Б. Деменцов³, Е. В. Сошникова¹

ХАРАКТЕРИСТИКА РЕАКЦИЙ ВОССТАНОВЛЕНИЯ НЕРВНО-МЫШЕЧНОЙ И СОСУДИСТОЙ ФУНКЦИЙ ПРИ ЛЕЧЕНИИ ПЕРЕЛОМОВ ДИАФИЗА БОЛЬШЕБЕРЦОВОЙ КОСТИ У ДЕТЕЙ

ГУ «Республиканский научно-практический центр травматологии
и ортопедии»,¹

УО «Белорусский государственный университет»,²

УЗ «6-я городская клиническая больница»³

Травматическое поражение трубчатых костей конечности приводит к нарушению функций ее опорно-двигательной системы. Компенсаторные реакции систем организма, возникающие в ответ на повреждение костной ткани, направлены на создание оптимальных условий, необходимых для восстановления анатомической структуры кости и измененных функций конечности. Развитие и внедрение в современную медицину новых технологий позволило разработать методы малоинвазивного хирургического лечения переломов трубчатых костей, направленных на стабилизацию перелома и обеспечение быстрого течения процессов регенерации костных тканей. Возвращение опороспособности и физической формы нижней конечности в значительной мере зависит от состояния нервно-мышечного и сосудистого аппаратов, механизмы восстановления которых у детей на этапах репаративного остеогенеза остаются малоизученными.

Цель исследования — определить динамику восстановления нервно-мышечной активности и регионарного кровотока нижних конечностей у детей с переломами диафиза большеберцовой кости в условиях консервативного и хирургического лечения.

Материалы и методы. Электрофизиологические и доплерографические исследования были выполнены у 20 пациентов (средний возраст $11 \pm 1,1$ лет) с переломами диафиза большеберцовой кости, разделенных на две клинические группы в зависимости от метода лечения. Сроки исследования: 1,5–2, 3, 6, 9 и 12 месяцев после проведенного лечения.

Результаты. Полученные данные электромиографического и доплерографического исследований свидетельствовали о преимуществах лечения переломов диафиза большеберцовой кости с помощью метода малоинвазивного остеосинтеза титановыми эластичными стержнями. Более быстрое восстановление опороспособности травмированной конечности при данном методе лечения было обусловлено возможностью ранней дозированной нагрузки на травмированную конечность, более высоким уровнем кровенаполнения стопы травмированной конечности и, соответственно, быстрым увеличением двигательной активности соответствующих групп мышц.

Ключевые слова: перелом диафиза большеберцовой кости, детский и подростковый возраст, суммарная и стимуляционная электромиография, доплерографическое исследование магистральных сосудов нижних конечностей.

O. N. Vasko, N. N. Altai, I. A. Ilyasevich, A. B. Dementsov,
E. V. Soshnikova

CHARACTERISTICS OF REACTIONS OF NEUROMUSCULAR AND VASCULAR FUNCTIONS IN THE TREATMENT OF FRACTURES OF THE TIBIAL SHAFT IN CHILDREN

Traumatic damage to the tubular bones of the limb leads to dysfunction of its musculo-skeletal system. Compensatory reactions of the body systems that occur in response to damage to bone tissue are aimed at creating optimal conditions necessary for restoring the anatomical structure of the bone and altered functions of the limb. The development and introduction of new technologies into modern medicine has made it possible to develop methods of minimally invasive surgical treatment of tubular bone fractures aimed at stabilizing the fracture and ensuring rapid bone tissue regeneration processes in children. The return of the support ability and physical shape of the lower limb largely depends on the state of the neuromuscular and vascular apparatus, the mechanisms of restoration of which in children at the stages of reparative osteogenesis remain poorly understood.

The purpose of the study is to determine changes in neuromuscular activity and regional blood flow in the lower limbs in children with tibial diaphysis fractures under conservative and surgical treatment.

Materials and methods. *Electrophysiological and Doppler studies were performed in 20 patients (mean age 11 ± 1.1 years) with tibial shaft fractures, divided into two clinical groups depending on the treatment method. Study periods: 1.5–2, 3, 6, 9 and 12 months after the treatment.*

Results. *The obtained data of electromyographic and Doppler studies indicated the advantages of treating tibial shaft fractures using the method of minimally invasive osteosynthesis with titanium elastic rods. A faster restoration of the support capacity of the injured limb with this treatment method was due to the possibility of early dosed loading on the injured limb, a higher level of blood filling of the foot of the injured limb and, accordingly, a rapid increase in the motor activity of the corresponding muscle groups.*

Key words: *tibial shaft fracture, childhood and adolescence, total and stimulation electromyography, Doppler ultrasound examination of the main vessels of the lower extremities.*

Переломы диафиза большеберцовой кости составляют около 25 % в структуре всех видов повреждений трубчатых костей у детей и подростков [1]. Активность репаративного остеогенеза при лечении повреждений опорно-двигательного аппарата в значительной степени зависит от наличия адекватного уровня кровоснабжения костной и мышечной тканей, для формирования которого необходимо создавать условия, начиная с момента травмы [2–4].

Одним из ведущих методов, используемых для лечения переломов диафиза трубчатых костей нижних конечностей, является скелетное вытяжение с последующей гипсовой иммобилизацией травмированной конечности [5–10]. Однако, данная методика имеет ряд существенных недостатков и главным из них является длительное отсутствие двигательной активно-

сти, приводящее к снижению нервно-мышечной и сосудистой функций [11, 12].

Особенностью последнего десятилетия в хирургии переломов у детей является широкое внедрение в клиническую практику стабильно-функционального остеосинтеза, в частности, метода малоинвазивного остеосинтеза эластичными стержнями [13]. Внедрение данного метода позволяет осуществлять раннюю дозированную нагрузку на конечность уже через месяц после хирургического лечения, что обеспечивает быстрое восстановление ее статолокомоторной функции. Применяемая методика оставляет интактными зоны роста поврежденной конечности и создает благоприятные условия для формирования костной мозоли, что обеспечивает быструю консолидацию костных отломков [14]. Сокращение сроков иммобилизации, ранняя дозированная нагруз-

ка на конечность создают благоприятные условия для улучшения состояния нервно-мышечной и сосудистой функций, что, в свою очередь, оказывает позитивное влияние на процесс течения остеогенеза.

Изучение механизмов и сроков восстановления функций нервно-мышечного и сосудистого аппаратов нижних конечностей в условиях использования интрамедуллярного остеосинтеза у детей с переломами большеберцовой кости не проводилось.

Цель исследования – определить динамику восстановления нервно-мышечной активности и регионарного кровотока нижних конечностей у детей с переломами диафиза большеберцовой кости в условиях консервативного и хирургического лечения.

Материалы и методы

Электрофизиологическое и ультразвуковое доплерографическое исследования выполнены у 20 пациентов (16 девочек, 4 мальчика; средний возраст $11 \pm 1,1$ лет) с переломами диафиза большеберцовой кости в период 1,5–2, 3, 6, 9 и 12 месяцев после лечения, разделенных на две клинические группы: I группа ($n = 10$) – пациенты, получавшие лечение методом малоинвазивного хирургического вмешательства (закрытой репозиции отломков большеберцовой кости, остеосинтеза титановыми эластичными стержнями); II группа ($n = 10$) – пациенты, получавшие лечение консервативным методом, включающим скелетное вытяжение в течение 29–35 дней с последующей гипсовой иммобилизацией конечности в течение 35–40 дней. Контрольную группу составили 10 здоровых лиц того же возраста без ортопедо-травматологической патологии.

Проводили доплерографическое исследование магистральных артерий и вен нижних конечностей: aa. и vv. femorales, femoris superficiales, profunda femoris, poplitea, tibiales posterior, tibialis anterior, dorsalis pedis. Определяли среднюю скорость кровотока ($V_{\text{сред}}$, см/с), диаметр (D , см) сосудов и кровяной поток ($0,06\pi(D/2)^2 V_{\text{сред}}$, л/мин).

Нейрофизиологическое исследование включало методы суммарной и стимуляционной электромиографии (ЭМГ). С помощью суммарной ЭМГ определяли функциональное состояние мышц нижних конечностей (mm. vastus

lateralis, vastus medialis, rectus femoris, tibialis anterior, extensor hallucis longus, peroneus longus, gastrocnemius medialis, soleus). При помощи стимуляционной ЭМГ оценивали моторную проводимость периферических нервов нижних конечностей n. peroneus et n. tibialis на их проксимальных и дистальных участках при отведении с m. extensor digitorum brevis et m. abductor hallucis longus. Определяли амплитуду максимального М-ответа, отражающую количество активных двигательных единиц мышцы, синхронно включающихся при проведении данной методики, а также рассчитывали скорость распространения возбуждения по моторным волокнам нерва.

Экспериментальные данные обрабатывали с помощью методов вариационной статистики (пакет прикладных программ «Statistica 10.0», Stat Soft, США). Характер распределения анализировали с применением критерия Шапиро–Уилка. После проверки выборки на нормальность распределения использовали параметрические и непараметрические методы. В случае нормального распределения выборки применяли параметрический метод сравнительной характеристики параметров – критерий Стьюдента и результаты представляли в виде среднего и стандартного отклонения – $M \pm SD$. При отсутствии нормального распределения выборки применяли непараметрический Т-критерий Вилкоксона для зависимых выборок, а также U критерий Манна–Уитни для независимых выборок и результаты представляли в виде медианы и интерквартильного размаха – Me (процентиль 25 % – процентиль 75 %). Различия считали достоверными при уровне значимости $p \leq 0,05$.

Результаты и обсуждение

По данным ультразвуковой доплерографии у всех пациентов в ближайшие сроки после операции (1,5–2 месяца) значения диаметров и кровяного потока магистральных артерий нижних конечностей находились в пределах величин физиологической нормы. Однако, сравнительный анализ количественных показателей регионарного кровотока в сегментах травмированной и интактной конечностей показал его перераспределение за счет усиления артериального притока на травмированной конечности в области перелома. Уровень кровенаполнения на стороне травмы в подколенно-

берцовом сегменте и в области стопы преобладал над кровоснабжением интактной стороны в обеих клинических группах. Межгрупповым отличием являлось преобладание значений кровяного потока по артериям берцового сегмента и стопы травмированной конечности у пациентов I группы ($p \leq 0,05$) по сравнению с соответствующими данными у пациентов II группы.

В процессе восстановления опороспособности конечности в последующие сроки значения диаметров и кровяного потока магистральных артерий в обеих группах пациентов оставались в пределах физиологической нормы. Однако на уровне различных сегментов травмированной конечности отмечали процесс компенсаторной реорганизации кровенаполнения в пользу травмированного сегмента голени и стопы по сравнению со смежными сегментами конечности. Динамические наблюдения на этапах реабилитации выявили тенденцию к увеличению величины просвета а. femoralis и а. dorsalis pedis в сочетании с уменьшением диаметров а. poplitea и а. tibialis posterior (рисунок 1).

Аналогичный характер перераспределения кровотока в сосудах различных сегментов был выявлен и на интактной конечности. Динами-

ческие исследования показали, что уровень кровотока на интактной конечности оставался в рамках гомеостатических границ. При этом анализ показателей межсегментарного кровенаполнения определил его изменения, характер которых соответствовал реакции перераспределения кровотока на травмированной конечности: отмечали увеличение кровотока – а. femoralis и а. dorsalis pedis в сочетании с уменьшением кровенаполнения а. poplitea, а. tibialis posterior. Полученные данные отражали преобладающий контроль центральной регуляции тонуса билатеральных сосудов в условиях процесса репаративного остеогенеза на одной из конечностей.

Реорганизация артериального кровотока по магистральным артериям различных сегментов конечностей объяснялась тем, что в процессе восстановления опороспособности конечности происходит адаптация кровеносного русла к изменяющимся запросам скелетных мышц, восстанавливающих свою двигательную активность в зоне перелома и смежных областях. Можно предположить, что резервные возможности сосудистого русла, определяемые по скорости кровотока в магистральных артериях голени и стоп, у пациентов с переломами диафиза большеберцовой кости

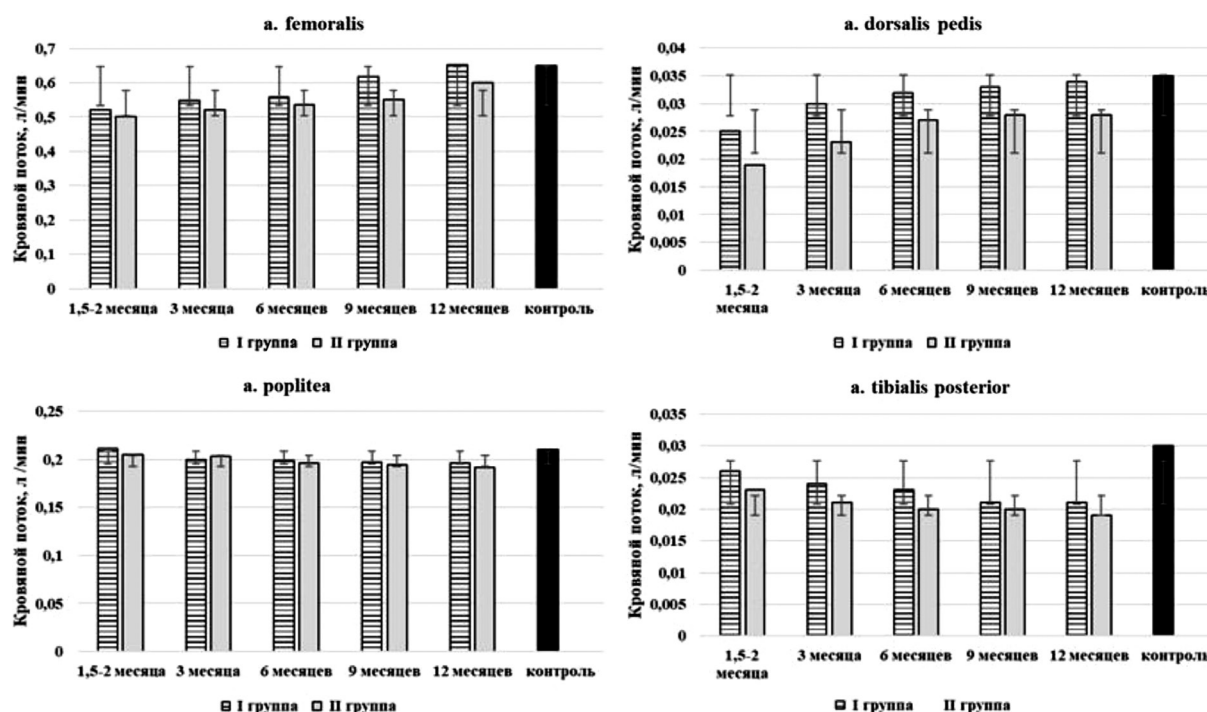


Рисунок 1. Динамика изменения уровня кровенаполнения магистральных артерий травмированной конечности у пациентов с переломом диафиза большеберцовой кости после малоинвазивного остеосинтеза эластичными стержнями и лечения консервативным методом

в период физиологической реабилитации зависели от величины статического нагружения травмированной конечности и, как следствие, изменения уровня двигательной активности мышц. В связи с более коротким сроком иммобилизации травмированной конечности в I группе период ее опороспособности после оперативного лечения наступал раньше.

Полученные результаты согласуются с данными литературы [15, 16], в соответствии с которыми в основе низкого кровенаполнения магистральных артерий травмированного берцового сегмента и стоп лежит более длительное снижение афферентации от иммобилизованной конечности. В свою очередь, длительное уменьшение проприорецептивной импульсации приводит к появлению очагов торможения в вышележащих отделах нервной системы, что сопровождается снижением центрального контроля вегетативного обеспечения функций организма и, как следствие, происходит ослабленное течение репаративного костеобразования в результате уменьшения интенсивности кровоснабжения тканей в поврежденном сегменте.

Наряду с реорганизацией артериального русла выявлены изменения доплерографических параметров магистральных вен нижних конечностей. Так, в раннем восстановительном периоде в обеих группах пациентов отмечали усиление кровотока по венам бедренного сегмента в сочетании с его замедлением по *v. poplitea*, *vv. tibiales posteriores*. В период 3–6 месяцев замедление венозного оттока по венам подколенно-берцового сегмента отмечалось только у пациентов II группы. Межгрупповые отличия в восстановлении венозного кровотока нижних конечностей в обеих группах пациентов соответствовали литературным данным, согласно которым при измененной функции одной из звеньев системы другие звенья перестраиваются, чтобы компенсировать утраченное равновесие в кровоснабжении.

Восстановление регионарного кровотока нижних конечностей сопровождалось изменениями двигательной активности мышц нижних конечностей. Согласно данным суммарной ЭМГ, в раннем послеоперационном периоде (1,5–2 месяца) у пациентов обеих групп двигательная активность мышц нижних конеч-

ностей была угнетена до минимальных значений ($p \leq 0,01$). По мере восстановления опороспособности конечности отмечалась нормализация функционального состояния мышц бедер: в I группе пациентов биоэлектрическая активность *m. quadriceps* достигала контрольных величин к 6 месяцам после операции, а во II группе – к 9 месяцам после полученного лечения. При этом нормализация функций мышц голени и стоп происходила позднее: в I группе – к 9 месяцам, а во II – к 12 месяцам после проведенного лечения.

Нарушение функций мышц нижних конечностей сопровождалось изменением моторной проводимости периферических нервов, что подтверждалось данными стимуляционной ЭМГ. Так, в ранние сроки послеоперационного периода в обеих группах пациентов отмечали билатеральное, статистически значимое ($p \leq 0,01$ на травмированной стороне и $p \leq 0,05$ на интактной стороне) уменьшение амплитуды М-ответов, полученных при электрическом раздражении малоберцового нерва в области предплюсны, в сочетании со снижением ($p \leq 0,05$) скорости эфферентного проведения импульса на дистальных участках конечности. Нормализация параметров моторной проводимости малоберцового нерва на участке стоп происходила к 6 и 9 месяцам восстановительного периода для I и II групп пациентов, соответственно.

Полученные результаты свидетельствовали о преимуществах лечения методом малоинвазивного остеосинтеза с использованием титановых эластичных стержней у детей с переломами диафиза большеберцовой кости, что объяснялось возможностью ранней дозированной нагрузки на травмированную конечность. Кроме того, перераспределение кровяного потока в пользу дистального сегмента конечности в период функциональной адаптации после перелома, хорошо выраженное у пациентов I группы, обеспечивало более высокий восстановительный потенциал для мышц, участвующих в сохранении постурального баланса всего тела (рисунок 2). В итоге, гемодинамическая реакция, возникающая на этапах репаративного остеогенеза и восстановления двигательной функции травмированной конечности, способствовала активизации метаболических процессов в регенерирующих тканях.

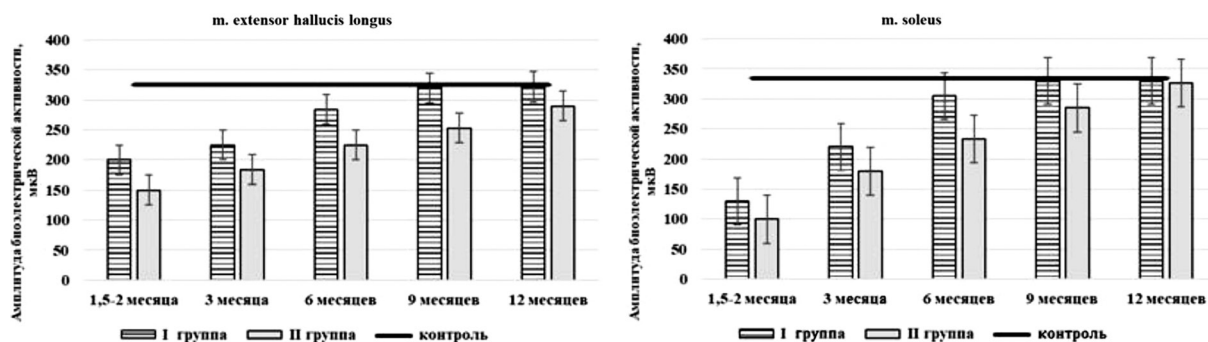


Рисунок 2. Изменение величин биоэлектрической активности мышц голени и стоп травмированной конечности в различные сроки восстановительного периода у пациентов с переломом диафиза большеберцовой кости

Таким образом, полученные данные позволяют считать, что успешный остеосинтез в заживлении переломов костей конечностей обусловлен не только результатом хирургического лечения, но и поддержанием физиологических реакций репаративного процесса. Одним из важнейших преимуществ метода малоинвазивного остеосинтеза является обеспечение на этапах ранней реабилитации восстановления адекватного кровообращения и двигательной активности мышц, в регуляции которых принимают участие процессы местной и центральной нервной регуляции физиологических функций.

Как известно, оптимальная локомоторная функция организма обусловлена сбалансированной работой мышц сгибателей и разгибателей голени и стопы. Травматическое повреждение кости вызывает раздражение обширных рецепторных зон в области перелома. В связи с изменением характера проприорецептивной информации в вышележащие отделы центральной нервной системы происходит нарушение баланса афферентно-эфферентных взаимодействий на уровне центральной нервной регуляции функций нервно-мышечной и сосудистой систем, проявляющейся в увеличении уровня кровенаполнения тканей травмированной конечности. В свою очередь, усиленный кровоток в области травмированного и смежного сегментов обеспечивает прогрессивное нарастание двигательной активности мышц, что приводит к более быстрому восстановлению утраченных в результате травмы функций конечности, причем не только в фазу остеорегенерации (6 месяцев после перелома), но и в период функциональной адаптации (6–12 месяцев после травмы).

Нейрофизиологические и доплерографические методы исследования нижних конечностей

в условиях травматического повреждения диафиза большеберцовой кости позволили определить физиологические механизмы регуляции и степень участия сосудистых и нервно-мышечных реакций на этапах остеогенеза у детей после малоинвазивного хирургического и консервативного лечения, обозначить необходимость проведения реабилитационных мероприятий, направленных на восстановление опороспособности конечностей.

Литература

1. *Epidimology of pediatric fractures ti emergency departments in the United States* / S. M. Naranje [et al.] // *Journal of Pediatric Orthopaedics*. – 2016. – № 36(4). – P. 45–48. – doi: 10.1097/BPO.0000000000000595.
2. Дедух, Н. В. Моделирование и ремоделирование кости (обзор литературы) / Н. В. Дедух, Д. М. Пошелок, С. В. Малышкина // *Украинский морфологический альманах*. – 2014. – Т. 12, № 1. – С. 107–111.
3. Горидова, Л. Д. Репаративная регенерация кости в различных условиях / Л. Д. Горидова, Н. В. Дедух // *Ж. Травма*. – 2009. – Т. 10, № 1. – С. 88–91.
4. Бруско, А. Т. Современные представления о стадиях репаративной регенерации костной ткани при переломах / А. Т. Бруско, Г. В. Гайко // *Вестник ортопедии, травматологии и протезирования*. – 2014. – № 2. – С. 5–8.
5. *Tibial fractures in children: a retrospective 27-year follow-up study* / S. A. Palmu [et al.] // *J. Acta Orthopaedica*. – 2014. – № 85(5). – P. 513–517. – doi: 10.3109/17453674.2014.916489.
6. *Pediatric tibial shaft fractures* / N. K. Patel [et al.] // *Indian Journal of Orthopaedics*. – 2018. – Vol. 52, № 5. – P. 522–528. – doi: 10.4103/ortho.IJOrtho_486_17.
7. Lieber, J. Developments in the treatment of pediatric long bone shaft fractures / J. Lieber, P. Schmittenebecher // *European Journal of Pediatric Surgery*. – 2013. – № 23. – P. 427–433. – doi: 10.1055/s-0033-1360460.
8. *Operative versus conservative management of displaced tibial shaft fracture in adolescents* / M. C. Kinney [et al.] // *Journal of pediatric orthopaedics*. – 2016. – № 36(7). – P. 661–666. – doi: 10.1097/BPO.0000000000000532.
9. Факторы риска неблагоприятных отдаленных последствий перелома диафиза большеберцовой кости у де-

тей / А. О. Дютин [и др.] // Хирургия. Журнал им. Н. И. Пирогова. – 2023. – № 4. – С. 33–41. – doi: 10.17116/hirurgia202304133.

10. Розинов, В. М. Медицинские технологии лечения детей с диафизарными переломами большеберцовой кости / В. М. Розинов, С. И. Яндиев, Д. В. Колягин // Российский вестник детской хирургии, анестезиологии и реаниматологии. – 2016. – Т. 6, № 3. – С. 118–125.

11. Dolmans, J. Substantial skeletal muscle loss occurs during only 5 days of disuse / J. Dolmans, L. J. C. van Loon // J. Acta Physiology. – 2014. – № 210. – P. 610–611.

12. The time course of disuse muscle atrophy of the lower limb in health and disease / E. J. O. Hardy [et al.] // Journal of Cachexia, sarcopenia and muscle. – 2022. – № 13. – P. 2616–2629. – doi: 10.1002/jcsm.13067.

13. Ligier, J. N. Closed flexible medullary nailing in pediatric traumatology / J. N. Ligier, J. P. Metazeau, J. Prevot // Journal of clinical Chiropractic pediatrics. – 1983. – Vol. 24, № 6. – P. 383–385.

14. Bone healing and inflammation: principles of fracture and repair / H. E. Hawary [et al.] // J. Bone healing and inflammation. – 2021. – № 35. – P. 198–203. – doi: 10.1055/s-0041-1732334.

15. Динамика кровообращения мягких тканей голени при замещении костных дефектов в эксперименте / В. И. Шевцов [и др.] // Российский физиологический журнал. – 2004. – № 9. – С. 1156–1160.

16. Кандыбо, И. В. Восстановление функции периферического кровотока и нервно-мышечной системы у пациентов с диафизарными переломами костей голени в динамике остеогенеза / И. В. Кандыбо, О. И. Шалатонина // Вестник травматологии и ортопедии Урала. – 2012. – Т. 6, № 3–4. – С. 60–64.

References

1. Naranje, S. M. Epidemiology of pediatric fractures ti emergency departaments in the United States / S. M. Naranje. R. A. Erali, W. C. Warner, J. R. Sawyer, D. M. Kelly // Journal of Pediatric Orthopaedics. – 2016. – № 36(4). – P. 45–48.

2. Dedukh, N. V. Modelirovanie i remodelirovanie kosti (obzor literatury) [Modeling and remodeling bone (review)] / N. V. Dedukh, D. M. Poshelok, S. V. Malysheva // Ukrainiskij morfologicheskij al'manah. – 2014. – Т. 12, № 1. – С. 107–111.

3. Goridova, L. D. Reparativnaja regeneratsiya kosti v razlichnykh usloviyakh [Bone healing in different conditions] / L. D. Goridova, N. V. Dedukh. – 2009. – Т. 10, № 1. – С. 88–91.

4. Brusco, A. T. Sovremennye predstavleniya o stadiyakh reпаративной регенерации костной ткани при переломах [Modern concepts of stages of bone tissue fractures reparative regeneration] / A. T. Brusco, G. V. Gaiko // Vestnik ortopedii, travmatologii i protezirovaniya. – 2014. – № 2. – С. 5–8.

5. Palmu, S. A. Tibial fractures in children: a retrospective 27-year follow-up study / S. A. Palmu, A. Sampo, M. Lohman, R. T. Paukku, J. I. Peltonen, Y. Nietosvaara // Journal Acta Orthopaedica. – 2014. – № 85(5). – P. 513–517.

6. Patel, N. K. Pediatric tibial shaft fractures / N. K. Patel, J. Horstman, V. Kuester, S. Sambandam, V. Mounasamy // Indian Journal of Orthopaedics. – 2018. – Vol. 52, № 5. – P. 522–528.

7. Lieber, J. Developments in the treatment of pediatric long bone shaft fractures / J. Lieber, P. Schmittenebecher // European Journal of Pediatric Surgery. – 2013. – № 23. – P. 427–433.

8. Kinney, M. C. Operative versus conservative management of displaced tibial shaft fracture in adolescents / M. C. Kinney, D. Nagle, T. Bastrom, M. S. Linn, A. K. Schwartz, A. T. Pennock // Journal of pediatric orthopaedics. – 2016. – № 36(7). – P. 661–666.

9. Djutin, A. O. Faktory riska neblagopriyatnykh otдалennykh posledstvij pereloma diafiza bol'shebertsovoj kosti u detej [Risk factors of adverse long-term consequences of tibial shaft fractures in children] / A. O. Djutin, R. A. Shkiryanov, A. S. Semenova, K. D. Kyarunts, V. A. Osipov // Hirurgija. Zhurnal im. N. I. Pirogova. – 2023. – № 4. – С. 33–41.

10. Rosinov, V. M. Meditsinskie tehnologii lecheniya detej s diafizarnymi perelomami bol'shebertsovoj kosti [Medical technologies of treating children with diaphyseal fractures of the tibia] V. M. Rozinov, S. I. Jandiev, D. V. Koljagin // Rossijskij vestnik detskoj hirurgii, anestezologii i reanimatologii. – 2016. – Vol. 6, № 3. – С. 118–125 [in Russian].

11. Dolmans, J. Substantial skeletal muscle loss occurs during only 5 days of disuse / J. Dolmans, L. J. C. van Loon // Journal Acta Physiology. – 2014. – № 210. – P. 610–611.

12. Hardy, E. J. O. The time course of disuse muscle atrophy of the lower limb in health and disease / E. J. O. Hardy, T. B. Inns, J. Hatt, B. Doleman, J. J. Bass, P. J. Atherton, J. N. Lund, B. E. Phillips // Journal of Cachexia, sarcopenia and muscle. – 2022. – № 13. – P. 2616–2629.

13. Ligier, J. N. Closed flexible medullary nailing in pediatric traumatology / J. N. Ligier, J. P. Metazeau, J. Prevot // Journal of clinical Chiropractic pediatrics. – 1983. – Vol. 24, № 6. – P. 383–385.

14. El Hawary, H. Bone healing and inflammation: principles of fracture and repair / H. ElHawary, A. Baradaran, J. Abi-Rafeh, J. Vorstenbosch, L. Xu, J. I. Efanov // Journal of Bone healing and inflammation. – 2021. – № 35. – P. 198–203.

15. Shevtcov, V. I. Dinamika krovoobrascheniya mjagkih tkanej goleni pri zameschenii kostnykh defektov v eksperimente [Dynamics of blood circulation in the soft tissues of the leg during replacement of bone defects in the experiment] / V. I. Shevtcov, N. I. Gordievskih, A. N. D'yachkov, I. V. Ruchkina // Rossijskij fiziologicheskij zhurnal. – 2004. – № 9. – С. 1156–1160.

16. Kandybo, I. V. Vosstanovlenie funktsii perifericheskogo krovotoka i nervno-myshechnoj sistemy u pacientov s diafizarnymi perelomami kostej goleni v dinamike osteogeneza [Recovery of regional blood circulation and neuro-muscle system's function in patients with tibia shaft fractures in during osteoregeneration] / I. V. Kandybo, O. I. Shalatonina // Vestnik travmatologii i ortopedii Urala. – 2012. – Т. 6, № 3–4. – С. 60–64.

Поступила 19.03.2025 г.