

ПАТОФИЗИОЛОГИЧЕСКИЕ МЕХАНИЗМЫ ФОРМИРОВАНИЯ КОНТРАКТУР СУСТАВОВ ПРИ УДЛИНЕНИИ КОНЕЧНОСТЕЙ И ИХ КОРРЕКЦИЯ МЕТОДОМ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО БИОУПРАВЛЕНИЯ

С.П. Миронов, И.С. Косов, О.А. Малахов, А.С. Самков, О.В. Кожевников

Центральный институт травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова, Москва

Проведен анализ патофизиологических изменений, происходящих в нейромышечном аппарате при дистракционном остеосинтезе, с использованием биомеханического и электромиографического методов. Определены основные нарушения рефлекторной функции на сегментарном уровне биоуправления околоуставными мышцами, приводящие к их гипертонусу и блокированию смежных суставов. Обоснована возможность использования метода функционального биоуправления с обратной связью по электромиограмме для коррекции контрактур суставов при удлинении конечностей. Представлены примеры клинического применения метода.

Analysis of pathologic changes in neuromuscular system developing during distraction osteosynthesis has been performed using biomechanic tests and EMG. The main reflex dysfunctions on the segmental level of biocontrol for periarticular muscles that results in hypertonia and blocking of adjacent joints are determined. The possibility to apply the functional biocontrol with feedback using EMG for contracture correction at limb lengthening is substantiated. Clinical use of this method is presented.

Удлинение конечностей в настоящее время — широко распространенный вид ортопедической помощи в детской травматологии, ортопедии и костной патологии. Оно проводится с целью уравнивания длины конечностей при посттравматических изменениях, приобретенных, врожденных и наследственных заболеваниях. Особую группу составляют пациенты с диспропорциональной карликовостью, у которых удлинение производится с целью увеличения роста и восстановления пропорциональности скелета.

В нашей практике у ряда больных в процессе удлинения — при небольших его величинах — было отмечено формирование стойких миогенных контрактур. При этом контрактуры сопровождались напряжением четырехглавой мышцы бедра и высоким стоянием надколенника, т.е. признаками, характерными для больших величин удлинения. Это побудило нас к поиску причин и выяснению механизмов их формирования.

Наиболее вероятной причиной развития контрактур смежных суставов при дистракционном остеосинтезе считается реакция мышц, расположенных в области удлиняемого сегмента, которые в результате растяжения блокируют заинтересованные суставы. При исследовании влияния напряжения растяжения на функциональное состояние мышечных тканей выявлены ухудшение силовых параметров мышц; резкий спад амплитуды гло-

бальной ЭМГ с изменением ее спектральных характеристик в виде сужения эффективной полосы и обеднения спектра мощности; возрастание амплитуды ЭМГ «покоя», связанное с повышением интенсивности спонтанных форм биоэлектрической активности; разнонаправленные изменения электронейромиографических показателей; выраженные сдвиги в кровоснабжении мягких тканей.

Генез наблюдаемых патологических явлений принято связывать с реакцией на операционную травму (на первом этапе), с влиянием напряжения растяжения (механическое повреждение двигательных единиц и капилляров). Ограничение объема движений в суставах объясняют механическим натяжением мышц-антагонистов. Анализ динамики выявляемых нарушений функционального состояния нейромышечного аппарата в течение года после демонтажа дистракционного устройства свидетельствует в большинстве случаев об их регрессе. Для снижения риска развития патологических изменений в мягких тканях проводят профилактические мероприятия, подбирают режим удлинения (в среднем 1 мм/сут) в надежде на адекватную адаптацию суставов, нервов и сосудов к изменяющимся условиям [1, 5]. В случае формирования при дистракционном остеосинтезе стойких контрактур суставов говорят о развившихся осложнениях, требующих оперативного и/или длительного консервативного лечения.

С целью снижения частоты осложнений при удлинении конечностей, а также сокращения сроков восстановления функциональных показателей опорно-двигательного аппарата нами предпринята попытка использовать в схеме обсуждаемого лечения метод функционального биоуправления с обратными связями (БОС).

Прежде всего нам предстояло ответить на вопросы: в какой степени блокирование смежных суставов при удлинении конечностей обуславливается механическим натяжением мышц-антагонистов? за счет каких механизмов?

Мы исходим из представлений о мышце как элементе сложноорганизованного аппарата движений, в котором патологические изменения развиваются на уровне отдельных миофибрилл, а также в масштабе всей системы организации локомоций, включающей спинальные и кортикальные структуры нервной системы. С этих позиций большой интерес представляют данные о деятельности мышцы в качестве рецептора.

Более 140 лет назад были открыты специфические мышечные волокна, названные Шеррингтоном интрафузальными (от лат. *fusus* — веретено), функция которых заключается в синтезе афферентной информации, необходимой для построения движений. Интрафузальные волокна — мышечные веретена — располагаются в виде небольших скоплений в основной массе мышц, состоящей из рабочих (экстрафузальных) волокон. Их концы прикрепляются к перимизию экстрафузальных волокон соединительнотканными полосками (подобие маленьких сухожилий). Существуют два типа мышечных веретен, различающихся расположением ядер: волокна с ядерной цепочкой и волокна с ядерной сумкой. Считается, что эти два типа волокон выполняют различные функции (афферентная информация о тонической и о фазической деятельности мышцы). В каждое мышечное веретено входит миелиновое нервное волокно (Ia), которое образует в нем аннуло-спиральное окончание. Растяжение экстрафузального (рабочего) мышечного волокна влечет за собой натяжение веретена и генерацию афферентных импульсов, информирующих о степени растяжения мышцы [2].

В 1870–1883 гг. Гольджи описал главный рецептор сухожилий — «organo nervoso musculo tendineo» («нервный мышечно-сухожильный орган»), расположенный на границе между мышечной и сухожильной тканями, который позднее был назван его именем. Сухожильный орган Гольджи (СОГ) состоит из сухожильных

нитей, отходящих примерно от десяти экстрафузальных мышечных волокон и окруженных соединительнотканной капсулой. К СОГ подходят одно или два толстых миелинизированных афферентных волокна, принадлежащих к группе Ib. Расположенные последовательно с рабочими мышечными волокнами, сухожильные органы генерируют афферентные импульсы, отражающие степень сокращения мышцы и растяжения ее сухожилия [2].

Благодаря этим открытиям в мышечной ткани можно выделить как минимум два типа рецепторов, относящихся к системе проприоцепции: мышечные веретена, оценивающие главным образом длину (растяжение) мышцы, и СОГ, реагирующие на ее сокращения. Первые включены параллельно, а вторые — последовательно с экстрафузальными мышечными волокнами. Импульсы от этих образований имеют важное значение для осуществления движений. Афферентные волокна периферических рецепторов в составе дорсальных корешков входят в спинной мозг, переключаются на мотонейроны, двигательные аксоны которых передают эфферентную импульсацию рабочим мышечным волокнам, замыкая тем самым рефлекторную дугу. Активация рецепторов каждый раз вызывает определенные стереотипные реакции эффекторной части дуги — рефлексы, сложившиеся в процессе филогенеза и онтогенеза как наиболее адекватные. Рассмотрим некоторые из них, играющие, на наш взгляд, определяющую роль в формировании контрактур при удлинении конечностей [3].

Миотатический рефлекс (моносинаптический мышечный рефлекс растяжения) заключается в возбуждении гомонимных нейронов (посылающих свои аксоны к мышце, от которой берет начало афферентный путь) в ответ на активацию веретен при растяжении мышцы. Результатом является сокращение мышцы.

Рефлекс растяжения и реципрокное торможение антагонистов участвуют в регуляции длины мышц. Волокна веретен через дисинаптическую цепь переключаются, помимо гомонимных нейронов, на мотонейроны мышц-антагонистов и оказывают на них тормозящее влияние (феномен реципрокного антагонистического торможения). При активации веретен развивается сокращение мышц, в толще которых они заложены, но при этом расслабляются мышцы-антагонисты, действующие на тот же сустав. Рефлекторные дуги антагонистов идентичны и взаимосвязаны, биологическая роль взаимоотношений их реакций заключа-

ется в поддержании исходной длины мышц при пассивном изменении положения сустава. Например, если под действием силы тяжести коленный сустав начинает сгибаться, то растяжение мышечных веретен разгибателей приводит к возбуждению гомонимных мотонейронов и к реципральному торможению мотонейронов сгибателей. Уменьшение степени растяжения мышечных веретен сгибателей сопровождается спадом возбуждения их мотонейронов и уменьшением тормозных реципральных влияний на мотонейроны разгибателей. В результате мотонейроны разгибателей возбуждаются, а сгибателей — тормозятся, сохраняя исходную длину мышц и удерживая голень в некотором фиксированном положении.

Рефлексы сухожильных органов обеспечивают регуляцию мышечного напряжения. Волокна от сухожильных органов имеют тормозные связи с мотонейронами, иннервирующими мышцы, в сухожилиях которых эти рецепторы локализованы, а также возбуждающие связи с мотонейронами антагонистов. При увеличении напряжения мышцы вследствие ее сокращения усиливается импульсация от СОГ, что приводит к торможению гомонимных мотонейронов. Снижение мышечного тонуса сопровождается растормаживанием этих мотонейронов и повышением их активности.

Таким образом, в регуляции деятельности каждой мышцы участвуют две регуляторные системы обратной связи: система регуляции длины, в которой роль датчика играют мышечные веретена, и система регуляции напряжения, где датчиками служат СОГ. Функционирование этих систем относится к разряду автоматизмов на уровне сегментов спинного мозга.

Для участия мышц в движениях необходимы дополнительные воздействия на их мотонейроны со стороны вышеразположенных нервных структур, а также передача в эти структуры афферентной информации от рассмотренных датчиков. Импульсы от волокон периферических рецепторов передаются по разветвленной сети нервных волокон, идущих к спинальным нервам, благодаря чему афферентная информация поступает одновременно к разным участкам центральной нервной системы (ЦНС). Мотонейроны, в свою очередь, представляют собой образования с одним выходом и с большим числом входов — это от десятков до тысяч аксонов, поступающих с периферии и из самых разных отделов ЦНС. Среди них одна часть оказывает тормозящее, другая — возбуждающее влияние. Генерация

потенциала действия нейрона в каждый момент зависит от суммы этих влияний и возникает лишь в том случае, когда преобладают возбуждающие воздействия.

В свете вышеизложенного изменения в нервно-мышечном аппарате при дистракционном остеосинтезе могут быть представлены следующим образом.

Искусственное создание дистракционного момента в каком-либо сегменте конечности (например, при удлинении бедренной кости) влечет за собой натяжение всех мышц, расположенных в этом сегменте. «Пассивное» растяжение экстрафузальных мышечных волокон сопровождается реакцией веретен, сигнализирующих о необходимости сокращения мышцы. В то же время повышенное напряжение в натянутых сухожилиях инициирует активизацию СОГ, что в соответствии с рефлексом должно вызвать реакцию расслабления мышцы. Эти процессы имеют место во всех мышцах удлиняемого сегмента (антагонистах и синергистах).

На рис. 1 показаны взаимодействия элементов нервно-мышечной системы, развивающиеся при удлинении, а в таблице — отношения возбуждающих и тормозящих афферентных влияний на мотонейроны сгибателей и разгибателей в норме и при напряжении растяжения в среднем физиологическом положении.

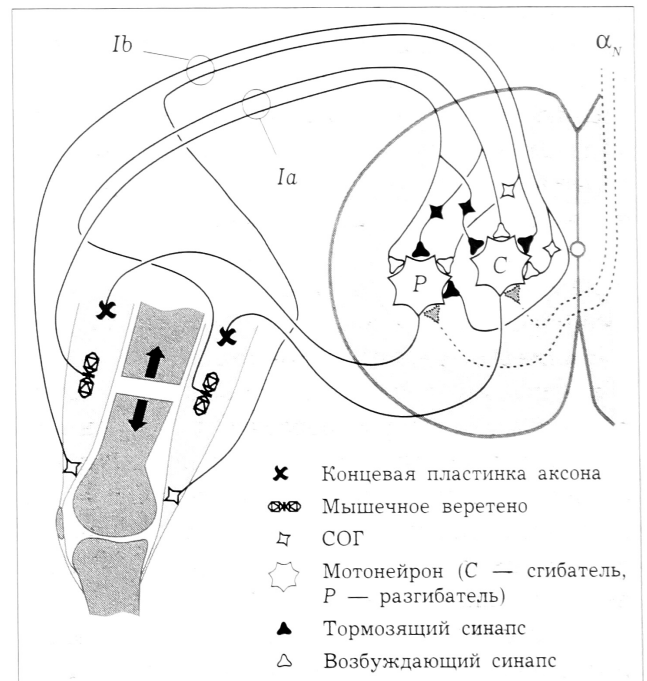


Рис. 1. Взаимодействия элементов нервно-мышечной системы на сегментарном уровне, развивающиеся при удлинении конечности.

Ia — нервные волокна мышечных веретен, Ib — нервные волокна СОГ, α_N — нисходящие аксональные связи.

Отношения возбуждающих и тормозящих афферентных влияний на мотонейроны сгибателей и разгибателей в норме и при напряжении растяжения

Положение дистального сегмента	Возбуждающее влияние							
	Сгибатели				Разгибатели			
	Ia		α		Ia		α	
	H	P	H	P	H	P	H	P
СФП	-	↑	NA	1	-	↑	NA	1
Сгибание	-	- / ↑	NA	1	↑	↑↑	1	1
Разгибание	↑	↑↑	1	1	-	- / ↑	NA	1

Положение дистального сегмента	Тормозящее влияние							
	Сгибатели				Разгибатели			
	Ia _A , Ib		α		Ia _A , Ib		α	
	H	P	H	P	H	P	H	P
СФП	-	↑	NA	0	-	↑	NA	0
Сгибание	↑	↑↑	0	0	-	- / ↑	NA	0
Разгибание	-	- / ↑	NA	0	↑	↑↑	0	0

Обозначения: H — норма; P — напряжение растяжения; СФП — среднее физиологическое положение; Ia — влияние «своих» веретен; Ia_A — влияние веретен антагонистов; Ib — влияние сухожильных органов; α — реакция мотонейрона; NA — отсутствие реакции; «-» — отсутствие воздействия; ↑ — афферентное воздействие; 0 — торможение мотонейрона; 1 — возбуждение мотонейрона.

нии конечности, при пассивном сгибании и разгибании. Возбуждающие влияния являются фактором миотатического рефлекса, а тормозящие — реципрокного торможения антагонистов и рефлексов СОГ, рефлекторная дуга которых представляет собой почти зеркальное отражение дуги реципрокного торможения.

Приведенные данные свидетельствуют о грубом нарушении при удлинении рефлекторной деятельности нервно-мышечного аппарата на сегментарном уровне. Так, если в норме для среднего физиологического положения характерен некий фоновый (тонический) уровень афферентации, при пассивном сгибании — возбуждение мотонейронов разгибателей с реципрокным торможением сгибателей, а при разгибании — обратная ситуация, то при удлинении в мотонейроны всех мышечных групп направлен усиленный поток афферентации одновременно возбуждающего и тормозящего характера.

Для определения этого состояния вполне применим термин «стресс» (англ. *stress*, в физике — сумма всех сил, действующих против равновесных состояний), который Селье ввел в медицинскую терминологию для обозначения

инициаторов адаптационного синдрома. Он же выделил три стадии адаптации, «способствующей приобретению состояния привычки и поддерживающей это состояние» [4]:

- 1) реакция тревоги (alarm reaction — A-R);
- 2) стадия резистентности (stage of resistance — S-R);
- 3) стадия истощения (stage of exhaustion — S-E).

В нашем случае наиболее характерной чертой A-R стадии является избыток афферентации от структур удлиняемого сегмента, обусловленный сначала операционной травмой, а в последующем — богатой проприоцептивной импульсацией вследствие расстройства рефлекторных реакций. Благодаря исключительной пластичности нервной системы эти отклонения в определенной степени корригируются нисходящими влияниями ЦНС (аксональные связи α_N на рис. 1). Кроме того, полученные в некоторых экспериментальных работах сведения о характере афферентации по каналу Ib указывают на возможность уменьшения тормозящего влияния сухожильных органов. В частности, J. Houk и T. Henneman, изучая закономерности распространения импульсов при активации СОГ m. soleus у кошек, выявили более низкие пороги этих рецепторов для одиночного сокращения, а также то, что некоторые рецепторы вовсе неспособны отвечать на чисто пассивное растягивание мышцы. Авторы нашли, что в каждой «сухожильной единице» представлено от 4 до 15 двигательных единиц, тогда как в мышечных веретенах — по 2–5 для разных мышц. Отмечается также прямая связь интенсивности импульсации от рецепторов сухожилий с темпами растяжения [6].

Следовательно, общая реакция нервно-мышечного аппарата на напряжение растяжения выражается в повышении (в основном) возбуждающих афферентных влияний на мотонейроны спинного мозга, их гиперполяризации и склонности к спонтанным разрядам. Изменения в мышцах проявляются повышением тонуса покоя, обуславливающим развитие мышечных контрактур. Роль нисходящих влияний, по-видимому, заключается в оказании тормозящих воздействий на мотонейроны, восстановлении за счет смены их интенсивности реципрокных отношений на сегментарном уровне. От степени «успешности» решения этих задач зависит то, насколько полно восстановится функция удлиняемой конечности и как долго будет длиться стадия резистентности адаптационного процесса.

Для стимуляции процесса формирования адекватных нисходящих влияний ЦНС мы применили воздействие на кортикальные структуры двигательной сферы сигналами внешней обратной связи. В качестве управляемого параметра использовали биоэлектрическую активность мышц-антагонистов удлиняемого сегмента (БОС по ЭМГ). Усиленные сигналы ЭМГ после обработки и дифференцирования поступали в персональный компьютер и выполняли роль управляющих в игровом сюжете. В качестве сигнала положительной обратной связи выступала, как правило, информация об активности сгибателей, а роль отрицательной играли биотоки разгибателей. Задачей пациента было работать мышцами, обеспечивая движение объекта в программе. Стремясь к успеху в игре, пациент пытался вызвать произвольную активность в сгибателях (согнуть голень). Если это ему удавалось, машина в игре начинала двигаться, однако появление активности в разгибателях приводило к торможению объекта. Тренировки с БОС проводились после демонтажа дистракционного аппарата.

В качестве иллюстрации приведем два клинических примера.

Больной М., 8 лет. Диагноз: врожденное укорочение правой нижней конечности. Проводилось удлинение правого бедра на 4 см. После снятия стержневого аппарата отмечена разгибательная контрактура в правом коленном суставе: амплитуда пассивных движений $180-170^\circ$, активные движения отсутствуют. При исследовании ЭМГ-активности мышц-антагонистов правого бедра выявлено нарушение реципрокных отношений (рис. 2, а), больше выраженное при попытке сгибания. Назначен курс БОС-терапии. Через 2 нед лечения амплитуда активных движений составила $180-100^\circ$, пассивных — $180-80^\circ$.

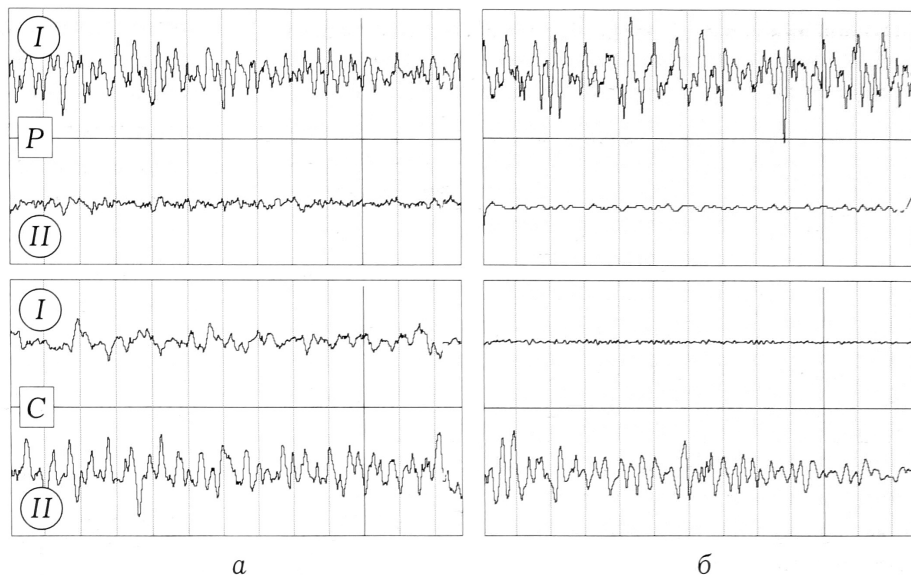


Рис. 2. Электромиограммы больного М. до (а) и после (б) БОС-терапии.

I — активность разгибателей, II — сгибателей голени; P — разгибание, C — сгибание голени.

На рис. 2, б представлены миограммы антагонистов, отражающие их биоэлектрическую активность в крайних положениях произвольных движений.

Больной К., 13 лет. Диагноз: гипохондроплазия. Произведено перекрестное удлинение костей правой голени и левого бедра на 7 см. После демонтажа аппаратов проводилось консервативное лечение в течение 5 нед. Функция правой нижней конечности восстановилась, слева сформировалась стойкая разгибательная контрактура в коленном суставе. На ЭМГ (рис. 3, а) — грубое нарушение реципрокности в деятельности мышц бедра при попытке активного сгиба-

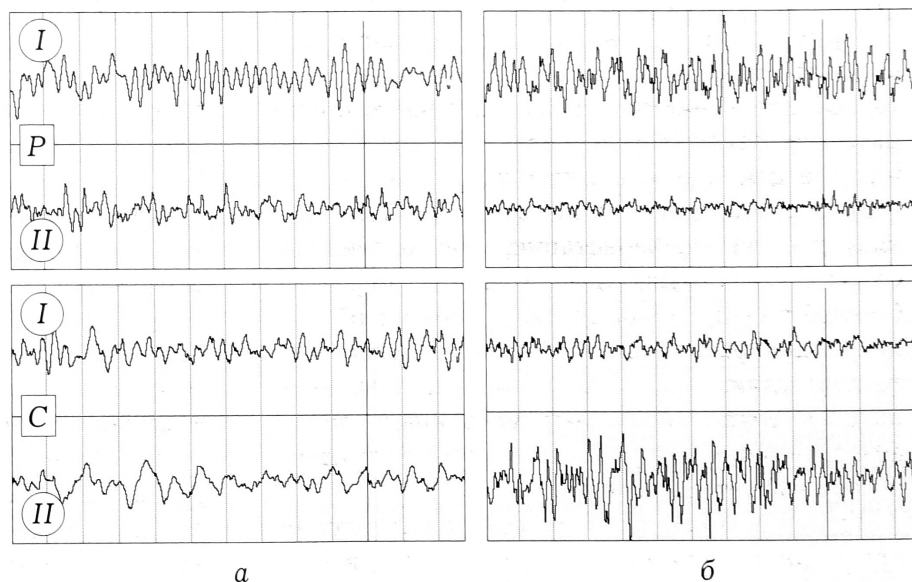


Рис. 3. Электромиограммы больного К. до (а) и после (б) БОС-терапии.

I — активность разгибателей, II — сгибателей голени; P — разгибание, C — сгибание голени.

ния и разгибания голени. Проведен курс лечения с БОС — 20 сеансов в течение 4 нед. Движения в коленном суставе восстановлены в объеме: активное сгибание 110°, пассивное — 90°. Данные электромиографии (рис. 3, б) свидетельствуют о положительной динамике в биоуправлении сгибателями и разгибателями голени.

Использование БОС по ЭМГ позволило нам значительно сократить срок восстановления рефлекса растяжения и реципрокного торможения антагонистов, а также ускорить коррекцию сформировавшихся контрактур суставов. Общая продолжительность БОС-терапии напрямую зависела от величины произведенного удлинения. Критерием нормализации биоуправления функцией удлиняемой конечности служило восстановление нормальных соотношений электромиографических показателей активности мышц-антагонистов. Минимальный срок достижения результата в наших наблю-

дениях составил 2 нед (10 сеансов), максимальный — 4 нед (20 сеансов). Как правило, к этому времени появлялись уверенные произвольные движения конечностью, восстанавливался нормальный акт ходьбы, достигался угол активного сгибания 90° и более.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Бережной А.П., Меерсон Е.М., Юкина Г.П., Раззоков А.А. Остеохондродисплазия у детей. — Душанбе, 1991. — С. 135–139.
2. Гранит Р. Основы регуляции движения. — М., 1973. — С. 54–67.
3. Дудел Дж., Рюэгг И., Шмидт Р., Яниг В. Физиология человека. — М., 1985. — Т. 1. — С. 113–134.
4. Селье Г. Очерки об адаптационном синдроме. — М., 1960. — С. 58–66.
5. Шевцов В.И., Макушин В.Д., Арапович А.М., Кечуров О.К. Хирургическое лечение врожденных аномалий развития берцовых костей. — Курган, 1998. — С. 197–211.
6. Houk J., Henneman T. // J. Neurophysiol. — 1967. — Vol. 30 — P. 466–481.

© Коллектив авторов, 2000

ПРОЕКТИРОВАНИЕ НАВИГАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ТРАВМАТОЛОГИИ И ОРТОПЕДИИ: СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Г.И. Назаренко, А.М. Черкашов, А.Г. Назаренко

Медицинский центр Центрального банка Российской Федерации, Москва

Изложены основы проектирования навигационных технологий в травматологии и ортопедии. На примере применения навигации при фиксации позвоночника транспедикулярными конструкциями показаны преимущества современных технологий перед классическими технологиями оперативного лечения патологии позвоночника. Предложены критерии для сравнительной характеристики навигационных систем. Проведен анализ конкретных навигационных систем. Обоснована целесообразность создания региональных хирургических центров навигационного планирования, которые могут сотрудничать с клиниками, где проводится оперативное лечение с использованием навигационных программных комплексов. Это исключает необходимость оснащения клиник дорогостоящим диагностическим оборудованием, сохраняя преимущества навигационных систем.

The basis of the projection of navigation technologies in traumatology and orthopaedics are presented. The stages for the application of navigation technologies for the planning and performance complex surgical interventions which have traditionally rather high rate complications are described in details. Application of navigation program methods allows to achieve the main aim of modern surgery, i.e. treatment quality and provision of patient's safety. The organization of region surgical centers for navigation planning is substantiated.

Навигационные технологии — приоритетное направление современной хирургии. Нейрохирургия, ортопедия, кардиохирургия, оториноларингология — далеко не полный перечень разделов хирургической науки, где навигационные технологии, перейдя из разряда эксперимента, прочно заняли свое место в клинической практике.

Между тем, для отечественной травматологии и ортопедии это направление новое. Отсутствует не только опыт практического использования навигационных технологий, но и информация, на основании которой можно было бы реализовать проект такого типа. Последнее обстоятельство является весьма важным, поскольку полная стоимость подобных проектов исчис-