

© Коллектив авторов, 1999

С.П. Миронов, М.Б. Цыкунов, И.С. Косов

БИОЛОГИЧЕСКАЯ ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ КАК ПЕРСПЕКТИВНОЕ НАПРАВЛЕНИЕ РЕАБИЛИТАЦИИ В ТРАВМАТОЛОГИИ И ОРТОПЕДИИ ПРИ НАРУШЕНИЯХ ДВИГАТЕЛЬНОЙ ФУНКЦИИ

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

Научно обоснована эффективность использования биологической обратной связи в лечении двигательных расстройств при повреждениях и заболеваниях опорно-двигательного аппарата. Показаны принципы ее применения, определены средства и методы биоуправления с обратными связями.

Патогенетические механизмы изменений опорно-двигательного аппарата, развивающихся после его травмы, сложны и многогранны. Регистрация параметров мышечной деятельности при травмах выявляет значительное снижение функциональной подвижности исследуемых мышц, понижение возбудимости, лабильности и, как следствие, выраженное ухудшение интегральных показателей их функции — силы, работоспособности и выносливости [6]. Многие исследователи отмечают дефицит афферентной импульсации, идущей от рецепторов мышц и сухожилий, как при повреждениях, так и при иммобилизации конечности, подчеркивая существенную роль данного фактора в формировании контрактур [2, 5]. Изучение реакции организма на травму показало, что одним из характерных нарушений является расстройство движений. Анализ изменений, происходящих в двигательной сфере, свидетельствует о нарушении координации не только важнейших и жизненно необходимых локомоторных актов, но и различных хорошо отработанных двигательных навыков, координированных движений, выработанных в процессе жизнедеятельности. Причина таких нарушений координации — снижение силы мышц, их повышенная утомляемость, ухудшение взаимодействия различных групп из-за расстройства и распада синергий, лежащих в основе механизмов регуляции позы, выполнения как бытовых, так и специальных двигательных актов.

Проблема восстановления нарушенных двигательных функций и создания компенсаторных (новых) двигательных актов является предметом пристального внимания специалистов различных областей медицины. Наряду с

общепринятыми методами лечения двигательных расстройств в последние годы в клинической практике начинают использовать приемы биоуправления с обратной связью для направленной коррекции двигательных функций как способ активного контроля за правильностью выполнения нужного движения [7–9]. Однако развитие этого направления в травматологии и ортопедии имеет ограниченный характер. Не определены показания к применению биоуправления при ортопедической патологии, нет единого подхода к использованию его различных видов.

Сегодня сложно дать однозначный ответ на такие вопросы, как: чем дополняет биологическая обратная связь процесс лечения? когда и какой вид биоуправления следует использовать? у каких пациентов? в комбинации с какими методами?

В характеристиках движений человека могут быть условно выделены два основных аспекта: внешние биомеханические параметры и внутренняя физиологическая структура двигательного акта, обуславливающая конечный результат. Одним из самых важных элементов организации движений является координация мышечной деятельности, превращение опорно-двигательного аппарата в управляемую систему. Структуры, ответственные за координацию, локализуются в различных отделах центральной нервной системы — от коры больших полушарий до спинного мозга. В их деятельности прослеживается четкая иерархия, отражающая постепенное усовершенствование двигательных функций в процессе эволюции. При этом происходила не столько перестройка существовавших двигательных систем, сколько надстраивание новых, контролируемых, отвечающих за определенные программы движений.

Двигательный аппарат человека организован по принципу саморегулирующейся системы следящего типа с непрерывной программной сменой регуляционных воздействий в каждом конкретном случае того или иного движения. Функционирование данной системы, саморегулирующейся по какому-либо параметру, обеспечивается наличием следующих элементов [3]:

- 1) **эффлектор** (мотор), работа которого подлежит регулированию по данному параметру;
- 2) **задающий элемент**, вносящий тем или иным способом *требуемое значение* регулируемого параметра в систему;
- 3) **рецептор**, воспринимающий *фактическое*

текущее значение параметра и сигнализирующий о нем в прибор сличения;

4) **прибор сличения**, воспринимающий расхождение фактического и требуемого значений с его величиной и знаком;

5) **устройство, перешифровывающее** данные прибора сличения в коррекционные импульсы, подаваемые по обратной связи на регулятор;

6) **регулятор**, управляющий по данному параметру функционированием эффлектора.

Система организована по принципу замкнутого контура взаимодействий, схема которого приведена на рис. 1.

Применительно к двигательной сфере человека указанные элементы имеют отражение в следующих структурах: в качестве *эффлектора* выступают мышцы (моторные единицы); в качестве *задающего элемента, прибора сличения и перешифровывающего устройства* — подкорковые и корковые мотивационные зоны (побуждение к действию), ассоциативные зоны коры полушарий головного мозга (замысел действия), мозжечок, базальные ганглии, таламус, двигательная кора (схемы приобретенных и врожденных целенаправленных движений), ствол мозга (регуляция позы); в качестве *рецептора* — интрафузальные мышечные волокна, сухожильные органы Гольджи; в качестве *регулятора* — спинномозговые нейроны [4]. *Параметром*, по которому саморегулируется двигательная система, может служить целый ряд качеств опорно-двигательного аппарата: тонус, сила и выносливость мышц, точность выполнения движения, успех в выполнении двигательной установки и т.п. Функциональным отражением деятельности настроенной саморегулирующейся системы является двигательный стереотип (локомоция).

Формирование стереотипа движений имеет определенные закономерности и этапы. Согласно теории Н.А. Бернштейна об уровнях построения движений этот процесс обеспечивается взаимодействием эволюционно сложившихся функциональных уровней [3].



Рис. 1. Схема взаимодействий элементов саморегулирующейся системы двигательного аппарата в норме [3].

Уровень А (руброспинальный) — уровень палеокинетических движений — определяет простые составляющие движения: тонус, силовые, скоростные и другие характеристики сокращения мышц, реципрокную иннервацию. Действия уровня А почти полностью произвольны, определяются функционированием сегментарного аппарата спинного мозга и фоновым изменением его возбудимости. Сенсорная организация деятельности этого уровня включает лишь проприоцепцию. Функциональными показателями уровня А являются: тонус мышц, их сила, рефлекторная активность, электровозбудимость.

Уровень В (таламопаллидарный) — уровень мышечно-суставных увязок, синергий — определяет всю внутреннюю увязку движения, согласовывает между собой поведение мышц, налаживает внутренние синергии. Данный уровень работает без привлечения сознания, многое в его отправлениях произвольно. Уровень В у человека хорошо приспособлен к усвоению жизненного опыта, к построению новых координаций, созданию двигательных автоматизмов («фон на заказ»), обеспечивая такие качества моторики, как ловкость, грациозность, пластика и др. Деятельность уровня В реализуется через уровень А, подчиняясь вышележащему уровню С. Функциональные показатели уровня В связаны со статическими показателями — распределение тонуса различных мышечных групп в обеспечении позы, прямохождения, внешнего вида и с динамическими — автоматизированная (бесцельная) ходьба, повороты, вставание и т.п.

Уровень пространства (С), включающий пирамидную систему и полосатое тело, обеспечивает целевые переместительные движения, реализующие воздействие на элементы внешнего мира. Основные движения этого уровня — локомоции, связанные с перемещением всего тела в пространстве, точные, целенаправленные движения рук, разнообразные специфические движения (спортивные, балетные и пр.), силовые движения, связанные с преодолением сопротивления, ударные движения и т.п.

Высшие кортикальные уровни — теменно-премоторный уровень действий D и смысловой уровень E — характеризуются условно-рефлекторной деятельностью и по целому ряду свойств резко отличаются от описанных выше уровней. Самые ранние зачатки проявлений этих уровней встречаются только у наиболее развитых млекопитающих. Все движения решают ту или другую двигательную задачу, связаны между собой смыслом. Эти движения заучиваются, они не являются врожденными. Данным уровням свойственны такие характеристики высшей нервной деятельности, как освоение задачи, тренируемость, память, потеря (забывание) специального высокоорганизованного навыка.

Исходя из теории об уровнях организации движений двигательный стереотип можно определить как часть двигательной сферы, включающую уровни А, В и С и реализуемую с помощью механизмов обеспечения тонуса и синергий в пространственных соотношениях. Уровень D, используя возможности (локомоции) более низких уровней, позволяет реализовать сложноорганизованные двигательные акты (речь, письмо, танец балерины, дриблинг футболиста, игра скрипача). Наконец, уровень E привносит в движения осмысленность (чтение стихов «с выражением», игра на результат ...).

Взаимоотношение различных уровней в реализации движений можно проиллюстрировать следующим примером:



Из представленных уровней два низших (А и В) работают в основном автоматически, без осознанного контроля, представляя собой огромный набор двигательных автоматизмов, используемых выше расположенными уровнями. Однако именно они, особенно уровень А, подвергаются разрушению в результате травм опорно-двигательного аппарата. Очевиден тот факт, что дисфункция их структур лишает базиса следующие по иерархии уровни, приводит к нарушению существующих двигательных стереотипов и расстройству движения. В первую очередь страдают самые «молодые» высшие структуры — уровни D и E. Получившие травму быстро теряют профессиональную или спортивную квалификацию. Если повреждение сохраняется длительное время, возможны расстройства движений уровня пространства (С), в результате пациенты вынуждены заново осваивать специфические профессиональные двигательные навыки.

Пусковым моментом в цепи патогенетических изменений саморегулирующейся системы может служить повреждение любого ее элемента. Наиболее уязвимой частью является процесс афферентации (рецептор). Недостаточность функции рецептора нарушает целостность замкнутого контура взаимодействий (рис. 2, а). Реакцией организма в данной ситуации является поиск оптимальной формы замещения утраченной функции. Происходит попеременное включение то одних, то других рабочих комплексов («уцелевших» замкнутых контуров) до

тех пор, пока, наконец, не будет найдена та система центральных возбуждений, которая приведет к восстановлению потерянной функции. П.К. Анохин рассматривает афферентацию как ключевой элемент функциональной системы, отдавая ей ведущую роль в процессе компенсации утраченной или расстроенной функции [1].

Одним из наиболее перспективных направлений совершенствования восстановительного лечения больных с двигательными нарушениями представляется использование методов функционального биоуправления с обратными связями по различным параметрам двигательной активности. Суть этих методов заключается в создании искусственного канала афферентации при нарушении двигательной функции и предоставлении пациенту в доступной для восприятия форме информации о текущих изменениях контролируемого параметра. С позиции саморегулирующейся системы, равно как и функциональной системы, биологическая обратная связь (БОС) занимает место рецептора, включаясь параллельно ему и тем самым замыкая разорванный контур взаимодействий (рис. 2, б).

БОС можно определить как метод функционального лечения с использованием различных способов измерения и отслеживания физиологических параметров, их интерпретации и оперативного предоставления пациенту сведений об активности контролируемой функции.

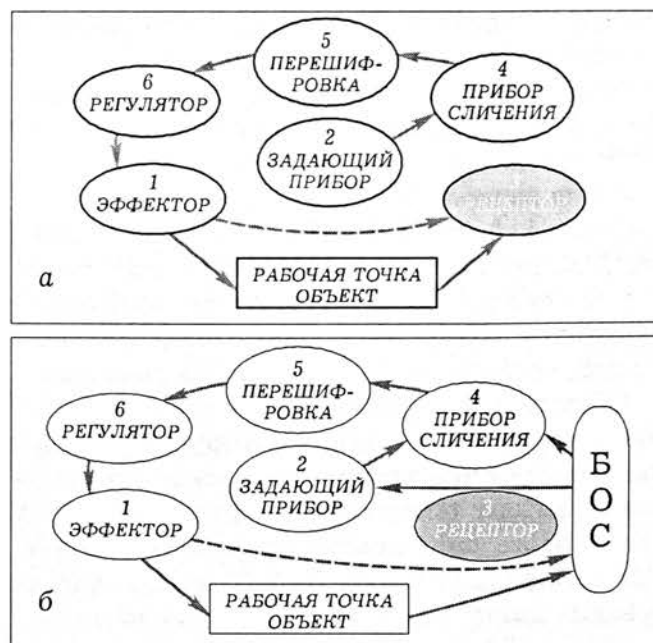


Рис. 2. Схема взаимодействий элементов саморегулирующейся системы двигательного аппарата: при развитии дефицита афферентации (а) и при создании внешнего канала афферентации с помощью БОС (б).

Цель БОС при лечении травм и заболеваний опорно-двигательного аппарата состоит в повышении уровня осознания и произвольного контроля физиологических процессов, неосознаваемых и неконтролируемых произвольно вследствие снижения, извращения или утраты афферентации.

Объектом воздействия БОС является больной со всеми особенностями функциональных изменений его организма. Анализ этих изменений определяет спектр применяемых средств БОС.

Таким образом, БОС — это метод патогенетической терапии, основанный на современных представлениях о процессах компенсации нарушенной функции, использующий основные психофизиологические элементы моторного обучения.

Следует отметить, что БОС является методом неспецифической терапии: обеспечивая регистрацию, усиление, интерпретацию и предоставление пациенту информации об активности восстанавливаемой функции, он оказывает стимулирующее влияние на процессы компенсации. Усиление афферентации с помощью внешнего канала способствует поиску оптимальных вариантов восстановления или замещения функции сначала путем контролирования внешних сигналов о ней, а затем путем сознательного регулирования внутреннего физиологического состояния.

Основными показаниями к назначению метода являются функциональные нарушения опорно-двигательной системы, возникшие в результате травмы или заболевания.

Противопоказания связаны с затруднениями в восприятии внешней информации об активности контролируемой функции, обусловленными индивидуальными особенностями высшей нервной деятельности. Проведение сеансов БОС предполагает активное участие пациента в лечебном процессе, поэтому необходимо учитывать его возраст, психоэмоциональный статус, уровень интеллектуального развития.

Обязательные требования — функциональная диагностика имеющихся нарушений с целью определения реабилитационного потенциала и выбора оптимального средства БОС, а также проведение диагностических мероприятий на этапах лечения. Выбор методов обследования диктуется характером патологии.

Метод БОС не является средством монотерапии, его использование в лечебном процессе создает физиологический базис для улучшения функции, реализация которого возмож-

на только путем комплексного воздействия основными средствами реабилитации (лечебная гимнастика, физиотерапия и др.).

Средства БОС определяются целевой установкой функциональной терапии. При реализации внешнего канала афферентации необходимо учитывать ряд факторов.

Контролируемый параметр. В качестве параметра выступают показатели функции, нуждающейся в компенсации. Таковыми могут быть: биоэлектрическая активность, тонус, сила мышц, реципрокность сокращения антагонистов, качественные характеристики движений конечностей — амплитуда, скорость и т.д.

Средство регистрации (датчик) определяется избранным контролируемым параметром и характером проявления его активности. Для биоэлектрической активности мышц это электромиографические датчики, для силы — динамометрические, для амплитуды движений в суставе — гониометрические и т.д. На заре развития метода БОС применялись более «доступные» средства: пальпация пациентом ослабленной мышцы с целью оценки ее напряжения по тактильным ощущениям, использование зеркала во время проведения лечебной гимнастики для зрительной самооценки правильности выполнения движений и др. Надо отметить, что ценность этих приемов не уменьшилась и сегодня.

Канал обработки сигналов датчика может иметь различную по сложности структуру (от простой пневматической или гидравлической системы до компьютерного комплекса), работать по принципу анализа аналоговых или цифровых сигналов. Важно, чтобы он не искажал сигнал датчика.

Средства сигнализации являются специфическими элементами биоуправления. Их роль заключается в передаче пациенту информации об активности контролируемой функции. Например, больному не обязательно знать физиологические механизмы нейромышечной передачи или сокращения мышечных волокон, но он должен четко понимать, что включение сигнального средства отражает повышение активности тренируемой мышцы и ничего более. В реализации метода БОС наиболее распространенными сигналами являются зрительные (разноцветные лампочки, бегущие дорожки) и слуховые (сигналы разной тональности).

Формы организации БОС. При компенсации двигательных нарушений, характерных для уровня А, используется один канал БОС.

Сигнал установки имеет непосредственную связь с активностью контролируемой функции. Коррекция нарушенных синергий уровня В также допускает использование одноканальной установки, но со смысловой коррекцией: для снятия нежелательной гиперактивности функционального элемента пациенту необходимо добиваться выключения сигнала. Однако предпочтительнее применение многоканальной установки БОС. Восстановление движений уровня С — достаточно сложная задача, требующая использования многоканальной системы с возможностью дифференцирования сигналов.

Одной из форм организации обратной связи является использование в качестве средств сигнализации игровых сюжетов. Эффективность биоуправления определяется интенсивностью мотивации, остротой «настройки» пациента на достижение устойчивого уровня саморегуляции функции. Использование компьютерных мультимедийных игр повышает интерес пациента к процедуре, ее сценарию, придает происходящему эмоциональную окраску.

В качестве примера использования БОС приведем несколько клинических наблюдений.

Больной Л., 37 лет, 24.07.99 в автоаварии получил перелом правой плечевой кости на границе средней и нижней трети. 10.08.99 произведен накостный остеосинтез пластиной. В послеоперационном периоде выявлено выпадение функции правого лучевого нерва, по поводу чего назначен курс физиотерапевтического лечения (электростимуляция, электрофорез прозерина, массаж). Восстановления функции пораженного нерва не наблюдалось, нарастала гипотрофия мышц-разгибателей кисти и пальцев. 27.09.99 проведено электростимуляционное ЭМГ-исследование, показавшее резкое снижение амплитуды М-ответа при стимуляции лучевого нерва, отсутствие М-ответа с точки Эрба.

При осмотре 15.10.99: выраженная гипотрофия мышц предплечья (дефицит окружности предплечья 3 см), сила разгибателей кисти и пальцев, по данным мануального мышечного тестирования, 0 баллов. При регистрации глобальной ЭМГ выявлено значительное снижение активности мышц-разгибателей (рис. 3, а). Проведен курс лечения, включавший электростимуляцию, массаж, ЛФК, а также тренировку с БОС по ЭМГ с использованием дифференцирующей установки.

К исходу 2-й недели лечения гипотрофии мышц предплечья уменьшилась (дефицит длины окружности предплечья 0,5 см), сила разгибателей кисти составила 2 балла, пальцев — 1 балл. Через 4 нед проведено ЭМГ-исследование (рис. 3, б), резуль-

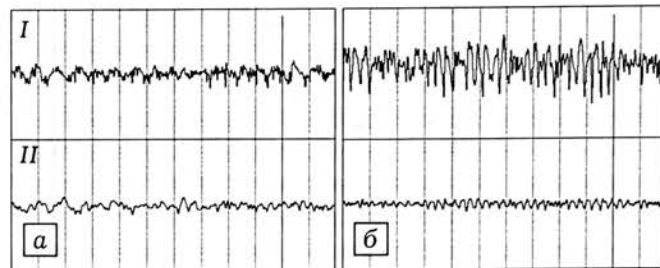


Рис. 3. Тестирование активности мышц предплечья при разгибании кисти у больного Л.

а — до лечения, б — после лечения с использованием БОС; I — мышцы-разгибатели, II — сгибатели кисти.

таты которого свидетельствовали о восстановлении произвольной активности паретичных мышц. При стимуляционной электромиографии 11.11.99 отмечена положительная динамика: появление М-ответа на стимуляцию в точке Эрба, возрастание амплитуд М-ответов. При мануальном мышечном тестировании сила разгибателей кисти оценена в 2,5 балла.

Больная К., 6 лет. Диагноз: врожденное укорочение правого бедра на 5 см. С 11.02.98 по 16.04.99 проводилось удлинение бедренной кости с помощью спицестержневого аппарата. После снятия аппарата выявлена разгибательная контрактура коленного сустава (разгибание 180°, сгибание 160°). Проведен курс лечения, включавший ЛФК, парафинотерапию, массаж. Пассивное сгибание доведено до 150°. Больная выписана домой с рекомендациями продолжить разработку движений.

14.10.99 повторно госпитализирована (объем движений 180–160°). Проведено ЭМГ-исследование (рис. 4, а), выявлено активное противодействие четырехглавой мышцы бедра сгибанию голени. Назначен курс лечения, включающий ЛФК, парафинотерапию, массаж, а также тренировку с БОС по ЭМГ с использованием дифференцирующей установки. К 22.10.99 получен угол активного сгибания 80°, на ЭМГ (рис. 4, б) зарегистрировано восстановление реципрокных взаимоотношений при сокращении сгибателей и разгибателей голени.

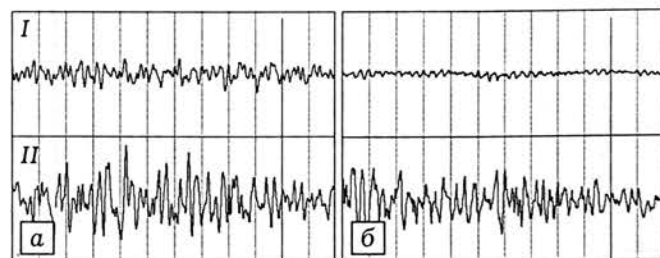


Рис. 4. Тестирование активности мышц бедра при сгибании голени у больной К.

а — до лечения, б — после лечения с использованием БОС; I — мышцы-разгибатели, II — сгибатели голени.

Больной Е., 32 лет. Диагноз: посттравматический гонартроз справа. 12.09.97 во время занятий горными лыжами (любитель) получил разрыв передней крестообразной связки, повреждение обоих менисков и медиального отдела капсулы правого коленного сустава. 17.09.97 произведены артроскопическая пластика передней крестообразной связки, удаление менисков, санация сустава, ушивание капсулы. В последующем — этапная реабилитация, восстановление функции коленного сустава.

4.10.99 обратился с жалобами на чувство неуверенности при ходьбе, повышенную утомляемость. При осмотре выявлена умеренная гипотрофия четырехглавой мышцы бедра, в основном за счет ее внутренней головки. Сила мышц, по данным мануального мышечного тестирования, составляет 5 баллов. Результаты изокинетического тестирования (рис. 5, а) свидетельствуют о снижении силы разгибателей голени, значительном дефиците функции односуставных головок четырехглавой мышцы. Проведен курс реабилитационных мероприятий, включающий ЛФК, массаж, тренировку с БОС по вращающему моменту в изокинетическом эксцентрическом режиме аппарата «BIODEX».

Результаты изокинетического тестирования, проведенного 18.10.99 (рис. 5, б), свидетельствуют о процессе восстановления функции односуставных головок (отрезок А на кривой). 29.10.99 курс лечения завершен. При контрольном тестировании 9.11.99 выявлено повышение силы разгибателей голени (205 Н·м против 156 Н·м в начале курса), восстановление функции односуставных головок.

В настоящее время продолжают работы по изучению механизмов действия БОС, повышению ее эффективности, созданию новых аппаратных средств реализации этого метода. В последние годы наметилась четкая тенденция компьютеризации средств биоуправления, включения физиологического управляемого параметра в алгоритм игровых или ситуационных программ. Учитывая очевидную близость принципов управления функциональными системами двигательной сферы с принципами кибернетики, а также большие успехи компьютерной индустрии, можно полагать, что методики биоуправления с обратными связями в травматологии и ортопедии имеют весьма широкую перспективу.

ЛИТЕРАТУРА

1. Анохин П.К. Узловые вопросы теории функциональной системы. — М., 1980. — С. 90–104.
2. Атаев З.М. Изометрическая гимнастика при лечении переломов трубчатых костей. — М., 1973. — С. 138–144.
3. Бернштейн Н.А. Физиология движений и активность. — М., 1990. — С. 44–140.
4. Дудел Дж., Рюэгг И., Шмидт Р., Яниг В. Физиология человека. — М., 1985. — Т. 1. — С. 121–134.
5. Каптелин А.Ф. // Проблема компенсаторных приспособлений. — М., 1960. — С. 90–95.
6. Черкасова Т.И. // Ортопед. травматол. — 1965. — N 6. — С. 50.
7. Черникова Л.А. // Журн. невропатол. и психиатр. — 1984. — Т. 84, N 12. — С. 1795–1798.
8. Brudny J., Korein J., Grynbaum B.B. et al. // Arch. Phys. Med. Rehabil. — 1976. — Vol. 57, N 1. — P. 55–61.
9. Wise H.H., Fiebert I.M., Kates J.L. // J. Orthop. Sport. Phys. Ther. — 1985. — Vol. 6, N 2. — P. 95–103.

BIOLOGIC FEEDBACK AS A PERSPECTIVE DIRECTION FOR REHABILITATION IN TRAUMATIC AND ORTHOPEDIC DISTURBANCES OF MOTOR FUNCTION

S.P. Mironov, M.B. Tsykunov, I.S. Kosov

Efficacy of biologic feedback for the treatment of motional Disturbances in locomotor system injury is scientifically stipulated. Principles of the method application are shown; means and methods of biocontrol with feedback are defined.

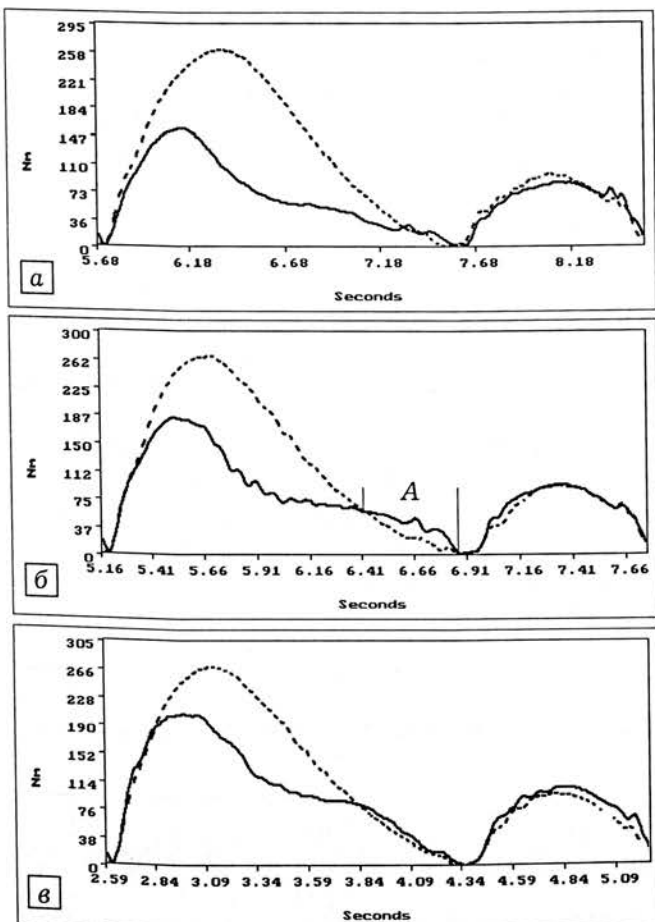


Рис. 5. Результаты изокинетического тестирования больного Е.

а — до лечения, б — в процессе лечения, в — по окончании лечения с использованием БОС.