

И. А. ИЛЬЯСЕВИЧ¹, Е. В. СОШНИКОВА¹, А. А. ВИШНЕВСКИЙ²,
О. И. ДУЛУБ¹, В. А. КУЛЬЧИЦКИЙ³

ЭЛЕКТРОФИЗИОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОВОДИМОСТИ СПИНАЛЬНЫХ ПУТЕЙ ПОСЛЕ ТРАВМЫ ПОЗВОНОЧНИКА

Поступила 09.04.09

Проведено комплексное электрофизиологическое обследование состояния спинальных нейронных механизмов у пациентов с осложненной травмой позвоночника ($n = 52$). Регистрировались ЭМГ-ответы мышц верхних и нижних конечностей, вызванные стимуляцией периферических нервов, а также эффекты магнитной стимуляции (МС) коры (транскраниальная МС–ТМС) и спинальных корешков и соматосенсорные вызванные потенциалы (ССВП). Частичное нарушение двигательных функций конечностей наблюдалось у 21 пациента. У пострадавших с полным отсутствием движений в конечностях ($n = 31$) в подочаговой зоне выявлялись два варианта паттернов электрофизиологических феноменов: у 21 пациента вызванные потенциалы полностью отсутствовали, а у 10 наблюдались редуцированные моторные ответы после магнитной стимуляции (МС–МО) и ССВП. Наличие таких потенциалов свидетельствовало о частичной сохранности церебро-спинальных путей в условиях повреждения спинного мозга. Таким образом, оценка результатов комплексного электрофизиологического обследования позволяет объективно верифицировать состояние проводимости путей спинного мозга в динамике, обосновать тактику лечения и оценить эффективность мероприятий, проводимых для восстановления утраченных функций спинальных механизмов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: спинной мозг, моторные ответы, Н-рефлекс, магнитная стимуляция, соматосенсорные вызванные потенциалы.

ВВЕДЕНИЕ

В спинном мозгу представлены две функционально взаимосвязанные группы структур – сегментарный нейронный аппарат и проводящие пути. Нарушение целостности и /или функции проводящих путей при травмах позвоночника и ряде заболеваний отражается на состоянии контроля сегментарных нейронных систем и реализации спинально-супраспинальных и супраспинально-спинальных рефлексов. Угнетение проводящей функции спинного мозга после его травматического повреждения часто является не столько результатом собственно механического воздействия, сколько следствием вторичных патологических процессов, которые

иницируются травмой. Эти процессы включают в себя серию взаимосвязанных реакций, сопровождающихся гибелью изначально неповрежденных спинальных нервных клеток и их отростков, усугубляет нарушения связей нервных центров над- и подочаговых зон спинного мозга [1, 2]. В итоге травмы позвоночника и спинного мозга сопровождаются сложным комплексом сенсорных, двигательных и вегетативных нарушений, из которых наиболее тяжелыми и неблагоприятными в прогностическом аспекте являются расстройства управления произвольными движениями [2, 3]. Следует признать, что кардинальные вопросы, связанные с восстановлением контроля движений после травмы спинного мозга, пока далеки от удовлетворительного решения, и данная проблема остается высокоактуальной. Описание и классификация соматического и психического состояний больных, желание специалистов помочь пациентам с помощью современных терапевтических и хирургических методов, соответствующих принципу «*non nocere*», в интегрированной форме изложены в многочислен-

¹ Республиканский научно-практический центр травматологии и ортопедии, Минск (Республика Беларусь).

² Санкт-Петербургская медицинская академия последипломного образования (РФ).

³ Институт физиологии НАН Беларуси, Минск (Республика Беларусь).

Эл. почта: vladi@fizio.bas-net.by (В. А. Кульчицкий).

ных тематических статьях, но лишь в единичных из них сделаны попытки комплексного структурного и функционального анализа закономерностей развития патологических процессов при травмах позвоночника и спинного мозга [4–6].

Современные электрофизиологические методы оценки рефлекторной деятельности спинного мозга, функций его волоконных путей и периферических нервов позволяют осуществлять весьма подробный мониторинг состояния нервных проводников *in vivo*, не нарушая в процессе регистрации целостности нервной ткани [7–10]. В то же время нейрофизиологические критерии оценки нарушений функций спинного мозга до сих пор разработаны в недостаточной степени и в практической медицине часто не используются в полном объеме. В связи с этим мы попытались провести комплексный нейрофизиологический анализ особенностей проводниковой и рефлекторной функций спинного мозга после травматических повреждений позвоночника на основе данных электронейромиографии, полученных с применением как традиционных методик, так и относительно нового метода активации нервных структур – магнитной стимуляции (МС).

МЕТОДИКА

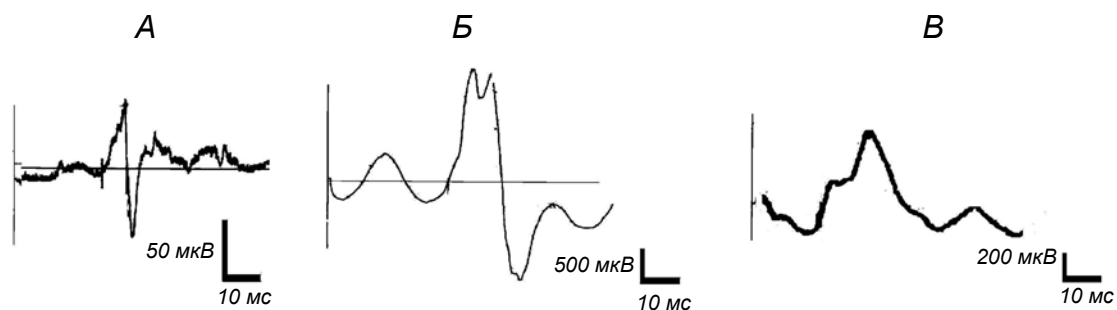
Анализ проводимости путей и рефлекторной деятельности спинного мозга был выполнен у 52 пациентов с осложненными травмами позвоночника шейной (позвонки CV–CVII, $n = 24$) и тораколюмбальной (позвонки ThXII – LI, $n = 28$) локализации. В соответствии с международными рекомендациями [2] степень неврологического дефицита у 31 из этих пациентов была отнесена к группам А и В (отсутствие движений на сегментарных уровнях ниже места повреждения). Частичное сохранение движений ниже указанного уровня (группы С и D) наблюдалось у 21 пациента. Возраст обследуемых варьировал от 15 до 68 лет. Сроки обследования классифицировались как ранние (менее трех месяцев после травмы) и поздние (от шести месяцев до пяти лет). Контрольную группу составляли 20 практически здоровых добровольцев. Все обследования были проведены в соответствии с Протоколом Этического комитета РНПЦ травматологии и ортопедии МЗ Республики Беларусь (протокол № 18 от 20.11.1995 г.).

Комплексное обследование включало в себя стандартные тесты с использованием стимуляци-

онной ЭМГ, исследование моторных ответов, вызванных МС (МС–МО), и регистрацию соматосенсорных вызванных потенциалов (ССВП). Для оценки состояния сегментарного нейронного и периферического нервно-мышечного аппарата применяли суммарную стимуляционную ЭМГ с использованием стандартных методических приемов [11]. МС производилась в режиме одиночных посылок магнитного импульса (максимальная индукция 2.0 Тл). Для возбуждения кортикальных структур индуктор Нр 90 Coil магнитного стимулятора «Magstim-250» («Magstim Comp.», Великобритания) размещали над поверхностью головы в проекции моторной зоны коры (транскраниальная МС–ТМС). Для МС спинальных корешков индуктор находился на линии позвоночника на уровне его шейного (CVII) или поясничного (LII) отдела. Для регистрации ЭМГ-ответов скелетных мышц верхних (*m. thenar*, *m. hypothenar*) и нижних (*m. tibialis anterior*, *mm. gastrocnemius-soleus*) конечностей применяли стандартную электрофизиологическую установку. ССВП инициировали путем раздражения периферических нервных стволов (*n. medianus*, *n. ulnaris*, *n. tibialis*) электрическими стимулами длительностью 0.2 мс, подаваемыми с частотой 3–4 с⁻¹. Использовали трехканальное отведение ССВП на кортикальном, спинальном и периферическом уровнях [12]. Статистическую обработку числовых данных проводили с помощью однофакторного дисперсионного анализа (ANOVA) и расчета *t*-критерия Стьюдента. Межгрупповые различия считались достоверными при $P < 0.05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Электрофизиологические показатели при нижнегрудной и поясничной локализации травмы позвоночника. Анализ проводимости и рефлекторной деятельности спинного мозга в подочаговой зоне у пациентов с отсутствием произвольных движений нижних конечностей ($n = 17$) в сроки один–три месяца после травмы выявил ряд вариантов наблюдаемой электрофизиологической картины. На фоне «электрического молчания» мышц голени и стоп при попытках их произвольного напряжения у шести человек полностью отсутствовали вызванные ЭМГ-ответы (Н-рефлексы, F-волны, МС–МО) и ССВП. У шести же обследованных обнаруживались редуцированные и деформированные Н-рефлекторные разряды и М-ответы, а моторные от-



ЭМГ-ответы, вызываемые транскраниальной магнитной стимуляцией и отводимые от *m. thenar* (А, Б) и *m. tibialis anterior* (В) через три недели после оскольчатого перелома позвонка CV (А) и через 10 месяцев после проведения оперативного и терапевтического лечения (Б, В).

А, В – нативные записи одиночных реализаций; Б – результат усреднения 10 реализаций.

EMГ-відповіді, викликані транскраніальною магнітною стимуляцією і відведені від *m. thenar* (А, Б) і *m. tibialis anterior* (В) через три тижні після осколкового перелому хребця CV (А) та через 10 місяців після проведення оперативного та терапевтичного лікування (Б, В).

веты, вызванные ТМС моторной коры, и ССВП отсутствовали. У пяти пациентов наблюдались низкоамплитудные Н- и М-ответы мышц голени и редуцированные ТМС–МО и ССВП. Подобные ответы при данной локализации спинальной травмы характеризовались значительно меньшей (менее 20 % нормы) амплитудой по сравнению с таковой в контрольной группе. Типичная двухфазная форма ТМС–МО утрачивалась; для таких потенциалов была характерна многофазная форма, и их длительность была значительно больше, чем в контроле. Средняя амплитуда ТМС–МО в данной подгруппе составляла всего 0.3 ± 0.1 мВ; амплитуда ССВП также была крайне низкой, составляя в среднем 0.3 ± 0.1 мкВ (спинальное отведение). Латентный период ТМС–МО, отводимых от *m. tibialis anterior*, мог достигать 85 мс, составляя в среднем 65.0 ± 15.0 мс, т. е. был достоверно больше по сравнению с наблюдаемым в группе контроля (28.9 ± 0.9 мс, $P < 0.05$). Если же магнитной стимуляции подвергались спинальные корешки, латентные периоды МО у пациентов с травмой позвоночника превышали соответствующие значения в группе контроля не более чем на 2–5 мс. Такая картина была типична для четырех больных с отсутствием двигательных функций нижних конечностей. У одного же пациента отмечали иной электрофизиологический паттерн: при относительно сохранных Н- и М-ответах мышц голени отсутствовали ТМС–МО, что, вероятно, свидетельствовало о преимущественном поражении латеральных участков ткани спинного мозга на уровне травмы. У пациентов с

частичной сохранностью движений (парез) среднее значение латентного периода ТМС–МО также было несколько повышено по сравнению с контролем, составляя в среднем 33.0 ± 2.1 мс ($P < 0.05$). Полученные данные указывают на то, что при осложненной травме позвоночника может встречаться скрытый вариант неполного нарушения спинальных функций, характеризующийся признаками частичной сохранности кортико-спинальных связей и сегментарных межнейронных сегментаций. Такой вариант представляется перспективным в аспекте возможности восстановления нарушенных рефлексов у подобных пациентов в ходе проведения целенаправленной терапии.

ЭМГ-ответы мышц на возбуждение нейронных систем моторной коры, обусловленное ТМС, представляют собой результат активации этих систем под влиянием токов, наведенных интенсивным переменным магнитным полем, передачи по кортико-спинальным (пирамидным) путям и синаптической передачи на сегментарном уровне, что приводит в конце концов к надпороговой активации спинальных мотонейронов. ТМС–МО, как и сегментарные рефлекторные ЭМГ-ответы (например, Н-рефлекс), в условиях стандартного отведения представляют собой двухфазные колебания (которые могут включать в себя несколько добавочных компонентов) и отличаются от упомянутых сегментарных рефлекторных ответов заметно большей длительностью. Амплитуда ТМС–МО в норме может достигать порядка 2 мВ; таким образом, активация в результате ТМС и поступления кортико-спинальных залпов

может затрагивать существенную часть сегментарных мотонейронных пулов (средняя амплитуда М-ответов при стимуляции периферических нервов в различных мышцах варьирует от 5–6 до 15 мВ) [13]. Преимуществами тестирования с использованием ТМС являются неинвазивность, безболезненность и высокая безопасность данной процедуры, а также возможность в довольно широких пределах варьировать интенсивность активации кортикальных механизмов и отводить соответствующие ЭМГ-феномены от различных мышц (т. е. сегментарные реакции, подверженные пирамидному контролю в различной степени).

Следует отметить, что динамика сегментарной рефлекторной возбудимости, согласно данным Н-рефлексометрии (стимуляция *n. tibialis*, отведение от *mm. gastrocnemius-soleus*), в ранние сроки после травмы имела ряд особенностей. Как известно, рефлекторные дуги моносинаптического Н-рефлекса, отводимого от мышц голени, замыкаются в области поясничного утолщения, т. е. спинальных сегментов L_5-S_1 , расположенных у человека на уровне позвонков *ThXII-LI*, т. е. на уровне повреждения позвоночника. В случае относительной сохранности мотонейронов поясничного утолщения Н-рефлекс мышц голени регистрировался только в остром периоде (первые–четвертые сутки после травмы), затем он угасал и не выявлялся на протяжении двух-трех месяцев, что традиционно объясняется развитием спинального шока [6, 14, 15]. Случаи восстановления Н-рефлекса на последующих этапах посттравматического периода свидетельствовали о возможности эффективных компенсаторных перестроек деятельности сегментарных синаптических механизмов. Сроки возобновления сегментарной рефлекторной деятельности совпадали по времени с завершением реакций ишемического и воспалительного характера. Пик таких реакций, по данным литературы, приходится на первые две недели, и они продолжаются около двух месяцев после травмы [16].

Анализ амплитудно-временных характеристик восстановленного Н-рефлекса, регистрируемого на фоне функциональных тестов (произвольное сокращение икроножной и камбаловидной мышц, прием Ендрассика), показал, что в отличие от контрольных тестируемых пациенты с частичным нарушением проводимости путей спинного мозга характеризуются преобладанием процесса угнетения данного рефлекса в результате супрасегментарных влияний. Подобный тип изменений рефлекса сви-

детельствует о частичной сохранности нисходящих нервных путей, достаточной для обеспечения передачи некоторых контролирующих (в основном тормозных) влияний от супраспинальных структур к сегментарным спинальным нейронам [17–19]. Полагают, что такие пути состоят в основном из тонких слабомиелинизированных волокон, расположенных в латеральных и, возможно, дорсальных канатиках белого вещества. Наличие эффекта модуляции амплитуды Н-рефлекса при проведении упомянутых выше тестов согласовывалось с результатами регистрации эффектов ТМС коры, свидетельствующими о сохранности функционально активных кортикоспинальных связей. Такой вывод представляется весьма важным в плане определения адекватных терапевтических и реабилитационных мероприятий.

Электрофизиологические показатели при шейной локализации травмы позвоночника. Среди больных с повреждением шейного отдела позвоночника ($n = 24$) частичная сохранность двигательной функции (тетрапарез) наблюдалась у 10 больных; полное отсутствие движений ниже уровня повреждения (тетраплегия) отмечалось у 14 пациентов. В последней подгруппе у девяти пациентов суммарные ЭМГ-реакции, ТМС–МО и ССВП при электрической стимуляции *n. ulnaris* и *n. medianus* полностью отсутствовали. В ранние сроки наблюдения у этих пациентов могли быть зарегистрированы только Н-рефлексы, обеспечиваемые активностью нейронных систем каудальных сегментов спинного мозга (отведение от *mm. gastrocnemius-soleus*). У других пяти пациентов на фоне «электрического молчания» мышц при попытке их произвольного напряжения в подочаговой зоне могли быть зарегистрированы редуцированные вызванные ответы. Паттерн электрофизиологических показателей в этой подгруппе был следующим: ТМС–МО сохранились у двух пациентов, спинальные и кортикальные ССВП – у одного, а ответы, относящиеся к обоим указанным типам, – у двух. Латентный период ТМС–МО *m. thenar* мог достигать 69 мс, в среднем составляя 56.9 ± 9.0 мс, что существенно превышало контрольное значение (в среднем 20.2 ± 1.0 мс, $P < 0.05$). У пациентов с частичной сохранностью движений превышение среднего значения латентного периода ТМС–МО также было статистически достоверным (26.2 ± 1.8 мс, $P < 0.05$). Увеличение латентного периода и снижение амплитуды ТМС–МО отчетливо коррелировали с тяжестью повреждения тканей спинного мозга, а сокращение ла-

тентного периода и повышение амплитуды данных ответов в ходе лечения отражали эффективность проводимых восстановительных мероприятий. На рисунке приведены примеры ТМС–МО у пациента с оскольчатым переломом позвонка C_V и нарушением функций нейронных систем спинного мозга ниже уровня травмы. Обследование через три недели после повреждения свидетельствовало о наличии минимальных низкоамплитудных ТМС–МО лишь в мышцах кисти (отведение от *m. thenar*; А). Через 10 месяцев после оперативного вмешательства и проведения восстановительного лечения результаты электрофизиологического мониторинга свидетельствовали о многократном увеличении амплитуды ТМС–МО в скелетных мышцах верхних конечностей (*m. thenar*; Б) и появлении подобных относительно высокоамплитудных ответов в мышцах нижних конечностей (*m. tibialis anterior*; В). На развитие репаративных процессов в структурах спинного мозга указывала также тенденция к нормализации сегментарной нейронной активности, выявляемая согласно данным Н-рефлексометрии; при этом, однако, сохранялся дефицит супраспинальной регуляции рефлекторной деятельности сегментарных механизмов.

В отдаленные периоды наблюдения результаты электрофизиологического мониторинга коррелировали с частичным восстановлением произвольной двигательной активности мышц верхней и нижней конечностей и появлением возможности сохранять вертикальную позу в состоянии покоя и при передвижении. Такая позитивная динамика выявлялась у двух пациентов из пяти – именно у тех, у которых в начальный период наблюдения удавалось зарегистрировать ТМС–МО и ССВП. Очевидно, что результаты электрофизиологического мониторинга существенно дополняют данные клинического наблюдения, позволяют объективизировать картину репаративных процессов в спинном мозгу у конкретного пациента, а также имеют явную прогностическую ценность.

Таким образом, результаты проведенной работы позволяют заключить, что электрофизиологический мониторинг характеристик проводимости по путям спинного мозга с использованием суммарной стимуляционной ЭМГ, методики ТМС и отведения ССВП дает возможность при различных формах и тяжести нейродеструкции более четко определить особенности функционального состояния спинальных нейронных систем и оценить как перспективы восстановления утраченных двигательных функ-

ций, так и эффективность проводимых хирургических и терапевтических мероприятий. Дальнейшие систематические исследования в данном направлении, очевидно, позволят глубже интерпретировать патогенез расстройств, связанных с травматизацией спинного мозга, и оптимизировать протоколы лечебных и реабилитационных мероприятий.

И. А. Ильясевич¹, Е. В. Сошникова¹, А. А. Вишневецкий²,
О. І. Дулуб¹, В. А. Кульчицкий³

ЕЛЕКТРОФІЗИОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ ПРОВІДНОСТІ СПІНАЛЬНИХ ШЛЯХІВ ПІСЛЯ ТРАВМИ ХРЕБТА

¹ Республіканський науково-практичний центр травматології та ортопедії, Мінськ (Республіка Беларусь).

² Санкт-Петербурзька медична академія післядипломної освіти (РФ).

³ Інститут фізіології НАН Білорусі, Мінськ (Республіка Беларусь).

Резюме

Реєструвались ЕМГ-відповіді м'язів верхніх і нижніх кінцівок, викликані стимуляцією периферичних нервів, а також ефекти магнітної стимуляції (МС) кори (транскраніальна МС–ТМС) і спинальних корінців та соматосенсорні викликані потенціали (ССВП). Часткове порушення рухових функцій кінцівок спостерігалось у 21 пацієнта. У потерпілих з повною відсутністю рухів у кінцівках ($n = 31$) у підвогнищевій зоні виявлялися два варіанти патернів електрофізіологічних феноменів: у 21 пацієнта викликані потенціали були повністю відсутніми, а у 10 спостерігалися редуковані моторні відповіді після магнітної стимуляції (МС–МО) та ССВП. Наявність таких потенціалів свідчила про часткове збереження церебро-спинальних шляхів в умовах пошкодження спинного мозку. Таким чином, оцінка результатів комплексного електрофізіологічного обстеження дозволяє об'єктивно верифікувати стан провідності шляхів спинного мозку в динаміці, обґрунтувати тактику лікування та оцінити ефективність заходів, здійснюваних для відновлення втрачених функцій спинальних механізмів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. И. Н. Шевелев, А. В. Басков, Д. Е. Яриков, И. А. Борщенко, “Восстановление функции спинного мозга: современные возможности и перспективы исследования”, *Вопр. нейрохирургии им. Н. Н. Бурденко*, № 3, 35-39 (2000).
2. G. Savic, E. M. Bergström, H. L. Frankel, et al., “Inter-rater reliability of motor and sensory examinations performed according to American Spinal Injury Association standards,” *Spinal Cord*, **45**, No. 6, 444-451 (2007).
3. В. И. Беляев, *Травма спинного мозга*, Медицина, Москва (2001).

4. А. А. Вишнеvский, О. В. Посохина, О. Е. Рыжова и др., “Возможности исследования соматосенсорных вызванных потенциалов при патологии позвоночника”, *Хирургия позвоночника*, № 3, 101-110 (2005).
5. И. Н. Плещинский, Т. В. Балтина, А. А. Еремеев и др., “Состояние нейромоторного аппарата крысы при экспериментальной травме позвоночника”, *Неврол. вестн.*, **36**, Вып. 1/2, 72-75 (2004).
6. W. B. McKay, D. C. Lee, H. K. Lim, et al., “Neurophysiological examination of the corticospinal system and voluntary motor control in motor-incomplete human spinal cord injury,” *Exp. Brain Res*, **163**, No. 3, 379-387 (2005).
7. P. Diehl, U. Kliesch, V. Dietz, and A. Curt, “Impaired facilitation of motor evoked potentials in incomplete spinal cord injury,” *J. Neurol.*, **253**, No. 1, 51-57 (2006).
8. W. H. Donovan, D. J. Brown, J. F. Ditunno, et al., “Neurological issues,” *Spinal Cord*, **35**, No. 5, 275-281 (1997).
9. J. A. Norton and M. A. Gorassini, “Changes in cortically related intermuscular coherence accompanying improvements in locomotor skills in incomplete spinal cord injury,” *J. Neurophysiol.*, **95**, No. 4, 2580-2589 (2006).
10. B. Wirth, H. J. Van Hedel, and A. Curt, “Changes in corticospinal function and ankle motor control during recovery from incomplete spinal cord injury,” *J. Neurotrauma*, **25**, No. 5, 467-478 (2008).
11. С. Г. Николаев, *Практикум по клинической электромиографии*, Иваново (2003).
12. В. В. Гнездицкий, *Вызванные потенциалы мозга в клинической практике*, Москва (2003).
13. С. Байкушев, З. Х. Манович, В. П. Новикова, *Стимуляционная электромиография и электронейрография в клинике нервных болезней*, Медицина, Москва (1974).
14. И. Р. Воронович, О. И. Шалатонина, И. А. Ильясевич, Л. А. Новожилова, “Значение электромиографических исследований в диагностике, лечении и реабилитации больных с осложненной травмой позвоночника”, *Ортопедия, травматология*, № 5, 4-10 (1991).
15. И. А. Ильясевич, Е. Д. Белоенко, А. Н. Мазуренко, “Нейрофизиологические критерии состояния проводимости спинного мозга при осложненной травме нижнегрудного и поясничного отделов позвоночника”, *Вестн. Нац. Акад. наук Беларуси*, № 4, 24-32 (2003).
16. И. А. Борщенко, А. В. Басков, А. Г. Коршунов, Ф. С. Сатанова, “Некоторые аспекты патофизиологии травматического повреждения и регенерации спинного мозга”, *Вопр. нейрохирургии им. Н. Н. Бурденко*, № 2, 28-31 (2000).
17. B. Cioni, M. R. Dimitrijevic, W. B. McKay, and A. M. Sherwood, “Voluntary supraspinal suppression of spinal reflex activity in paralyzed muscles of spinal cord injury patients,” *Exp. Neurol.*, **93**, No. 3, 574-583 (1986).
18. А. И. Пиляvский, И. А. Яхница, Л. Д. Потехин, А. Е. Шпунтов, “Исследование нисходящей модуляции рефлекторных реакций спинальных мотонейронов при повреждениях спинного мозга у людей”, *Нейрофизиология*, **20**, № 1, 105-113 (1988).
19. И. А. Яхница, Е. В. Агулова, “Электрофизиологический анализ двигательных единиц *m. soleus* человека, принимающих участие в формировании Н-рефлекса”, *Нейрофизиология/Neurophysiology*, **1**, № 6, 417-420 (1993).